

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ESCUELA DE POSGRADOS
PROGRAMA DE DOCTORADO
EN CIENCIAS AGROPECUARIAS – ÁREA AGRARIA
ÉNFASIS EN FISIOLÓGÍA DE CULTIVOS

DESARROLLO DE UN MODELO EXPLICATIVO DE LA PRODUCTIVIDAD
POTENCIAL DEL CULTIVO DE ARVEJA (*Pisum sativum* L.) VAR. SANTA ISABEL
BAJO CONDICIONES DE LA SABANA DE BOGOTÁ

JULIO RICARDO GALINDO PACHECO

BOGOTÁ, D.C.
2006

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ESCUELA DE POSGRADOS
PROGRAMA DE DOCTORADO
EN CIENCIAS AGROPECUARIAS – ÁREA AGRARIA
ÉNFASIS EN FISIOLÓGÍA DE CULTIVOS

DESARROLLO DE UN MODELO EXPLICATIVO DE LA PRODUCTIVIDAD
POTENCIAL DEL CULTIVO DE ARVEJA (*Pisum sativum* L.) VAR. SANTA ISABEL
BAJO CONDICIONES DE LA SABANA DE BOGOTÁ

Director JAIRO CLAVIJO PORRAS,
Ingeniero Agrónomo Ph. D.

Tesis de doctorado presentada como requisito parcial para optar al título de Doctor en
Ciencias Agropecuarias Área Agraria

Por:

JULIO RICARDO GALINDO PACHECO

BOGOTÁ D.C.

2006

“El presidente de tesis y el consejo examinador, no serán responsables de las ideas emitidas
por el autor”.
(Artículo 217 de los Estatutos de la Universidad Nacional de Colombia)

A Jeannette y Andrés
Por su apoyo, estímulo y sacrificio

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias a la colaboración de las siguientes personas y entidades:

Dr. Jairo Clavijo Porras, por la dirección de tesis.

Dr. Fabio Leyva B., como Director del proyecto de Agricultura de Precisión, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía.

Dra. Jeannette Amparo Español Aragón, por su apoyo y asesoría.

Ingeniera Silvia Pérez, Centro Agropecuario Marengo, CAM, Universidad Nacional.

Dr. David Lozano, por su apoyo y confianza.

Doctores del Jurado Calificador: Cilia Fuentes, Gerhard Fisher y José Miguel Cótes, por la cuidadosa revisión del documento final.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Corpoica, y en especial el Programa Nacional de Biometría, los Doctores Ricardo Martínez y Jorge Argüelles.

Y a todas las demás personas que difícilmente puedo enumerar pero que también contribuyeron a la terminación exitosa de este trabajo.

RESUMEN

DESARROLLO DE UN MODELO EXPLICATIVO DE LA PRODUCTIVIDAD POTENCIAL DEL CULTIVO DE ARVEJA (*Pisum sativum* L.) VAR. SANTA ISABEL BAJO CONDICIONES DE LA SABANA DE BOGOTÁ

La arveja verde (*Pisum sativum* L.) sobresale en Colombia por ser la hortaliza con mayor área cultivada, especialmente en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. A pesar de esto, los rendimientos a nivel nacional son bajos ($1,24 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$), y la investigación en esta especie bajo condiciones colombianas, es escasa. La demanda interna debe ser cubierta en un 61% con importaciones, especialmente del Canadá. La Sabana de Bogotá sobresale por su dedicación al cultivo de hortalizas. Para estimar el potencial de productividad del cultivo de arveja bajo las condiciones de la Sabana de Bogotá (2640 m.s.n.m., $14 \text{ }^\circ\text{C}$, 80% H.R., 800 mm de lluvia/año), se hizo el seguimiento a cinco ensayos, tres en campo en el Centro Agropecuario Marengo (CAM) de la Universidad Nacional de Colombia, y dos en invernadero (uno en el CAM y otro en el Centro Nacional de Investigaciones Tibaitatá, CORPOICA). Para facilitar el seguimiento del crecimiento a los cultivos, se evaluaron varias relaciones alométricas entre las partes de la planta de arveja, las cuales permitieron evaluar el área foliar en forma no destructiva, determinar la forma como la planta distribuye los asimilados entre los diferentes órganos, y proponer la dinámica de crecimiento más adecuada conforme a las relaciones observadas. Adicionalmente, se hizo el seguimiento fenológico al cultivo, para estimar el momento de emergencia, la tasa de aparición de nudos, la aparición del primer nudo con flor, y el momento de la cosecha, con base en las condiciones ambientales especialmente de temperatura. Se propusieron modelos del desarrollo foliar a lo largo del tallo principal, y se calcularon el área foliar específica, el índice de cosecha en vaina y grano, y la acumulación de materia seca en el tallo. Con estos parámetros, y con base en información de otros modelos de cultivos como CROPSYST y CERES-Maize, se propuso un modelo explicativo del crecimiento, desarrollo y productividad potencial del cultivo de arveja. De acuerdo con los resultados, el área de los foliolos (S) se puede estimar con base en la longitud (L) y ancho (A) de los mismos, y también se pueden lograr buenas aproximaciones para el área de las hojas y las estípulas. Se propone estimar el área de los foliolos con base en únicamente L con la fórmula $S=0,36L^2$. El análisis alométrico de la parte aérea de la planta sugiere que se considere por separado el crecimiento del tallo, las láminas foliares (estípulas y hojas) y las estructuras reproductivas. Aparentemente el tallo acumula continuamente materia seca en toda su longitud a lo largo del ciclo de cultivo, de modo que la parte basal de mayor edad es la más densa. El filocrón de la arveja fue consistente para los ensayos de campo en 2,88 días o $43 \text{ }^\circ\text{C d}$. El inicio de la floración coincidió con la aparición del nudo 17 en el tallo principal. El crecimiento en área foliar en el perfil del tallo siguió una función de forma de campana, con un máximo desarrollo alrededor del nudo 19. El índice de cosecha en vainas fue de 0,51. Con esta información se propuso un modelo de simulación del crecimiento y productividad del cultivo, en el cual se discretizó el tiempo en días, se aplicaron funciones diferenciales y se aproximó la solución de las mismas con el método de Euler. El modelo se evaluó por su sensibilidad a la densidad de siembra y se estimó una productividad máxima en $11,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, con 20 tallos/m^2 .

ABSTRACT

MODEL DEVELOPMENT TO EXPLAIN PEA (*Pisum sativum* L., var. SANTA ISABEL) CROP POTENTIAL PRODUCTIVITY UNDER BOGOTÁ SAVANNA CONDITIONS

Fresh pea (*Pisum sativum* L.) occupies the largest cultivated area between the horticultural crops in Colombia, mainly concentrated in Cundinamarca and Boyacá. However, the national average crop yield is low ($1.24 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$), and the research on this crop under colombian conditions are scarce. Internal demand is covered by imports to 61%, specially from Canada. Bogotá flat highland is an important region dedicated to horticultural crops. To estimate pea crop potential productivity under Bogotá conditions (2640 m over sea level, $14 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 80% R.H., rainfall of 800 mm/year), five trials were done, three at open field at Centro Agropecuario Marengo (CAM) of the colombian National University, and two at greenhouse (one at CAM and another at Centro Nacional de Investigaciones Tibaitatá, CORPOICA). To evaluate crop growth easily, several allometric relations were established for the pea plant, allowing to estimate leaf area by non-destructive methods, get insights in assimilate distribution patterns between different plant organs, and propose an appropriate plant growth dynamic according to the observed relationships. Additionally, crop phenology was evaluated to estimate crop emergency timing, node rate appearance, node at the first flower appearance, and harvest timing, taking into account environmental conditions, specially temperature. Leaf area model for the nodes in main stem was proposed, and specific leaf area, harvest index for pods and grains, and stem dry matter accumulation were calculated. With this parameters, and others from CROPSYST and CERES-Maize crop simulation models, a new explicative model for growth, development and potential productivity was proposed. According to the results, leaflets area (S) can be estimated from leaflet length (L) and wide (A), as the leaf area and stipule area. Leaflet area could be estimated from leaflet length alone, using $S=0.36L^2$. Allometric analysis suggested to work stem growth, leaf blades (stipules included) and reproductive structures separately for simulation. Stem apparently accumulates dry matter continuously along its length at crop cycle, so the basal part is more dense. Pea phyllocron were similar for open field experiments, and was 2.88 days or $43 \text{ }^{\circ}\text{C d}$. Flower initiation coincide with 17 node appearance at main stem. Leaf area growth at main stem profile was described with a bell-shaped function, with a maximum point at 19th node. Pod harvest index was 0,51. With this information a simulation model was proposed for crop growth and yield, with time steps discretized in days, differential equations were applied, and Euler method was used to solve them. The model was evaluated by its sensitivity to crop density and maximum productivity was estimated in $11.5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, with 20 stems/ m^2 .

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	vii
TABLA DE CONTENIDO.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xi
SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES.....	xiii
LISTA DE TABLAS.....	xiv
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	16
1.1 Introducción.....	17
1.2 Estado actual del problema.....	18
1.3 Objetivos.....	18
1.4 Objetivo general.....	18
1.5 Objetivos específicos.....	18
1.6 Literatura citada.....	19
CAPÍTULO 2. REVISIÓN SOBRE MODELACIÓN DE CULTIVOS, FUNDAMENTOS, APLICACIONES Y PROSPECTIVAS.....	20
2.1 Introducción.....	21
2.2 Aproximaciones a la dinámica del crecimiento.....	22
2.3 Enfoque de sistemas dinámicos.....	23
2.3.1 Interceptación de luz.....	24
2.3.2 Formación de asimilados.....	25
2.3.4 Desarrollo fenológico.....	26
2.4 Niveles de enfoque.....	27
2.5 Principios generales de modelación.....	28
2.6 Desarrollo modular.....	28
2.7 Aplicaciones.....	30
2.8 Perspectivas.....	31
2.9 Literatura citada.....	32
CAPÍTULO 3. IMPORTANCIA DEL CULTIVO DE ARVEJA.....	38
3.1 La planta.....	39
3.2 Desarrollo fenológico.....	40
3.3 Valor nutricional.....	41
3.4 Importancia ecológica.....	42
3.5 Requerimientos hídricos.....	43
3.6 Producción en Colombia.....	44
3.7 Producción mundial.....	45
3.8 Literatura citada.....	46
CAPÍTULO 4. ALGUNAS RELACIONES ALOMÉTRICAS DEL CRECIMIENTO DE LA PLANTA DE ARVEJA (<i>Pisum sativum</i> L.).....	49
4.1 Resumen.....	50
4.2 Introducción.....	50
4.3 Materiales y métodos.....	53
4.3.1 Estimación del área foliar.....	54
4.3.2. Características reproductivas.....	54

4.4 Resultados y Discusión.....	55
4.4.1 Área de los foliolos.....	55
4.4.2. Estimación del área de la hoja.....	61
4.4.3 Área de las estípulas.....	64
4.4.4 Crecimiento del tallo y ramas.....	65
4.4.5 Crecimiento del tallo.....	65
4.4.6 Crecimiento de las ramas.....	66
4.4.7 Número y longitud de vainas.....	67
4.4.7.1 Número de flores y vainas.....	67
4.4.7.2 Tamaño de las vainas.....	68
4.5 Conclusiones.....	69
4.8 Literatura citada.....	69
CAPÍTULO 5. PARÁMETROS FENOLÓGICOS BÁSICOS PARA LA MODELACIÓN DEL CULTIVO DE ARVEJA (<i>Pisum sativum</i> L.) BAJO CONDICIONES DE LA SABANA DE BOGOTÁ.....	73
5.1 Resumen.....	74
5.2 Introducción.....	74
5.3 Materiales y métodos.....	76
5.3.1 Evaluación del crecimiento.....	77
5.3.2 Evaluación del clima.....	77
5.3.3 Cálculo de los grados día.....	78
5.3.4 Estimación del filocrón.....	78
5.3.5. Duración de los estados fenológicos.....	78
5.4 Resultados y discusión.....	79
5.4.1 Diferencias de la temperatura ambiente entre invernadero y campo abierto.....	79
5.4.2 Estimación de la radiación incidente sobre los cultivos.....	79
5.4.3. Emergencia del cultivo.....	79
5.4.4. Tasa de aparición de nudos en el tallo principal.....	80
5.4.6. Cosecha.....	86
5.5. Conclusiones.....	86
5.8 Literatura citada.....	86
CAPÍTULO 6. ALGUNOS PARÁMETROS DE CRECIMIENTO EN ÁREA Y BIOMASA DEL CULTIVO DE ARVEJA (<i>Pisum sativum</i> L.).....	90
6.1 Resumen.....	91
6.2 Introducción.....	91
6.3 Materiales y métodos.....	92
6.3.1. Área foliar por piso.....	93
6.3.2. Área foliar específica.....	93
6.3.3. Peso seco del tallo.....	93
6.3.4. Índice de cosecha.....	93
6.4 Resultados y discusión.....	94
6.4.1 Área por piso foliar.....	94
6.4.2. Área foliar específica.....	97
6.4.3. Formación de materia seca en el tallo.....	99
6.4.4. Formación de materia seca en producción e índice de cosecha.....	99
6.5 Conclusiones.....	101
6.6 Literatura citada.....	101

CAPÍTULO 7. MODELACIÓN DEL CRECIMIENTO Y LA PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO DE ARVEJA (<i>Pisum sativum</i> L.)	104
7.1. Resumen	105
7.2 Introducción.....	106
7.2.1. Tipos de modelos.....	106
7.2.2. Algunos modelos de simulación de cultivos	107
7.3 Materiales y métodos.....	109
7.3.1. Definición de los estados de desarrollo	109
7.3.2. Desarrollo de biomasa	111
7.3.3. Distribución de asimilados	112
7.3.4 Desarrollo reproductivo.....	114
7.3.5 Senescencia.....	115
7.3.6 Programación.....	115
7.4 Resultados y discusión	115
7.5. Conclusiones.....	119
7.6 Literatura citada.....	119
CAPÍTULO 8. MODELACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD POTENCIAL DEL CULTIVO DE ARVEJA (<i>Pisum sativum</i> L.) EN RESPUESTA A LA DENSIDAD DE PLANTAS	124
8.1 Resumen	125
8.2 Introducción.....	125
8.3. Materiales y métodos.....	126
8.3.1. Ensayo de campo	126
8.3.2. Simulación del efecto de la densidad	127
8.4. Resultados y Discusión.....	127
8.4.1 Ensayo de campo	127
8.4.2. Resultados de simulación	129
8.5 Conclusiones.....	132
8.6 Literatura citada.....	132
9. DISCUSIÓN GENERAL	135
10. CONCLUSIONES GENERALES	139
11. RECOMENDACIONES	140
12. Literatura general citada.....	141

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Algunos estadios de desarrollo de la arveja según la clave de la BBCH (Fuente: Meier, 2001).	41
Figura 4.1. Partes de la hoja de arveja.....	55
Figura 4.2. Estimación por regresión del área foliar con base en el largo y ancho de los foliolos.....	57
Figura 4.3. Relación entre el área (cm ²) y la longitud (cm) del foliolo de arveja, para dos evaluaciones a los 42 (a) y 62 (b) días después de la siembra, con la ecuación 4.1, y la estimación del coeficiente en la Tabla 4.3.....	59
Figura 4.4. Algunas formas irregulares de los foliolos de arveja.....	60
Figura 4.5. Relaciones de la longitud del pecíolo con la longitud de los foliolos de la hoja compuesta de arveja: a) longitud del primer par foliar, b) longitud del segundo par foliar, c) longitud del tercer par foliar.	63
Figura 4.6. Relación de la longitud del pecíolo y la longitud de la estípula	65
Figura 4.7. Longitud de entrenudos del tallo principal de la planta de arveja var. Santa Isabel, para el cultivo del CAM semestre B de 2004	66
Figura 4.8. Desarrollo de ramas en el tallo principal de arveja. a) Frecuencia relativa de ramificación según el nudo del tallo principal de la planta de arveja var. Santa Isabel (324 ramas de 28 plantas), y b) mediana del número de nudos por rama según el nudo de procedencia en el tallo principal de la planta de arveja var. Santa Isabel.....	67
Figura 5.1. Ensayos realizados a. Invernadero túnel en Corpoica Tibaitatá, ensayo IT-2004A, b. Invernadero U.N. CAM, ensayo IC-2004B, c. Campo lote 8 del CAM, ensayo L8-2004B, d. Campo lote 7 del CAM, ensayo L7-2005A. Se aprecia el tutorado de colgadura en todos los casos.	76
Figura 5.2. Nudos aparentes en el tallo principal de la planta de arveja para cuatro ensayos: a) L82004B, b) L72005A, c) IT2004A, d) IC2004B.....	82
Figura 5.3. Tasa de aparición de nudos en el tallo principal de la planta de arveja var. Santa Isabel, para cuatro condiciones ambientales, dos en invernadero (ICAM, ITIBA) y dos en campo (Lote 8 y Lote 7).	83
Figura 5.4. Relación de la tasa de aparición de hojas (LAR) y la temperatura del aire (°C), en la planta de arveja var. Santa Isabel.....	84
Figura 6.1. Área foliar por nudo del tallo principal en la planta de arveja en ensayos de campo en el CAM. a) Ensayo L8-2004B, b) Ensayo L7-2005A, c) Ensayo L7-2005B.....	95
Figura 6.2. Curva estimada del área foliar acumulada a lo largo del tallo principal de la planta de arveja var. Santa Isabel, en cuatro ambientes (dos en invernadero y dos en campo abierto).....	97
Figura 7.1 Diagrama de Forrester para el modelo de simulación del crecimiento vegetal en arveja. Las abreviaturas son: <i>IL</i> , interceptación de luz, <i>EC</i> , eficiencia de conversión, <i>PA</i> , partición de asimilados (adaptado de Marcelis <i>et al.</i> , 1998). 110	
Figura 7.2. Curva simulada del índice de área foliar y de la biomasa dedicada a la formación de follaje.....	116
Figura 7.3. Curva de biomasa acumulada para el crecimiento de las vainas de arveja.....	117

Figura 8.1. Mapa de productividad del cultivo de arveja var. Santa Isabel en el Lote 7 del CAM, segundo semestre de 2006. El objetivo de este análisis fue explorar los sitios de mayor productividad.....	130
Figura 8.2. Niveles de productividad esperada con diferentes densidades de tallo de arveja var. Santa Isabel bajo condiciones de la Sabana de Bogotá	130

SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES

IAF	Índice de área foliar ($m^2 \cdot m^{-2}$)
T_b	Temperatura base ($^{\circ}C$)
$^{\circ}C d$	Tiempo térmico en Grados día
k	Coefficiente de extinción de la luz en el dosel de la planta
PAR	Radiación fotosintéticamente activa $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$
RA	Radiación solar incidente sobre el cultivo $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$
SD	Desviación estándar de la muestra
RIC	Rango intercuartílico
SW	Valor P para la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks
SE	Error estándar del promedio
WUE	Eficiencia del cultivo en el uso del agua
L	Longitud de la estructura vegetal (cm)
A	Ancho de la estructura vegetal (cm)
S	Área de la lámina foliar (cm^2)
LAR	Tasa de aparición foliar (d^{-1})
RWC	Contenido relativo de agua
RA	Radiación solar incidente sobre el cultivo ($MJ \cdot m^{-2}$)
DELTA B	Incremento potencial de biomasa ($kg \cdot m^{-2}$)
RUE	Eficiencia en el uso de la luz ($g \cdot MJ^{-1}$)
<i>DeltaPesoRaquis</i>	Incremento diario en el peso del raquis y pecíolo (g)
<i>DeltaPesoLámina</i>	Incremento diario en el peso de las láminas foliares (g)
<i>DeltaPesoRaíz</i>	Incremento diario en el peso de la raíz (g)
RHR	Razón de partición de biomasa entre la hoja y la raíz
RLR	Razón de partición de biomasa entre la lámina foliar y el ráquis de la hoja
LONHOJAS	Longitud de la hoja
RELON	Razón de longitud entre las hojas y el tallo en el fitómero correspondiente
AREAFOL	Área foliar (cm^2)
<i>DeltaPesoLámina</i>	Incremento diario en la biomasa de las láminas foliares (g)
AFE	Área foliar específica
NPLANTAS	Densidad de plantas ($plantas/m^2$)
<i>CrecimientoTallo</i>	Incremento diario en la biomasa del tallo (g)
<i>LlenadoTallo</i>	Incremento diario en la biomasa del tallo por engrosamiento (g)
DELTA BH	Biomasa destinada al desarrollo de hojas (g)
DELTA B	Producción diaria de biomasa (g)

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1.	Tiempo en días después de la siembra que tardan en ocurrir algunos eventos fenológicos del cultivo de arveja var. Piquinegra.....	40
Tabla 3.2.	Contenidos de nutrientes en 100 g de porción comestible de la arveja entera verde	42
Tabla 3.3.	Área cosechada, producción obtenida y rendimiento del cultivo de arveja en Colombia por año agrícola	45
Tabla 3.4.	Área cosechada, producción obtenida y rendimiento de las principales hortalizas en Colombia, en el año agrícola 2004	45
Tabla 4.1.	Dimensiones de las partes del fitómero de la planta de arveja, para los primeros 8 nudos vegetativos.	56
Tabla 4.2.	Estadísticas descriptivas del tamaño de los folíolos de hojas de la planta arveja var. Santa Isabel, para los últimos nudos vegetativos del tallo principal.	56
Tabla 4.3.	Modelos para estimar el área de los folíolos S en cm^2 a partir del largo L y el ancho A de los mismos en cm	57
Tabla 4.4.	Cuantiles para la distribución observada y esperada con las distribuciones normal y Weibull en el error de estimación del área foliar (cm^2) con base en el largo L del folíolo (cm) según el modelo $S=bL^2$. $n=2950$	60
Tabla 4.5.	Área de los folíolos de la hoja de arveja ($\text{cm}^2/\text{folíolo}$) según el par foliar al que corresponden en la hoja, y razón de tamaño con respecto al primer par de folíolos.	61
Tabla 4.6.	Coefficientes de correlación simples de Pearson y número de observaciones para la longitud de algunas las estructuras de la hoja de arveja y su estípula correspondiente, en el tallo principal y las ramas de la planta de arveja a los 112 días después de la siembra.....	62
Tabla 4.7.	Modelos para estimar la longitud de los folíolos L a partir de la longitud del pecíolo P y del raquis R ($n=32$)	63
Tabla 4.8.	Simetría longitudinal del área foliar (cm^2) de las hojas de la planta de arveja var. Santa Isabel.....	64
Tabla 4.9.	Modelos para estimar la longitud de las estípulas E (cm) a partir de la longitud del pecíolo P (cm), en hojas con mínimo cuatro folíolos.	64
Tabla 4.10.	Correlaciones de la longitud mediana de las vainas y la mediana de diferentes partes del fitómero de la planta de arveja en el tallo principal.	68
Tabla 5.1.	Estimación del día de emergencia, tasa de aparición de nudos y nudos totales del tallo principal de la planta de arveja en cuatro ensayos experimentales	80
Tabla 5.2.	Grados día a emergencia de las plántulas de arveja para los cuatro ensayos	80
Tabla 5.3.	Tiempo en grados día que tarda la aparición de nudos ($^{\circ}\text{C} / \text{nudo}$) en el tallo de la planta de arveja var. Santa Isabel para diferentes ensayos bajo condiciones de campo.....	81
Tabla 5.4.	Características reproductivas de la planta de arveja var. Santa Isabel, en tres ensayos de campo.	85
Tabla 6.1.	Modelos exponencial cuadrático y cúbico para el área foliar por piso en el tallo principal.....	96
Tabla 6.2.	Desarrollo del área foliar en el tallo principal durante la fase vegetativa del ciclo de la planta de arveja var. Santa Isabel.....	98

Tabla 6.3. Área foliar específica para la arveja var. Santa Isabel, en dos ensayos de campo en el Centro Agropecuario Marengo, U.N. 2004, 2005.	98
Tabla 6.4. Distribución de la materia seca a lo largo del tallo principal de la planta de arveja	99
Tabla 6.5. Estimación de índices de cosecha con relación a vainas y granos en la planta de arveja var. Santa Isabel, en el ensayo del lote 7 del CAM, Semestre A de 2005	99
Tabla 8.1. Coeficiente de correlación simple (r^2) de la productividad del cultivo de arveja y los contenidos de nutrientes en el tejido foliar de la planta, según los resultados del ensayo en el lote 7 del CAM, semestre 2 de 2005, n=30.....	128
Tabla 8.2. Estimación por regresión del día de emergencia de las plántulas y la tasa de aparición de nudos en el tallo principal de las plantas de arveja var. Santa Isabel, semestre 2 de 2006, CAM.....	128
Tabla 8.3. Características de desarrollo de las plantas de arveja var. Santa Isabel, semestre 2 de 2006, CAM	129

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Introducción

El avance de la ciencia se ha fundamentado en reconocer la existencia de las leyes que rigen la naturaleza. En la medida en que se identifiquen y precisen los principios que gobiernan los fenómenos naturales, será posible construir teorías que permitan predecir resultados que pueden ser comprobados por observación o experimentación (Goodstein, 2000). Esta tarea, sin embargo, no ha sido fácil, y han habido muchos errores y desaciertos, de los cuales también se ha aprendido.

Los modelos son una forma de representar los principios que rigen la naturaleza, en una forma simplificada y fácil de manejar. Constituyen un esfuerzo humano por comprender y explicar coherentemente fenómenos naturales, con las limitaciones que surgen del nivel de conocimientos actual. La simplificación es necesaria para reducir al mínimo los elementos que explican el resultado de interés, y facilitar el desarrollo de aplicaciones prácticas que surgen del uso del modelo.

La necesidad de hacer predicciones de la manera más objetiva posible, con base en el conocimiento científico actual, se hace evidente en la planeación del uso de los recursos. En agricultura, la FAO ha visto la conveniencia de utilizar modelos de simulación de cultivos para adelantar el Plan de Ordenamiento Territorial Sostenible, un proyecto regional para los países de América Latina y el Caribe (FAO, 2006).

El suelo es un recurso natural renovable, pero sujeto a pérdidas por manejo inapropiado. Por lo tanto, es conveniente valorar las pérdidas que se suceden actualmente por malas prácticas agrícolas, para justificar las medidas administrativas que sean convenientes. Como estas pérdidas a menudo no son fácilmente apreciables en periodos cortos de tiempo, los modelos de simulación proveen una aproximación adecuada para hacer proyecciones no sólo de los daños sino también de posibles alternativas de solución en el uso de la tierra. Recientemente se utilizó EPIC (Environmental Policy Integrated Control) para elaborar las Cuentas Ambientales del suelo en Colombia, y alertar a los políticos y administradores sobre las pérdidas de suelo por erosión (Baquero, 2002).

En este contexto, el trabajo que se presenta a continuación es un esfuerzo por avanzar en el uso de modelos aplicados en el campo de la agricultura colombiana. A pesar de la resistencia e incredulidad iniciales, y guardando las proporciones que se deben tener en una aproximación matemática, los modelos de simulación se han fortalecido en los últimos años a nivel mundial, como una necesidad frente al extenso desarrollo de la ciencia que tiende naturalmente a dispersarse, y con la justificación que trae la posibilidad de evaluar diferentes escenarios para predecir el comportamiento de cultivos y los sistemas alternativos de manejo de fincas.

El cultivo de la arveja presenta ventajas importantes para trabajar en este sentido. Su ciclo de vida es corto (cerca de 4 meses), su importancia como leguminosa es evidente, la extensión del área cultivada en Colombia la resalta como la hortaliza más sobresaliente (MADR, 2006), y las necesidades de investigación son grandes, dado el bajo nivel de productividad a nivel de fincas.

1.2 Estado actual del problema

Según FENALCE (2006) la arveja se produce en 14 departamentos de Colombia, pero sólo en Boyacá y Cundinamarca se cubre un 68% de la producción total. Este cultivo genera 13.300 empleos directos a la economía campesina, y sustenta unas 26.000 familias. Sin embargo, actualmente se importa arveja seca especialmente del Canadá (98% del volumen total) para cubrir en un 65% las necesidades de consumo. En el año 2001, la industria colombiana importó 27.766 t.

Aunque el área cultivada en arveja sobresale entre las demás hortalizas, la productividad promedio nacional es muy baja ($1,24 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, MADR, 2006). Es un cultivo que se extiende por todo el mundo, y cuya productividad puede llegar, según las estadísticas de la FAO (FAOSTAT, 2006), a las $29 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ en Lithuania, donde la arveja es la leguminosa cultivada más importante. Obviamente, el impulso de un cultivo no se puede hacer sin el apoyo en el sector correspondiente y sin una investigación agrícola fuerte.

1.3 Objetivos

1.4 Objetivo general

El objetivo general de esta investigación fue contribuir al desarrollo tecnológico del cultivo de arveja en Colombia, con la elaboración de un modelo explicativo de la productividad potencial que permitiera identificar las posibilidades de desarrollo del cultivo. Se espera que este modelo sirva de base para identificar zonas productoras, evaluar la brecha tecnológica y sus causas, promover la investigación científica y facilitar la planeación de la producción del cultivo hacia el futuro.

1.5 Objetivos específicos

Para el logro del objetivo general se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- ❑ Revisar la información existente de modelos de simulación de cultivos que pudiera ser adoptada y adaptada para el presente caso
- ❑ Desarrollar métodos no destructivos para el seguimiento del crecimiento vegetal en cuanto a área foliar y peso seco
- ❑ Evaluar la distribución de asimilados entre los diferentes órganos de la planta
- ❑ Establecer parámetros fenológicos básicos del cultivo de arveja, relativos a la emergencia, aparición de nudos, inicio de floración y madurez de la cosecha
- ❑ Establecer algunas funciones de crecimiento y relaciones en la distribución de materia seca
- ❑ Construir una propuesta para la modelación del cultivo

En este trabajo se presentan siete capítulos de contenido que se interrelacionan estrechamente, sin contar la introducción. En el segundo capítulo explica brevemente el fundamento de los modelos de simulación en agricultura, sus diversas aplicaciones y proyecciones. En el tercer capítulo se describen algunos aspectos generales del cultivo de

arveja y su importancia a nivel nacional y mundial. En el capítulo cuarto se hace referencia al tema de la alometría, un concepto clave para entender el crecimiento vegetal, en cuanto las relaciones de tamaño, arquitectura de la planta, distribución de asimilados, y funcionalidad de las estructuras, ya que muchas relaciones de tamaño son un reflejo de la capacidad de la planta para adaptarse al medio ambiente (Dingkuhn y Luquet, 2005). En el capítulo quinto se revisan algunos parámetros fenológicos del cultivo que permiten estimar el momento de ocurrencia de eventos importantes en el desarrollo vegetal. En el capítulo sexto se evalúan algunos modelos de crecimiento foliar y formación de materia seca, con algunos parámetros básicos que sirven de base a la modelación de cultivos, en especial el índice de cosecha y el área foliar específica. En el capítulo siete se aborda el tema del modelo de arveja, y se discuten algunas de sus implicaciones. En el capítulo ocho se aplica el modelo para determinar su sensibilidad a la densidad de siembra, un aspecto clave en la productividad de los cultivos.

Las perspectivas de avance en este tema son grandes. Tal vez la aplicación más importante de los modelos de simulación se hace a través de la planificación en el uso de tierras, para el mejor aprovechamiento y conservación de los recursos naturales. Esta investigación está enmarcada dentro del proyecto de la Universidad Nacional de Colombia titulada “Manejo sostenible del suelo en sistemas de cultivos transitorios bajo la concepción de la agricultura de precisión”, que lidera el profesor Fabio Leyva. En este sentido, están pendientes algunos artículos que apuntan a determinar el efecto de los niveles de fertilidad y humedad en el crecimiento del cultivo de arveja, lo cual constituirá un nuevo aporte en el perfeccionamiento del modelo y extenderá las posibilidades de su aplicación práctica.

1.6 Literatura citada

Dingkuhn, M. y D. Luquet. 2005. Phenotypic plasticity of crops and adaptation to stress environments. En: The global food&product chain- Dynamics, innovations, conflicts, strategies. Deutscher Tropentag, Hohenheim. October 11-13.

FAOSTAT. 2006. FAO Statistic Division. En: <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567>. Consultado en septiembre de 2006

FENALCE. 2006. Resumen de sensibilidades al TLC. Características generales por producto. En: <http://www.fenalce.org/datos/TLC/ImpactoSector/RiesgoFrenteTLC.doc>. Consultado en Septiembre/2006.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, MADR. 2006. Acuerdo de competitividad de la cadena de hortalizas. Observatorio Agrocadenas Colombia. 53 p. En: http://www.agrocadenas.gov.co/hortalizas/documentos/Acuerdo_competitividad_hortalizas.pdf. Consultado en septiembre/2006.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN SOBRE MODELACIÓN DE CULTIVOS, FUNDAMENTOS, APLICACIONES Y PROSPECTIVAS

2.1 Introducción

La necesidad de hacer predicciones y plantear hipótesis son parte integral del método científico (Lyons, 2004), y los modelos de simulación son herramientas que pueden contribuir a este propósito. La modelación puede entenderse como la aplicación de métodos para analizar problemas complejos del mundo real, de modo que sea posible predecir los resultados de diferentes acciones (Shiflet, 2006). La simulación es el resultado de aplicar el modelo bajo una condición particular nueva, para hacer una predicción del resultado que puede ser posteriormente validada con observaciones del mundo real.

La modelación del crecimiento de las plantas es importante para hacer predicciones acerca del momento de la cosecha, estimar la productividad de los cultivos, evaluar efecto del manejo del cultivo en el medio ambiente además de la sostenibilidad, viabilidad, y rentabilidad de diferentes alternativas en el uso de la tierra en sistemas de rotación de cultivos, entre otras aplicaciones.

Asociada con información georeferenciada, la utilización de los modelos de simulación de cultivos permite evaluar diferentes alternativas de uso del suelo, indispensable en los planes de ordenamiento territorial. Como afirmaron Whitman y Clymer (1996), un plan maestro de planeación de uso de la tierra debe partir de información básica sobre la disponibilidad de recursos e infraestructura, para diseñar diferentes alternativas que se puedan visualizar en mapas y evaluar por su impacto económico.

El plan de Ordenamiento Territorial Rural Sostenible es un proyecto regional de la FAO que incluye los países de América Latina y el Caribe, y culminó en éste año. Entre los puntos estratégicos, se contempló la evaluación de la prospectiva territorial, en la cual se reconoció el uso actual y potencial de la tierra y se propusieron nuevos escenarios sostenibles. Dentro de este marco, se creó el "Sistema de Información de Recursos de Tierras para la Planificación" (SIRTPLAN), el cual incluye en uno de sus componentes, el módulo GRIETA, que es un conjunto de programas integrados para hacer la simulación del crecimiento y la productividad de los cultivos y su impacto en la conservación del suelo (FAO, 2006; Castillo y González, 2006).

En Colombia, la Ley de Desarrollo Territorial (Ley 388 de 1997) contempla que los municipios deben formular y adoptar Planes de Ordenamiento del Territorio (POT), una de cuyas funciones es optimizar el uso de las tierras productivas disponibles (Forero, 2005). Aunque los modelos de simulación de cultivos pueden contribuir en forma importante en éste propósito, poco es el desarrollo del tema en nuestro país, y los modelos foráneos no pueden aplicarse sin hacer los ajustes necesarios para nuestras condiciones.

Poluektov y Topaj (2001) observaron que hay principalmente dos aproximaciones filosóficas para la representación de los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los agroecosistemas. Uno se llama teórico y otro empírico, pero también se utilizan los términos mecanicista y funcional, o biofísico y heurístico.

En el modelo empírico se encuentra un conjunto de ecuaciones heurísticas que describen el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Los parámetros de estas ecuaciones se determinan experimentalmente. Desafortunadamente, estos parámetros usualmente deben ser ajustados a las condiciones cambiantes del ambiente, y algunas interacciones se escapan a la capacidad del modelo para hacer predicciones precisas.

En la aproximación teórica, se hace una descripción del cultivo y la dinámica del ambiente para desarrollar un modelo matemático de acuerdo con los principios físicos, químicos y biológicos que soportan todos los procesos incluidos. Por ejemplo, las ecuaciones diferenciales aplicadas en física, derivan de consideraciones del balance de la energía y la materia para compartimentos funcionales o espacios de interés. Tales modelos pueden ser una herramienta para investigación científica. Una limitación al desarrollo de estos modelos es que la descripción a fondo de todos los procesos incluidos en el modelo, y su integración en un esquema complejo es un problema extremadamente difícil. Por lo tanto, un término medio se hace necesario.

A continuación se revisa brevemente los diferentes niveles de enfoque en el análisis del crecimiento de los cultivos, y en cada caso cómo se han abordado diferentes modelos cada vez más completos, para incluir los factores más importantes que inciden en la productividad de los cultivos. El enfoque de sistemas, el desarrollo modular, la combinación con herramientas de análisis espacial, son algunos elementos que le han dado a los modelos una mayor capacidad y proyección para hacer predicciones útiles en áreas extensas y largos periodos. Es por esto que este tema es de gran actualidad y los países en vías de desarrollo pueden sacar aún más provecho de éstas metodologías, en la medida en que optimizan la costosa información científica.

2.2 Aproximaciones a la dinámica del crecimiento

Las plantas, como organismos autótrofos, están en capacidad de utilizar la energía de la radiación solar para formar compuestos químicos, que a través de procesos metabólicos complejos, permiten la construcción de tejidos y órganos vegetales para su crecimiento y desarrollo. La dinámica del crecimiento ha sido analizada a diferentes niveles de detalle, como se revisa a continuación.

Un primer nivel de estudio, el crecimiento de las plantas se centra en el aumento de materia seca en el tiempo, y el análisis es descriptivo. En los cultivos anuales, la forma del crecimiento sigue la forma de una curva sigmoidea, y se pueden distinguir tres fases: una temprana o fase exponencial, una fase de crecimiento rápido, y una fase de maduración y senescencia (Goudriaan y Van Laar, 1995).

En el análisis del crecimiento de los cultivos, se utiliza el área foliar, como una medida de la magnitud del sistema asimilatorio, y la materia seca, como medida del material vegetal presente. Estas medidas aplicadas a los cultivos se deben referir respecto a una unidad de área de terreno. Por la dificultad para evaluar adecuadamente las raíces, el peso seco se aplica generalmente a la parte aérea de la planta. El índice de área foliar, la tasa de crecimiento del cultivo, la tasa de asimilación neta, la tasa de crecimiento relativo, son algunos índices que se construyeron para evaluar el crecimiento de los cultivos, y

constituyeron la primera aproximación matemática a la modelación. Desafortunadamente, los índices que combinan información de peso seco y el área foliar, como la tasa de asimilación neta, requieren para su integración en el tiempo de algún supuesto básico matemático de relación entre estas dos medidas, que no siempre se ha manejado adecuadamente entre los investigadores (Radford, 1967).

Éstos modelos no tienen en cuenta explícitamente los efectos del ambiente. Por lo tanto, las funciones son básicamente descriptivas y se ajustan a unas condiciones específicas, sin que se puedan extrapolar los resultados a otras condiciones (Marcelis *et al.*, 1998). Además, para la determinación de los valores de estos índices, se requieren muestreos destructivos secuenciales durante el ciclo del cultivo, lo cual no permite la obtención de curvas precisas que describan el crecimiento, y dificulta la demostración de diferencias entre tratamientos en el análisis estadístico (Poorter, 1989).

Sin embargo, los modelos descriptivos empíricos que se pueden expresar funcionalmente y derivar en el tiempo, son útiles en los modelos de simulación. Con ecuaciones diferenciales se pueden hacer ajustes del crecimiento vegetal conforme ocurren cambios temporales en el ambiente, si se utilizan factores de corrección adecuados.

Es por esto que la investigación en este sentido aún continúa. Yin *et al.* (2003) revisaron algunos de los modelos utilizados para representar la curva del crecimiento de los cultivos en biomasa a través del tiempo, entre los cuales citaron: expolineal, logística, Gompertz y Weibull. Propusieron utilizar la función beta, que permite incluir un parámetro relativo a la duración del ciclo de crecimiento y modelar el peso máximo final en cultivos de crecimiento determinado.

Fleisher y Timlin (2006) utilizaron la ecuación de Gompertz para ajustar el crecimiento en área de las hojas individuales de la papa en función del tiempo contado a partir del momento de aparición de la hoja. En esta ecuación se requieren tres parámetros: el área final de la hoja, la duración del crecimiento, y un coeficiente de decaimiento en la tasa de expansión foliar. Los parámetros del modelo se evaluaron para analizar el efecto de las condiciones de temperatura y concentración de CO₂ en el aire.

Ishag y Dennett (1998) utilizaron la ecuación expolineal para representar la curva de crecimiento en biomasa de los cultivos de haba (*Vicia faba* L.), arveja (*Pisum sativum* L.) y lentejas (*Lens culinaris* Medic.), cada uno a tres densidades de siembra y dos cultivares. La tasa máxima de crecimiento relativo R_m no difirió por efecto de la densidad, los cultivares o especies, pero sí entre los años de siembra. La función expolineal implica que el crecimiento inicial de un cultivo es exponencial, con una tasa relativa de crecimiento R_m . Más adelante, cuando el cultivo cubre el terreno completamente e intercepta toda la radiación incidente, el crecimiento es lineal con una tasa máxima de crecimiento del cultivo C_m .

2.3 Enfoque de sistemas dinámicos

La modelación de los cultivos para predecir su productividad, parte de la concepción del cultivo como un sistema donde diferentes entradas (energía, nutrientes, agua) generan un

resultado de interés (producción agrícola). Mucha de la investigación científica para resolver problemas coyunturales, reducen este sistema al mínimo con el fin de facilitar la obtención de respuestas. Sin embargo, la conveniencia de generar respuestas a condiciones cambiantes obliga la elaboración de modelos de mayor capacidad, lo cual permite utilizar información general de suelos y clima para zonas de interés. Además, la extensa información espacial que se genera hoy día con la ayuda de los sensores remotos, debe ser aprovechada para generar aplicaciones de utilidad en proyectos de uso de la tierra.

En un sistema agrícola, deben considerarse un conjunto mínimo de componentes que permitan explicar la productividad del cultivo. Aunque existe un gran número de factores que pueden afectar los rendimientos de un cultivo, no es práctico incluirlos en su totalidad. Usualmente, los modelos de cultivos parten de una base sencilla, en la cual sólo se consideran los efectos de la radiación solar y la temperatura como factores exógenos (Jones y Boote, 1987). Posteriormente se pueden incluir progresivamente más factores. Este modelo básico permite estimar la productividad potencial del cultivo, asumiendo que no existen limitaciones por agua, nutrientes o problemas de plagas, enfermedades, o arvenses.

En un modelo de productividad potencial, son comunes algunos componentes como: el nivel de interceptación de luz por el dosel de las plantas, tasa de formación de asimilados por efecto de la fotosíntesis, distribución de los asimilados entre los distintos órganos vegetales, y desarrollo fenológico del cultivo. A continuación se revisan brevemente cada uno de estos componentes.

2.3.1 Interceptación de luz

Bokhove *et al.* (2002) propusieron un modelo para el crecimiento del cultivo de rosa, en el cual se consideraron dos niveles de análisis: la hoja y el dosel. A nivel de la hoja, dado un nivel de radiación incidente, se evaluó el efecto de la temperatura, concentración de CO₂, conductancia de los estomas, entre otros factores. A nivel del dosel se evaluó la interceptación y transmisión de la radiación solar en el rango fotosintéticamente activo (PAR).

A nivel del dosel de los cultivos, la interceptación de luz guarda relación directa con el área foliar en las primeras fases de desarrollo. Con algunos supuestos simples de la ley de Beer-Lambert para la transmisión de luz en soluciones, Monsi y Saeki (1953) propusieron la ley de decaimiento exponencial para calcular la cantidad de luz interceptada por el dosel vegetal, de la forma:

$$I/I_0 = e^{-k \cdot L} \quad (3.1)$$

Donde k es el coeficiente de extinción, I es la radiación al nivel del dosel L , e I_0 es la radiación al nivel 0 por encima del dosel. Los valores típicos de k están entre 0,5 y 0,8 (Marcelis *et al.*, 1998). Se asume que las hojas se distribuyen al azar en el espacio y se comportan como objetos negros, que no reflejan ni transmiten luz.

Sin embargo, dos cultivos con el mismo desarrollo de área foliar pueden tener arreglos geométricos de dosel muy diferentes, lo cual altera directamente la capacidad de

interceptación de luz. Para corregir y mejorar el modelo, Foroutan-pour *et al.* (2001) propusieron incluir la dimensión fractal a la ley de Beer-Lambert, lo cual resultó útil para mejorar la estimación de la cantidad de luz interceptada por el cultivo en estados tempranos de desarrollo.

Según Wang (2001) la cantidad de radiación absorbida por el dosel de las plantas depende de la cantidad de radiación incidente y la proporción de radiación directa y difusa, la estructura del dosel, y las propiedades ópticas de los elementos vegetales y la superficie del suelo subyacente. Él argumentó que es conveniente distinguir entre la interceptación y la absorción de luz, y que el modelo de Goudriaan que divide la luz entre la directa y la dispersada por el dosel es una aproximación más apropiada para calcular la luz absorbida por la planta, respecto al modelo de Beer-Lambert, especialmente para la región infrarrojo cercano. El efecto de la dispersión de la luz en el dosel por la reflectancia de las hojas es el de disminuir el coeficiente de extinción.

Los métodos de análisis del dosel de las plantas en tres dimensiones (3D) se han desarrollado recientemente, a partir de modelos teóricos digitalizados (Ustin *et al.*, 2001), o de imágenes digitalizadas de plantas (Sinoquet *et al.*, 1998). La ventaja de esta aproximación, es que permite determinar la forma como se particiona la luz interceptada en los diferentes componentes del dosel: entre tipos de hojas (por ejemplo, del tallo principal o las ramas), o entre plantas diferentes (cultivo y arvenses o entre especies en cultivos múltiples) (Sinoquet *et al.*, 1998).

2.3.2 Formación de asimilados

Los modelos explicativos del crecimiento se centran en los procesos fotosintéticos en la medida en que generan la biomasa del cultivo. Según Farquhar *et al.* (1980), la asimilación en plantas C3 bajo un conjunto dado de condiciones, está constreñida por tres procesos limitantes: 1) la tasa máxima de carboxilación catalizada por la rubisco (ribulosa 1-5 bisfosfato carboxilasa/oxigenasa), 2) la tasa de regeneración de la RuBP (ribulosa 1-5 bisfosfato) que depende de la tasa de transporte de electrones, y 3) la regeneración de RuBP determinada por la tasa de utilización de la triosa-fosfato. Los dos primeros procesos están regulados por condiciones del medio ambiente, como la temperatura y la intensidad luminosa, respectivamente. Aunque este modelo se planteó bajo condiciones *in vitro*, se han hecho ajustes para su implementación bajo condiciones *in vivo* (Bernacchi *et al.*, 2001), que consisten especialmente en mejorar la estimación de la temperatura para la fotosíntesis a nivel foliar dentro del dosel.

2.3.3 Distribución de asimilados

Se han propuesto varios modelos, con diferente grado de complejidad, para describir las formas como se utilizan los asimilados en la planta, ya sea para formar nuevos órganos, o para cubrir diferentes rutas metabólicas.

La asignación de asimilados comúnmente se refiere a la distribución de carbono entre los órganos de la planta (hojas, tallos, raíces, etc.). Sin embargo, el término también se aplica a categorías funcionales dentro de los órganos, como defensa, daño, reparación y

almacenamiento. También se aplica a las raíces en cuanto al consumo de carbono para respiración de mantenimiento y toma de nutrientes. En contraste, el particionamiento de C es el proceso de flujo del carbono entre las diferentes fracciones químicas (moléculas diferentes, o centros de almacenamiento y transporte) (Friend *et al.*, 1994).

Cuando se evalúa la distribución entre la raíz y la parte aérea de la planta, se plantean por lo menos tres posibilidades: el crecimiento balanceado, la asignación alométrica, y la relación fuente-vertedero. A continuación se describen estos enfoques.

En la hipótesis de crecimiento balanceado, la asignación de biomasa para una condición dada se hace con preferencia al órgano que debe utilizar el recurso más escaso o limitado para la planta. Si la luz es el factor más limitante para el crecimiento de la planta, la asignación de biomasa se hará con prioridad para el desarrollo de hojas. Si el agua o los nutrientes del suelo son limitantes, se favorecerá el desarrollo de las raíces. Recientemente, ésta hipótesis fue evaluada con éxito por Shipley y Meziane (2002), en un experimento con 22 especies herbáceas que crecieron en diferentes condiciones de concentración de nutrientes a partir de la solución hidropónica de Hoagland, con diferentes niveles de radiación fotosintéticamente activa (200 a 1100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

Müller *et al.* (2000), con base en un experimento de 27 especies herbáceas, sugirieron que en vez de la asignación flexible en respuesta a la disponibilidad de los recursos de diferente tipo que propone la hipótesis del crecimiento balanceado, existen estrategias alométricas que asignan biomasa a las hojas más que a la raíz en forma proporcional con el transcurso del desarrollo, según su composición química y funcionalidad metabólica.

Para los cultivos que crecen indeterminadamente (como la arveja, pimiento dulce, tomate, etc.), la distribución de la materia seca puede cambiar dinámicamente. En este caso, la distribución basada en la fuerza del órgano vertedero, de acuerdo con la cual, cada órgano tiene una capacidad competitiva para atraer asimilados, parece ser una aproximación más adecuada. La capacidad de competir por asimilados se puede cuantificar por la tasa de crecimiento potencial, bajo condiciones de suministro ilimitado de asimilados. Este enfoque fue validado para tomate por Heuvelink (1996) con seis experimentos bajo invernadero.

2.3.4 Desarrollo fenológico

Para cumplir con sus funciones biológicas básicas, las plantas pasan por diferentes etapas de desarrollo, que se pueden demarcar por la ocurrencia de algunos eventos fenológicos. En este sentido, algunas escalas fenológicas utilizan características que pueden ser fácilmente observables en el campo. La emergencia de las plantas, aparición de nudos en el tallo, el momento de aparición de la primera flor, el primer fruto y la madurez, son algunos eventos fenológicos de los cultivos. La determinación del momento de ocurrencia de los estados fenológicos de los cultivos tiene importancia para la programación de prácticas agrícolas.

Jones *et al.* (1991) llamaron a estos eventos fenológicos “estados” y al tiempo transcurrido entre ellos como “fases”. Ellos propusieron un modelo de desarrollo fenológico para el cultivo de soya [*Glycine max* (L.) Merr.].

El tiempo que transcurre entre la formación de dos hojas sucesivas en una misma planta, se denomina filocrón (Rickman y Klepper, 1995). Este tiempo se puede medir en días calendario o en grados día. Cuando se expresa en función de la temperatura, se puede observar la consistencia del filocrón para las diferentes estaciones del año en las zonas templadas subtropicales.

Los grados día son una forma de medir el efecto de la temperatura en el desarrollo de los seres vivos. Cuando la temperatura es ideal para un determinado organismo, la duración de las fases de desarrollo es mínima. Temperaturas por encima o debajo del punto o rango óptimo, hace aumentar la duración de cada fase cuando se expresa en días calendario. La aplicación de este concepto permite estimar la duración de las fases fenológicas de los cultivos frente a condiciones cambiantes de la temperatura (Miller *et al.*, 2001).

Además de la temperatura, la duración del fotoperiodo afecta el desarrollo fenológico de algunas especies vegetales y genotipos. Para las zonas templadas, este fenómeno es muy importante para la definición del inicio de la floración en plantas sensibles, y con este fin, se trabaja la relación fototermal, que combina la duración de la luz y el tiempo térmico.

En el modelo de soya SOYGRO (Jones *et al.*, 1991), el cálculo de la tasa de desarrollo en las fases de crecimiento reproductivo se hace en función de la temperatura y la duración de la noche, de la forma:

$$R(t) = F_r(T) \times F(N)$$

Donde $R(t)$ es la tasa de desarrollo en el día t , $F_r(T)$ es la función de temperatura para las fases sensibles tanto a la temperatura como el fotoperiodo, y $F(N)$ es la función de la duración de la noche. No sólo la floración puede afectarse por el fotoperiodo, sino también la formación del fruto e incluso la tasa de llenado del grano en soya (Jones *et al.*, 1991).

2.4 Niveles de enfoque

Según Goudrian y Van Laar (1994) se pueden distinguir tres niveles de productividad:

- 1 Productividad potencial, definida únicamente por factores de temperatura y radiación solar
- 2 Productividad alcanzable, por debajo de la potencial, limitada por la disponibilidad de agua y nutrientes
- 3 Productividad final, por debajo del nivel alcanzable, reducida por factores bióticos como las arvenses, plagas y enfermedades.

Según Kadaja y Tooming (2004), se pueden distinguir cuatro modelos de rendimiento como referencia: potencial (incluyendo las propiedades biológicas y la radiación solar), meteorológicamente posible, técnicamente posible (de acuerdo con la fertilidad del suelo) y comercial. Ellos utilizaron el modelo POMOD para estimar el rendimiento potencial y meteorológicamente posible para el cultivo de papa.

Lo importante del concepto es que la modelación se realice por etapas, avanzando de niveles sencillos a complejos, de modo que contenga buenos cimientos. Esto es muy importante para el ajuste y validación del modelo, el cual también se debe hacer para cada etapa, antes de proceder a la siguiente.

2.5 Principios generales de modelación

Algunos principios generales para la generación de modelos son importantes desde el punto de vista práctico, para evitar desgaste, economizar recursos, facilitar ajustes y correcciones, y promover las aplicaciones. Ridge y Cox (1996) proponen los siguientes principios:

Simplicidad: Entre un conjunto de modelos que permiten predecir el comportamiento del cultivo con un nivel de precisión dado, se escoge el más sencillo de ellos. En ocasiones una mayor complejidad se justifica cuando se requiere imprimir un carácter explicativo al modelo, de acuerdo con los objetivos de investigación. De otra forma, la complejidad se justifica sólo para mejorar la precisión del modelo.

Precisión: la precisión se refiere al acuerdo que debe haber entre la predicción hecha por el modelo y la observación de campo. El nivel de precisión que se puede exigir de un modelo depende de la profundidad del conocimiento de los fenómenos implicados. Sin embargo, todo esto implica una mayor cantidad de datos y observaciones, y solo se justifica en la medida en que se traduzca en un mejor dominio del fenómeno para lograr los resultados propuestos.

Comprensión: el modelo debe incluir componentes importantes del sistema natural y sus relaciones. De esta forma el modelo puede ser mejorado gradualmente con una mayor comprensión de los fenómenos, y se aumentan las posibilidades de manejar los efectos para producir los resultados propuestos.

2.6 Desarrollo modular

La adición de nuevos módulos a los modelos, permite extender el cubrimiento a nuevos factores (genotipos, ambientes, formas de manejo agronómico, etc.) y aumentar la precisión de las predicciones. Esto se hace a costo de una mayor complejidad del modelo. A continuación se mencionan algunos ejemplos en este sentido.

Gijsman *et al.* (2002) incorporaron a los modelos de simulación de cultivos DSSAT un módulo que permite analizar los aportes de nutrientes provenientes de residuos de materia orgánica, lo cual mejoró el desempeño de las simulaciones especialmente en sistemas donde se usan pocos insumos y se requieren análisis de sostenibilidad a largo plazo.

Berntsen *et al.* (2004) desarrollaron un subsistema para incluir en el modelo de manejo de fincas FASSET (Farm ASSEsment Tool) que manejara la competencia entre diferentes especies por agua y nutrientes. El nuevo modelo fue probado con un cultivo intercalado de arveja y cebada (*Hordeum vulgare* L.) con resultados satisfactorios.

Basado en la familia de modelos CERES, Kovács (2005) con su equipo de colaboradores desarrolló el modelo sistémico 4M, para seleccionar la hipótesis más adecuada que explicara la pérdida de productividad del cultivo de maíz después de periodos de intensa lluvia. El modelo CERES fue mejorado por su capacidad para estimar en forma más precisa la cantidad de nitrógeno del suelo disponible para las raíces, utilizando el concepto de flujo de masas. De esta forma se explicó la baja productividad como resultado del lavado de N en el suelo.

Lizaso *et al.* (2005) tomaron como base el modelo de maíz (*Zea mays* L.) CERES-Maize v.3.7, para desarrollar un nuevo modelo que denominaron CERES-PR. En el modelo original, la tasa de crecimiento se calcula con base en la interceptación de luz y la eficiencia de uso de la radiación. En el modelo mejorado, se analizaron los aportes de la fotosíntesis y las pérdidas en biomasa por respiración, con el fin de simular mejor el efecto de las condiciones de estrés.

Con base en el modelo SUCROS, Aggarwal *et al.* (2006a) desarrollaron INFOCROP, un modelo de cultivos genérico y dinámico, que permite evaluar, además del efecto del clima, genotipo vegetal, tipo de suelos y prácticas de manejo, el impacto de plagas (insectos y enfermedades) sobre el crecimiento y producción de los cultivos. El modelo hace el balance de nitrógeno (mineralización, toma por las raíces, nitrificación, volatilización, movimiento entre capas, denitrificación, lavado) y determina la dinámica del carbón orgánico en el suelo (mineralización e inmovilización). Fue evaluado en trigo y arroz en diferentes ambientes del trópico, con resultados satisfactorios (Aggarwal *et al.*, 2006b).

Fleisher y Timlin (2006) desarrollaron un modelo para simular la expansión foliar de hojas individuales de la papa (*Solanum tuberosum* cultivar Kennebec) e incorporarlo en el modelo POTATO. La expansión foliar fue sensible a la temperatura del aire y la concentración de CO₂ en la atmósfera. La duración del crecimiento en expansión de la hoja se correlacionó negativamente con el aumento de la temperatura

Yang *et al.* (2004) desarrollaron el modelo de simulación para maíz llamado Hybrid-Maize, con base en el modelo CERES-Maize, que utiliza funciones de crecimiento y desarrollo, y los modelos genéricos de formulación mecanicista de la fotosíntesis y respiración. De esta forma el modelo supera las capacidades de CERES-Maize para responder a cambios en el medio ambiente.

Yu *et al.* (2006) calibraron y validaron el modelo RZWQM (Root Zone Water Quality Model) que se desarrolló con base en el modelo CERES, para predecir el comportamiento de los cultivos de trigo y maíz. El modelo RZWQM, como su nombre lo indica, está especializado para analizar el balance hídrico y los contenidos de nitrógeno en el suelo. De los dos modelos se desarrolló un híbrido RZWQM-CERES.

Hartkamp *et al.* (2002) adaptaron el modelo de crecimiento vegetal genérico para leguminosas, CROPGRO, para el frijol terciopelo (*Mucuna pruriens* (L.) DC cultivar Grupo *utilis*). Inicialmente se utilizaron los coeficientes para describir el crecimiento y desarrollo de la soya (*Glycine max* (L.) Merr.). Una vez desarrollado el modelo con los

coeficientes propios para la especie de interés, el modelo se incorporó a DSSAT versión 3.5.

Franko y Mirschel (2001) integraron los modelos AGROSIM-ZR [AGROecosystem SIMulation-sugarbeet (ZR)] para la remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L.) con el modelo CANDY (CARbon and Nitrogen DYnamics) para los procesos del suelo en tierras de dedicación agrícola. Ellos declararon que la aplicación de tales modelos requerían la existencia de información básica de clima y suelo, no sólo a nivel de finca, sino también a nivel de paisaje. En este sentido, los sistemas de información geográfica pueden proveer la estructura requerida.

2.7 Aplicaciones

Los modelos de simulación en agricultura se han desarrollado con diversos propósitos, y han demostrado ser una primera aproximación útil para la predicción de fenómenos de los cuales es imposible obtener datos experimentales a corto plazo. También para hacer extrapolaciones útiles a extensas zonas de producción donde sólo se dispone de información de clima y suelos.

Por lo menos se pueden observar dos tipos de usuarios de los modelos de simulación. Uno, interesado en resolver problemas específicos de producción a nivel local, para lo cual puede diseñar diferentes tratamientos y realizar muchas replicaciones para obtener resultados que puedan ser analizados desde diferentes enfoques, incluyendo el económico (Thornton y Hoogenboom, 1994). Otro, interesado en el análisis de sostenibilidad e impacto ambiental, que utiliza los modelos para generar proyecciones a largo plazo de estrategias de manejo del suelo en rotaciones de cultivos (Thornton *et al.*, 1995).

Como afirma Sirotenko (2001), el desarrollo futuro de los modelos depende de la integración de diferentes componentes, básicamente los modelos de fertilidad con los de producción de los cultivos, de modo que sea posible proyectarse una o dos décadas adelante sobre el impacto de diferentes formas de manejo agronómico, estrategias en la aplicación de agroquímicos, detrimento del suelo, todo ello teniendo en cuenta los cambios a futuro del clima y la composición química de la atmósfera.

Bowen *et al.* (1993) afirmaron que el uso de la simulación con modelos de cultivos es una herramienta poderosa para evaluar el manejo sostenible del suelo. Puesto que no existe una fórmula única que garantice el manejo sostenible de la tierra para todos los ambientes, los modelos de simulación ofrecen un medio efectivo para integrar la complejidad de los sistemas agrícolas para evaluar diferentes alternativas en cuanto a prácticas de manejo en sitios específicos.

Sadras y Monzón (2006) utilizaron los modelos APSIM y CERES-Wheat para evaluar el efecto del aumento global de la temperatura en el desarrollo fenológico del trigo, con datos provenientes de Argentina y Australia. Observaron que con un aumento mínimo de temperatura (0,02 °C/año) se producía una reducción significativa del tiempo que tardó el cultivo en florecer. Además, pudieron confirmar que los modelos hacían una estimación

precisa de la tasa de cambio del tiempo de siembra a floración con respecto a las observaciones de campo, que fue de aproximadamente $7 \text{ d } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Yu *et al.* (2002) observaron por medio de simulaciones que el aumento de las condiciones tales como: la concentración de CO_2 atmosférico, la cantidad de precipitación, y la temperatura con y sin fijación de nitrógeno, aumentaban la biomasa del cultivo de soya (*Glycine max* L.). De esta forma obtuvieron una aproximación al efecto del cambio climático, que de modo experimental hubiera resultado muy difícil.

Para la estimación espacial del rendimiento de los cultivos en función de las propiedades del suelo y la topografía, se han utilizado métodos de regresión no paramétrica y redes neuronales. Sin embargo, la capacidad de predicción de estos modelos no es adecuada dada la variabilidad climática y las predicciones del futuro. Resulta mejor para éste propósito utilizar los modelos de simulación de cultivos integrados con modelos hidrológicos que permitan reconocer los flujos de agua en el campo, especialmente en suelos de topografía variable (Sudduth *et al.*, 1998). Esto permite a la vez, potenciar el uso de los modelos de cultivos en agricultura de precisión.

Las estimaciones de productividad de los cultivos son importantes para determinar por adelantado los volúmenes de producción por zonas, de modo que se prevean las medidas necesarias para manejar la abundancia o escasez de los productos agrícolas para un periodo determinado. Con el uso de imágenes satelitales, Báez-González *et al.* (2002 y 2005) estimaron el IAF de los cultivos de maíz para predecir con base en un modelo sencillo la productividad bajo condiciones de riego en extensas áreas de Sinaloa, México, y lo compararon con los resultados del modelo basados en las mediciones en tierra del IAF máximo. La producción de grano se predijo con un error medio de $-9,2\%$ con las mediciones en campo, y con $-11,2\%$ con las imágenes satelitales. En conclusión, la predicción de la productividad con base en el máximo IAF medido en tierra tuvo un error medio absoluto de $1,2 \text{ Mg ha}^{-1}$, y con el IAF satelital, el error aumentó en $0,3 \text{ Mg ha}^{-1}$, lo cual se compensa con la eliminación del trabajo laborioso que implica medir en campo el IAF del cultivo.

2.8 Perspectivas

Después de una proliferación de modelos de cultivos, se hacen necesarios esfuerzos de integración y unificación, hasta donde lo permiten los objetivos de investigación de las diferentes organizaciones que poseen el mayor desarrollo del tema. A la vez, se observa la necesidad desarrollar sistemas amigables para facilitar la difusión y uso de los modelos, no sólo al nivel técnico, sino también educativo y administrativo, incluyendo desde los organismos políticos relacionados hasta el productor agrícola a nivel de finca.

En el CIAT (Chartres *et al.*, 2003), se llevó a cabo el proyecto de uso de la tierra (LUP), en el cual se propuso que el desarrollo de nuevos modelos de cultivos se hiciera en respuesta a la demanda o a una clara necesidad. La sugerencia fue enfocar la modelación al desarrollo de una herramienta para uso de investigadores y usuarios finales. Además, se le dio énfasis al uso de las técnicas del SIG y el análisis espacial, para permitir el desarrollo de aplicaciones que resolvieran problemas clave de la agricultura.

El desarrollo de modelos continúa regularmente, y algunos sistemas permiten integrar muchos de ellos, a menudo con una base común que permite manejar diferentes cultivos ajustando algunos parámetros básicos. Es el caso de STICS (Brisson *et al.*, 2003), EPIC (Williams *et al.* 1989), DSSAT, CROPSYST (Stöckle *et al.* 2003), INFOCROP (Aggarwal *et al.*, 2006a y b), entre otros.

Los modelos de simulación se deben integrar en sistemas para el soporte en la toma de decisiones (DSS, Decisional Support Systems). Los modelos de investigación deben constituir la base de modelos políticos para la administración adecuada de recursos (Oxley *et al.*, 2004), con la evaluación de diferentes alternativas de manejo en la búsqueda de sostenibilidad y desarrollo productivo.

En general, como afirman Mavromatis *et al.* (2001) el uso de los modelos de cultivos en herramientas para la transferencia de tecnología y el soporte en la toma de decisiones requiere que los coeficientes que describen los nuevos cultivares estén disponibles tan pronto como la semilla correspondiente esté presente en el mercado. Por eso, ellos desarrollaron un método para estimar los coeficientes genéticos de cultivares de soya para el modelo de simulación CROPGRO-Soybean a partir de las pruebas de desempeño del cultivo.

Como afirmaron Hammer *et al.* (2002), entre las oportunidades que se proyectan en el desarrollo de modelos para la agricultura, están: apoyar la investigación científica, facilitar la toma de decisiones por los administradores agrícolas, ayudar a la educación. Pero además, el análisis fisiológico y la modelación de rasgos genéticos proveen una avenida por la cual la modelación de cultivos puede contribuir a una mayor integración de las tecnologías de la genética molecular en el mejoramiento de los cultivos. En este sentido, ya existen algunos desarrollos, como el modelo GENEGRO (Hoogenboom y White, 2003, Hoogenboom *et al.*, 2004).

2.9 Literatura citada

Aggarwal, P.K., N. Kalra, S. Chander y H. Pathak. 2006a. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. I. Model description. *Agricultural Systems* 89: 1–25.

Aggarwal, P.K., B. Banerjee, M.G. Daryaei, A. Bhatia, A. Bala, S. Rani, S. Chander, H. Pathak y N. Kalra. 2006b. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. II. Performance of the model. *Agricultural Systems* 89: 47–67.

Báez-González, A.D., J.R. Kiniry, S.J. Maas, M. Tiscareno, J. Macías, J.L. Mendoza, C.W. Richardson, J. Salinas y J.R. Manjarrez. 2005. Large-area maize yield forecasting using leaf area index based yield model. *Agronomy Journal* 97:418–425.

Báez-González, A.D., P. Chen, M. Tiscareño-López y R. Srinivasan. 2002. Using satellite and field data with crop growth modeling to monitor and estimate corn yield in Mexico. *Crop Science* 42:1943–1949.

Bernacchi, C.J., E.L. Singsaas, C. Pimentel, A.R. Portis JR y S.P. Long. 2001. Improved temperature response functions for models of Rubisco-limited photosynthesis. *Plant, Cell and Environment* 24:253-259.

Berntsen, J., H. Hauggard-Nielsen, J.E. Olsen, B.M. Petersen, E.S. Jensen y A. Thomsen, 2004. Modelling dry matter production and resource use in intercrops of pea and barley. *Field Crops Research* 88: 69–83.

Bokhove, O., J. Dubbeldam, P. Getto, B. 't Hof van, N. Ovenden, D. Pik, G. Prokert, V. Rottschäfer y D. Sar van der. 2002. Roses are unselfish: a greenhouse growth model to predict harvest. En: Ed.: Hek, G.M. (ed.). *Proceedings of the forty-second European Study Group with Industry*. pp. 59-76.

Bowen, W.T., J.W. Jones y P.K. Thornton. 1993. Crop simulation as a potential tool for evaluating sustainable land management. En: Kimble, J.M. (ed.). *Proceedings of the Eighth International Soil Management Workshop: Utilization of soil survey information for sustainable land use*. Soil Conservation Service, USDA. pp.15-21.

Brisson, N. C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche, D. Zimmer, J. Sierra, P. Bertuzzi, P. Burger, F. Bussière, Y.M. Cabidoche, P. Cellier, P. Debaeke, J.P. Gaudill re, C. H nault, F. Maraux, B. Seguin y H. Sinoquet. 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy* 18: 309-332.

Castillo B,E. y N. González L. 2006. Ordenamiento territorial, una herramienta para el desarrollo rural sostenible; experiencias y aprendizajes. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Informe Técnico No.1. 52 p.

Chartres, C., T. Veldkamp y R. Matthews. 2003. Center-Commissioned External Review of spatial analysis at the International Center for Tropical Agriculture (CIAT). Informe final. En: gisweb.ciat.cgiar.org/Sig/download/CCER_Final_Report2003_CIAT.pdf. Consultado en septiembre de 2006.

FAO, 2006. Ordenamiento territorial y competitividad rural. Proyecto Regional Ordenamiento Territorial Rural Sostenible. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. III Taller Regional de FAO, Montevideo, Uruguay, 31 de marzo.

Farquhar G.D., S. von Caemmerer y J.A. Berry. 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 149: 78-90

Fleisher, D.H. y D.J. Timlin. 2006. Modeling expansion of individual leaves in the potato canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* (en impresión).

Forero R., S.C. 2005. Desarrollo territorial, ambiente y ruralidad en Colombia: situación actual y avance de la política para regiones. En: II Taller Regional de FAO Ordenamiento territorial y desarrollo rural. Informe País Colombia. Santiago de Chile, octubre.

Foroutan-pour, K. P. Dutilleul y D.L. Smith. 2001. Inclusion of the Fractal Dimension of Leafless Plant Structure in the Beer-Lambert Law. *Agronomy Journal* 93: 333-338.

Franko, U. y W. Mirschel. 2001. Integration of a crop growth model with a model of soil dynamics. *Agronomy Journal* 93:666-670.

Friend, A.L., M.D. Coleman y J.G. Isebrands. 1994. Carbon allocation to root and shoot systems of woody plants. En: Davis. T.D. y B.E. Haissig (ed.). *Biology of Adventitious Root Formation*. Plenum Press. New York.

Gijsman, A.J., G. Hoogenboom, W.J. Parton y P.C. Kerridge. 2002. Modifying DSSAT crop models for low-input agricultural systems using a soil organic matter-residue module from CENTURY. *Agronomy Journal* 94:462-474.

Goudriaan J.Y., H.H. Van Laar. 1995. *Modelling Potential Growth Processes*. Textbook with exercises. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. 238 p.

Hammer, G.L., M.J. Kropff, T.R. Sinclair y J.R. Porter. 2002. Future contributions of crop modelling*/from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement. *European Journal of Agronomy* 18:15-31.

Hartkamp, A.D., G. Hoogenboom y J.W. White. 2002. Adaptation of the CROPGRO growth model to velvet bean (*Mucuna pruriens*) I. Model development. *Field Crops Research* 78: 9-25.

Heuvelink, E. 1996. Dry Matter Partitioning in Tomato: Validation of a Dynamic Simulation Model. *Annals of Botany* 77: 71-80.

Hoogenboom, G. y J.W. White. 2003. Improving physiological assumptions of simulation models by using gene-based approaches. *Agronomy Journal* 95:82-89.

Hoogenboom, G., J.W. White y C.D. Messina. 2004. From genome to crop: integration through simulation modeling. *Field Crops Research* 90:145-163.

Ishag, K.H. y M.D. Dennett. 1998. Use of the expolinear growth model to analyse the growth of faba bean, peas and lentils at three densities: fitting the model. *Annals of Botany* 82: 497-505.

Jones, J.W. y K.J. Boote. 1987. Concepts of crop systems. En: *Simulation models for soybeans and other crops*. ASPAC, Food&Fertilizer Technology Center, China. Technical Bulletin no. 106: 1-7.

Jones, J.W., K.J. Boote, S.S. Jagtap y J.W. Mishoe. 1991. Soybean development. En: Modeling plant and soil systems. Agronomy Monograph no. 31. ASA-CSSA-SSSA, USA. Capítulo 5.

Kadaja, J., H. Tooming. 2004. Potato production model based on principle of maximum plant productivity. *Agricultural and Forest Meteorology* 127:17–33.

Kovács, G.J. 2005. Modelling of adaptation processes of crops to water and nitrogen stress. *Physics and Chemistry of the Earth* 30: 209–216.

Lizaso, J.I., W.D. Batchelor, K.J. Boote, M.E. Westgate, P. Rochette y A. Moreno-Sotomayor. 2005. Evaluating a Leaf-Level Canopy Assimilation Model Linked to CERES-Maize. *Agronomy Journal* 97: 722-733.

Lyons, S.W. 2004. The scientific method. Education Resource Group. En: <http://www.lessonplans.com/scientificmethod.pdf>. Consultado en septiembre/2006.

Marcelis, L.F., E. Heuvelink y J. Goudriaan, 1998. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae* 74:83-111.

Mavromatis, T., K.J. Boote, J.W. Jones, A. Irmak, D. Shinde y G. Hoogenboom. 2001. Developing genetic coefficients for crop simulation models with data from crop performance trials. *Crop Science* 41:40–51.

Miller, P., W. Lanier y S. Brandt. 2001. Using Growing Degree Days to Predict Plant Stages. Montana State University, USA. Extension Service.

Monsi, M. y T. Saeki. 1953. Uber den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und sein bedeutung fur die stoffproduktion. *Japan Journal of Botany* 14:22-52.

Müller, I., B. Schmid y J. Weiner. 2000. The effect of nutrient availability on biomass allocation patterns in 27 species of herbaceous plants. *Perspective in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 3: 115-127.

Oxley, T., B.S. McIntosh, N. Winder, M. Mulligan y G. Engelen. 2004. Integrated modelling and decision-support tools: a Mediterranean example. *Environmental Modelling & Software* 19: 999–1010.

Poorter, H., 1989. Plant growth analysis: towards a synthesis of the classical and the functional approach. *Physiologia Plantarum* 75:237-244.

Poluektov, R.A. y A.G. Topaj. 2001. Crop modeling: nostalgia about present or reminiscence about future. *Agronomy Journal* 93: 653–659.

Radfor, P.J. 1967. Growth Analysis Formulae – their use and abuse. *Crop Science* 7: 171-175.

Rickman, R.W. y B.L. Klepper. 1995. The phyllochron: Where do we go in the future?. *Crop Science* 35:44-49.

Ridge, P.E. y P.G. Cox. 1996. Models and decision support: bridging the model gap. *Memorias de la 8ª Conferencia Australiana de Agronomía, Toowoomba, Australia*. En <http://www.regional.org.au/au/asa/1996>. Consultado en septiembre de 2006.

Sadras, V.O., J.P. Monzón. 2006. Modelled wheat phenology captures rising temperature trends: Shortened time to flowering and maturity in Australia and Argentina. *Field Crops Research* 99: 136–146.

Shiflet, A. 2006. The modelling process. *Computational Science Scientific Programming*. En: <http://wofford-ecs.org/ScientificProgramming/>. Consultado en septiembre/2006.

Shipley B. y D. Meziane. 2002. The balanced-growth hypothesis and the allometry of leaf and root biomass allocation. *Functional Ecology* 16:326-331.

Sinoquet, H., S. Thanisawanyangkura, H. Mabrouk y P. Kasemsap. 1998. Characterization of the light environment in canopies using 3D digitising and image processing. *Annals of Botany* 82: 203-212.

Sirotenko, O.D. 2001. Crop modelling: advances and problems. *Agronomy Journal* 93:650-653.

Stöckle, C.O., M. Donatelli y R.L. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18: 289-307.

Sudduth, K.A., C.W. Fraisse, S.T. Drummond, N.R. Kitchen. 1998. Integrating spatial data collection, modelling and analysis for precision agriculture. En: *First International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, Lake Buena Vista, Florida, 1-3 June*.

Thornton, P.K. y G. Hoogenboom. 1994. A computer program to analyze single-season crop model outputs. *Agronomy Journal* 86: 860-868.

Thornton, P.K., G. Hoogenboom, P.W. Wilkens y W.T. Bowen. 1995. A computer program to analyze multiple-season crop model outputs. *Agronomy Journal* 87: 131-136.

Ustin, S.L., S. Jacquemoud y Y. Govaerts. 2001. Simulation of photon transport in a three-dimensional leaf: implications for photosynthesis. *Plant, Cell and Environment* 24: 1095–1103.

Wang, Y.P. 2001. Modelling radiation absorption by plant canopies. En: *Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting. Memorias del Net Ecosystem Exchange Workshop, Australia, 18-20 abril*.

Whitman, C.T. y B.W. Clymer, 1996. Using the OSP growth simulation model. OSPlanning Memo Vol. II No. 2. Department of the Treasury, New Jersey, USA.

Williams, J.R., C.A. Jones, J.R. Kiniry y D.A. Spanel. 1989. The EPIC crop growth model. Transactions of the ASAE 32: 497-511.

Yang, H.S., A. Dobermann, J.L. Lindquist, D.T. Walters, T.J. Arkebauer y K.G. Cassman. 2004. Hybrid-maize—a maize simulation model that combines two crop modeling approaches. Field Crops Research 87:131–154.

Yin, X., J. Goudriaan, E.A. Lantinga, J. Vos y H.J. Spiertz. 2003. A flexible sigmoid function of determinate growth. Annals of Botany 91: 361-371.

Yu, Q., S.A. Saseendran, L. Ma, G.N. Flerchinger, T.R. Green, y L.R. Ahuja. 2006. Modeling a wheat–maize double cropping system in China using two plant growth modules in RZWQM. Agricultural Systems 89: 457–477.

CAPÍTULO 3. IMPORTANCIA DEL CULTIVO DE ARVEJA

3.1 La planta

La arveja (*Pisum sativum* L.) es una planta anual, herbácea, rastrera o trepadora. El tallo es hueco y ligeramente estriado, glauco y de color verde claro. La raíz es pivotante y puede profundizar hasta 1 m aproximadamente, con ramificaciones secundarias y terciarias y sobrecrecimientos llamados nódulos, estructuras que en un interior poseen bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico. Las hojas son compuestas imparipinnadas. Los dos primeros nudos que aparecen en el tallo llevan hojas rudimentarias a manera de escamas o brácteas trifidas. Los folíolos son de forma elíptica y bordes ondulados. Las estípulas, más grandes que los folíolos, se insertan en la base del pecíolo de cada hoja. Los folíolos terminales y algunas veces los subterminales de las hojas superiores están modificados en zarcillos persistentes (Arjona *et al.*, 1977).

Las raíces de la arveja desarrollan cavidades lisígenas en el centro de los cilindros vasculares bajo condiciones de alta temperatura (25 °C), lo cual se debe aparentemente a la necesidad de suplir con más oxígeno las raíces maduras de la planta, a la manera de un tejido aerénquima (Gladish y Niki, 2000).

La arveja que se utiliza en horticultura es de crecimiento indeterminado y se caracteriza por sus flores papilionadas dispuestas en racimos simples o múltiples que emergen axilarmente de las hojas (Delahaut y Newenhouse, 1997). Las flores son comúnmente blancas aunque algunas pueden aparecer de color violeta. Hay una gran variedad de tipos de vaina, desde pequeñas y cilíndricas hasta largas y aplanadas de tipo comestible. De forma similar, hay una variación muy grande en tamaños, formas y colores de semilla. Las semillas arrugadas se usan comúnmente en estados inmaduros para congelación y enlatados, mientras que las de tipo liso se usan como arvejas secas (Muehlbauer, 1993)

La arveja se cultiva desde hace 9000 años, y es nativa del oriente medio. Los granos se usan principalmente para el consumo humano, pero también como alimento para el ganado. La planta se utiliza como forraje o como abono verde (Krall *et al.*, 2006).

De acuerdo con el porte de la planta, se distinguen las enanas y las trepadoras. Las variedades enanas tienden a ser más tempranas y se utilizan preferencialmente para la industria. Las trepadoras se utilizan especialmente para el mercado fresco (FEDECAFE, 1986).

Las variedades trepadoras se pueden cultivar sin tutorado, pero los rendimientos del cultivo se deprimen. Se utilizan dos tipos de tutorado: por colgadura o entable, y por espaldera. En el sistema de colgadura, se coloca un alambre alrededor de los 1,6 m de altura, sostenido por postes de madera y varas cada 4-5 m, y de él se descuelgan los hilos para amarrar los tallos de las plantas. En el sistema de espaldera, se encanastan las plantas, colocando cuerdas horizontalmente cada 40 cm, utilizando postes de forma similar al primer sistema (FEDECAFE, 1986).

3.2 Desarrollo fenológico

El desarrollo de la planta de arveja está caracterizado por diferentes etapas fenológicas, que se distinguen por la aparición secuencial de órganos vegetales. Con la clave construida por BBCH (Meier, 2001) es posible hacer el seguimiento de estas etapas en el campo. Según esta clave, los estadios principales son:

- 0 Germinación
- 1 Desarrollo de hojas
- 3 Crecimiento longitudinal de entrenudos
- 5 Aparición del órgano floral
- 6 Floración
- 7 Formación del fruto
- 8 Maduración de frutos y semillas
- 9 Senescencia

Los niveles 2 y 4 no se utilizan en esta especie vegetal. Es importante anotar que dadas las definiciones de los estadios de desarrollo, es posible el traslape de los mismos, como se ilustra en la Figura 2.1 con el 15/35 (5 hojas desarrolladas, y 5 entrenudos alargados visiblemente).

En la Tabla 3.1 se presenta el tiempo que tarda en ocurrir algunos eventos fenológicos del cultivo de arveja, variedad Piquinegra, bajo condiciones colombianas, según dos referencias.

Tabla 3.1. Tiempo en días después de la siembra que tardan en ocurrir algunos eventos fenológicos del cultivo de arveja var. Piquinegra.

Evento fenológico	Londoño y Naranjo (1995)	Castro (1992)
Emergencia		8-10
Aparición de hojas con zarcillos	11-14	10-15
Inicio de la floración	40-42	40-45
Formación de vainas	59-61	55-65
Inicio de la cosecha	91-94	90-100

Las vainas se deben cosechar cuando estén completamente verdes y desarrolladas y antes de que comiencen a endurecer. Para el mercado fresco, la cosecha se hace manualmente, en 2 a 4 pases durante 15-20 días.

La duración del ciclo varía con la variedad y el tipo de cultivo, pero está entre 45-90 días en variedades tempranas, y hasta 120 días en variedades tardías. La arveja verde almacenada a 0°C y 90-95% de H.R. puede conservarse hasta por 3 semanas; a 5°C dura 15 días. La arveja verde almacenada a condiciones del medio ambiente pierde peso por evaporación a razón del 10-12% /día (Arjona *et al.*, 1977).

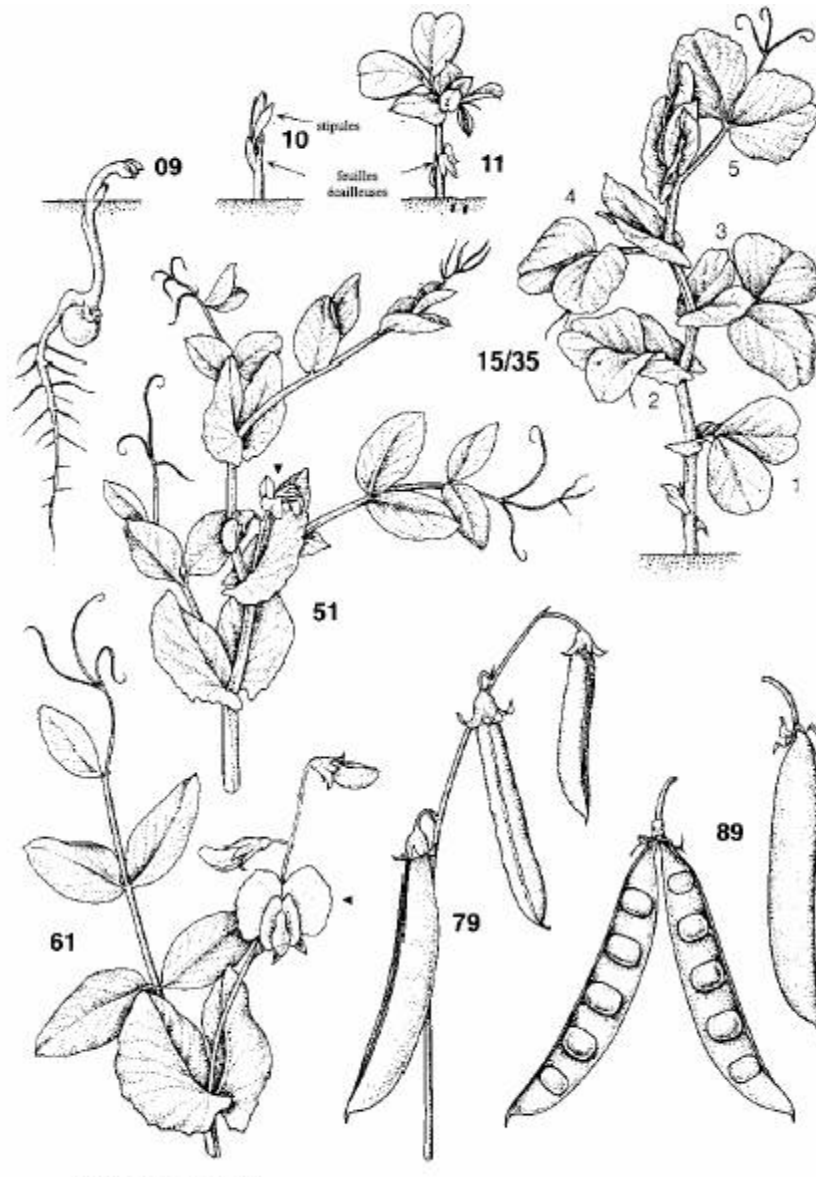


Figura 3.1. Algunos estadios de desarrollo de la arveja según la clave de la BBCH (Fuente: Meier, 2001).

3.3 Valor nutricional

La arveja es importante en la dieta humana especialmente por su contenido de proteína, fósforo y vitaminas A y C. En la Tabla 3.2 se presentan los contenidos de nutrientes de la arveja verde, según la FAO.

Tabla 3.2. Contenidos de nutrientes en 100 g de porción comestible de la arveja entera verde

Componente	Valor	Componente	Valor
Agua (g)	66,4	Sodio (mg)	
Proteínas (g)	8,2	Potasio (mg)	
Grasas (g)	0,3	Calcio (mg)	36,00
Cenizas (g)	1,0	Fósforo (mg)	110,00
Fibra dietética (g)		Hierro (mg)	2,40
Carbohidratos totales (g)	24,1	Zinc (mg)	
Carbohidratos disponibles (g)		Vitamina A Equiv. totales (µg)	66,00
Energía (kcal)	132,0	β-caroteno Equiv. totales (µg)	
Ácidos grasos saturados (g)		Tiamina (mg)	0,36
Ácidos grasos monoinsaturados (g)		Riboflavina (mg)	0,12
Ácidos grasos poliinsaturados (g)		Niacina (mg)	2,20
Colesterol (mg)		Vitamina C (mg)	20,00

Fuente: FAO/LATINFOODS, 2002

Krall *et al* (2006) mencionan que la proteína de la arveja es rica en triptofano y lisina, aminoácidos esenciales que normalmente son bajos en los cereales. Además, la arveja seca logra un contenido de proteína del 21 a 25% en peso, superior al de la arveja verde.

3.4 Importancia ecológica

La simbiosis entre leguminosas y bacterias rhizobióticas es la principal fuente biológica de nitrógeno en sistemas agrícolas (Lira *et al.* 2005). El cultivo de la arveja, al igual que toda leguminosa, hace un aporte importante al suelo con la fijación de nitrógeno atmosférico con la ayuda de bacterias nitrificantes del género *Rhizobium* (Lindemann y Glover, 2003). En parte este nitrógeno lo utiliza la planta para su propio desarrollo, por lo cual las necesidades de fertilización del suelo por este elemento son bajas, y se limitan al periodo de establecimiento del cultivo (Morales, 1992).

La presencia de *Rhizobium* en las raíces de arveja es indispensable para una buena producción del cultivo. Aunque en los suelos colombianos se presenta la bacteria en forma natural en cantidad suficiente, también se han seleccionado cepas más eficientes que pueden aplicarse a la semilla para una mejor productividad. Además, el nitrógeno fijado una vez terminado el ciclo de la arveja sirve para el desarrollo del cultivo que le sigue en rotación. En la rotación arveja-cebada, el beneficio por aportes de N al suelo fue de 0,9 a 2,5 g N·m⁻², y se derivó de diferentes fuentes como los residuos de cosecha de arveja y las rizodeposiciones de los nódulos (Soon *et al.*, 2004). El nitrógeno es utilizado por las plantas para la producción de proteínas, ácidos nucleicos (ADN y ARN) y clorofila (McCauley *et al.*, 2003).

Carr *et al.* 1996 evaluaron la conveniencia de cultivar en forma intercalada la avena de primavera (*Avena sativa* L., Poaceae) y la arveja (*Pisum sativum* L.) para mejorar la calidad

del forraje de avena. La productividad de la avena se mantiene igual o incluso mejora con respecto al monocultivo. Por lo tanto, el cultivo intercalado de estas especies es una alternativa para producir alimento rico en proteína para el ganado. Monsalve (1983) observó que el cultivo de papa (variedad ICA-Guantiva y Parda pastusa) intercalado con arveja Guatecana no redujo sus rendimientos ni el tamaño de los tubérculos, cuando se sembraron plantas de arveja cada 0,80 o 1,20 m sobre el surco, con 2 o 3 semillas por sitio.

La actividad de las bacterias nitrificantes está afectada por diversos factores ambientales como: la temperatura, el contenido de nitratos del suelo, la salinidad, reacción del suelo y disponibilidad de agua. A continuación se revisa cada uno de estos puntos brevemente.

La nodulación de las plantas de arveja, según Lira *et al.* (2005), es más rápida a 20 °C, comparada con temperaturas mayores o menores, en un rango de adaptación entre los 10 y 25 °C. A esta temperatura también se obtiene un mayor número de nódulos y de mayor tamaño.

Según los resultados de Cordovilla *et al.* (1999), la aplicación de nitratos al medio de cultivo (8 mM KNO₃) de las plantas de arveja no redujo la actividad de la nitrogenasa, enzima responsable de la fijación del N atmosférico, pero inhibió la nodulación de *Rhizobium leguminosarum* biovar. *viciae* en las raíces. Por lo tanto, las aplicaciones de nitrógeno inorgánico al suelo a dosis altas inhiben la nodulación y no son convenientes en este cultivo.

Por otra parte, bajo la condición de salinidad (75 nmol/L NaCl), los nódulos que se desarrollaron en plantas de arveja *P. Sativum* L. cultivar Argona con la inoculación de *R. Leguminosarum* biovar. *viciae* 3841 no fueron funcionales y presentaron una estructura anormal (Bolaños *et al.*, 2003). Sin embargo, la adición de B (arriba de 55,8 μmol·L⁻¹) y Ca²⁺ (por encima de 2,72 mmol/L) aumentaron la población bacteriana en las células huésped de la planta aún bajo condiciones de estrés por salinidad.

Para el desarrollo adecuado de la nodulación, el cultivo de arveja requiere suelos con pH entre 5.5 y 6.5 (FEDECAFÉ, 1986). Krall *et al.* (2006) afirman que el rango de pH óptimo está entre 5,9 y 6,5, aunque tolera pH hasta de 7,5.

Para concluir, como afirman González *et al.* (2001), las leguminosas deben verse como parte integral de muchos sistemas de producción agrícola sostenibles. Además, dentro de este mismo contexto, es importante resaltar que el cultivo de arveja es compatible con las labores de conservación de suelos. Payne *et al.* (2000) observaron que el cultivo de la arveja no redujo su productividad en los tratamientos de labranza mínima.

3.5 Requerimientos hídricos

Según Ruíz y Vanegas (1997), los requerimientos hídricos de la arveja var. Santa Isabel, para la localidad de Susa en Cundinamarca, son de 320 mm para el ciclo de cultivo de 107 días. Este resultado corresponde a una eficiencia en el uso del agua WUE (Water Use Efficiency) de 19,46 kg·ha⁻¹·mm⁻¹.

Según Siddique *et al.* (2001), la WUE de la arveja según observaciones experimentales en campo puede llegar a $16 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. La rapidez del crecimiento de la arveja, la floración y fructificación temprana y la mayor productividad, ubicaron a esta especie junto con el haba (*Vicia faba*) como las especies mejor adaptadas a las zonas de baja precipitación del Mediterráneo, con respecto a la lenteja *Lens culinaris* y el garbanzo *Cicer arietinum*.

La WUE es mayor en las variedades de arveja afoliadas, lo cual puede ser utilizado ventajosamente en zonas con poca disponibilidad de agua para el cultivo. Baigorri *et al.* (1998) compararon dos tipos de arveja, uno semi-afoliado (cultivar Solara) y otro normal (cultivar Frilene), bajo condiciones de estrés hídrico durante el periodo entre floración y el inicio del llenado de granos. Con la sequía, Frilene aumentó la partición de la materia seca total a las raíces, aumentó el aborto de flores, y disminuyó la asignación de materia seca a las vainas y semillas. En contraste, Solara interrumpió el crecimiento vegetativo, aumentó la senescencia de las hojas, pero mantuvo una partición de la materia seca total a las vainas y semillas similar a la condición de humedad óptima.

La capacidad para conservar alto el contenido relativo de agua (RWC Relative Water Content) en la planta bajo condiciones de estrés hídrico usualmente se correlaciona bien con la producción de biomasa y el rendimiento en grano. Varios mecanismos pueden ayudar en este propósito: ajuste osmótico adecuado, mayor desarrollo de raíces, reducción de la transpiración. En arveja, Sánchez *et al.* (2004), observaron que todos los 12 cultivares que evaluaron fueron capaces de un ajuste osmótico entre 0,30 y 0,65 MPa, mientras que la turgencia de mantenimiento varió entre $-2,436$ y $-3,906$ MPa. Esta característica puede utilizarse en la obtención de material resistente a la sequía.

3.6 Producción en Colombia

Según las estadísticas del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, la arveja se cultivó en el país en el 2004 en una extensión de 25.658 ha (Tabla 3.3), lo cual significa con respecto al año 1997, una variación del 1%. Así mismo, la producción y el rendimiento se han mantenido en niveles similares para el periodo 1997-2004.

Cuando se compara el cultivo de arveja con otras hortalizas, se observa que aunque la arveja sobresale en primer lugar por el área cosechada en el año 2004, el rendimiento promedio nacional es relativamente bajo ($1,24 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), y el volumen de producción obtenida se reduce proporcionalmente.

FEDECAFE (1986) identificó el cultivo de arveja como propio de la zona cafetera alta, y aseguró que la productividad en fresco alcanza $8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. El bajo rendimiento promedio a nivel nacional refleja la necesidad de más investigación para definir el potencial de las zonas productoras, las principales limitaciones para su desarrollo y las posibilidades técnicas para resolverlas.

Pinstrup-Andersen (2002) afirman que la humanidad enfrenta el reto de aumentar los niveles de producción de alimentos sin afectar negativamente el medio ambiente, y en este sentido, debe preferirse el desarrollo de la productividad de los cultivos en vez de expandir el área agrícola a costa de daños en la biodiversidad, la vida silvestre y los suelos.

Tabla 3.3. Área cosechada, producción obtenida y rendimiento del cultivo de arveja en Colombia por año agrícola

Año	Área cosechada (ha)	Producción (t)	Rendimiento (kg·ha ⁻¹)
1997	25.305	30.278	1,196
1998	22.160	23.679	1,069
1999	25.688	26.900	1,047
2000	24.620	27.378	1,112
2001	24.873	30.397	1,222
2002	25.669	29.757	1,159
2003	25.946	35.427	1,365
2004	25.658	31.806	1,240

FUENTE: Estadísticas Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Colombia

Tabla 3.4. Área cosechada, producción obtenida y rendimiento de las principales hortalizas en Colombia, en el año agrícola 2004

Hortaliza	Área cosechada (ha)	Producción obtenida (t)	Rendimiento (t·ha ⁻¹)
Arveja	25.658	31.806	1,240
Tomate	14.633	384.732	26,293
Cebolla cabezona	12.126	262.430	21,642
Cebolla junca	7.867	194.164	24,679
Zanahoria	6.386	184.641	28,916
Habichuela	4.226	42.431	10,041
Resto (25 especies)	19.126	338.186	13,517

FUENTE: Estadísticas Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Colombia

De lo anterior se deduce que las necesidades de producción de arveja en Colombia para una población humana creciente deben suplirse preferiblemente con el aumento de la productividad del cultivo, y que la investigación agrícola debe evaluar primero las condiciones en las cuales se desarrolla la arveja para hacer avances tecnológicos con sostenibilidad y rentabilidad.

3.7 Producción mundial

El cultivo de la arveja se extiende alrededor del mundo. Aunque hay muchos tipos de arveja, los más importantes se cultivan en las zonas templadas, al norte del Trópico de Cáncer, en cuanto no toleran bien las zonas tropicales cálidas. La arveja seca se considera como legumbre y le sigue en importancia al frijol seco. La arveja verde se considera como

una hortaliza, ya sea que se cultive en huerta o en campo abierto. Los guisantes también se consideran dentro de este grupo (FAOSTAT, 2006).

Según la FAO, en el mundo se dedicaron 1'134.946 ha al cultivo de arveja verde en el año 2005 (FAOSTAT, 2006). Los principales países productores fueron India y China. En el mismo año, se dedicaron 6'426.319 ha al cultivo de arveja seca, con Canadá a la cabeza, seguida de China. Se produjeron 9'224.668 t de arveja verde, y 4.449 t de arveja seca.

Slinkard *et al.* (1990) describen cómo el área dedicada al cultivo de arveja en Canadá, específicamente en la provincia de Saskatchewan, se incrementó dramáticamente entre 1968 a 1988, cuando pasó de 240 a 160.000 ha. Johnston (2002) afirmó que para el 2001 se cosecharon 1,377 millones de ha dedicadas al cultivo de arveja en Alberta, Saskatchewan y Manitoba. Actualmente, Canadá es el mayor productor de arveja seca en el mundo.

Según Slinkard *et al.* (1990), el rápido crecimiento del área dedicada al cultivo de arveja en Canadá fue el resultado de un gran esfuerzo con programas de investigación básica y aplicada junto con programas de extensión, dentro de un enfoque integrado multidisciplinario. El desarrollo paralelo de la industria relacionada y los buenos precios internacionales fueron definitivos para el éxito de este cultivo en ese país.

3.8 Literatura citada

Arjona, H, R. Sabogal y G. Suárez. 1977. El cultivo de la arveja (*Pisum sativum*). Publicación Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Bogotá. Segunda edición. 47 p.

Baigorri, H., M.C. Antolín y M. Sánchez-Díaz. 1999. Reproductive response of two morphologically different pea cultivars to drought. *European Journal of Agronomy* 10: 119–128.

Blodgett. 2006. Pea production in the High Plains. South Dakota State University Extension, Fact Sheet FS932.

Bolaños, L., A. El-Hamdaoui, e I. Bonilla. 2003. Recovery of development and functionality of nodules and plant growth in salt-stressed *Pisum sativum* – *Rhizobium leguminosarum* symbiosis by boron and calcium. *Journal of Plant Physiology* 160:1493–1497.

Carr, P.M., E.D. Eriksmoen, G.B. Martin y N.R. Olson. 1996. Grain yield of oat-pea intercrop. p. 240-243. En: J. Janick (ed.), *Progress in new crops*. ASHS Press, Alexandria, VA.

Castro R., M. 1995. Evaluación de arveja voluble (*Pisum sativum* L.) en diferentes densidades y sistemas de siembra en la región de Simijaca (Cundinamarca). Tesis de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 86 p.

Cordovilla, M., F. Ligeró y C. Lluch, 1999. Effects of NaCl on growth and nitrogen fixation and assimilation of inoculated and KNO₃ fertilized *Vicia faba* L. and *Pisum sativum* L. plants. *Plant Science* 140:127–136.

Delahaut, K.A. y A.C. Newenhouse. 1997. Growing beans and peas in Wisconsin. A guide for fresh-market growers. University of Wisconsin-System Board of Regents and University of Wisconsin-Extension. Cooperative Extension. Madison. 19 p.

FAOSTAT. 2006. FAO Statistic Division. En: <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567>, consultado en septiembre de 2006

FEDECAFE. 1986. El cultivo de la arveja. Proyecto Hortalizas, Frutales y Flores. Ed. Litocencia Ltda., Cali. 18 p.

Gladish, D.K y T. Niki. 2000. Factors inducing cavity formation in the vascular cylinders of pea roots (*Pisum sativum* L., cultivar Alaska). *Environmental and Experimental Botany* 43: 1–9

González. 2003. Intercepted solar radiation during seed filling determines sunflower weight per seed and oil concentration. *Crop Science* 43:152–161.

Krall, J.M., S.D. Miller, J.T. Cecil, C. Bstian, T. Foulke, D.D. Baltensperger, B.M. Harveson, P.A. Burgener, G.W. Hergert, G.L. Hein, D.J. Lyon, T. Nleya, J. Rickertsen y S. Johnston, A. 2002. Field pea responses to phosphorus fertilization. News and views. Boletín regional del Potash & Phosphate Institute (PPI) y el Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC).

Lindemann, W.C. y C.R. Glover. 2003. Nitrogen fixation by legumes. New Mexico State University, College of Agriculture and Home Economics, Cooperative Extension Service.

Lira jr., M.de A., A.S. Lima y J.R. Arruda, D.L. Smith. 2005. Effect of root temperature on nodule development of bean, lentil and pea. *Soil Biology & Biochemistry* 37: 235–239.

Londoño, J., M.L. Naranjo. 1996. Aplicación de aminoácidos como complemento a la fertilización química y orgánica en el cultivo de arveja (*Pisum sativum* L.) var. Piquinegra. Trabajo de grado. Universidad de Caldas, Facultad de Agronomía, Manizales. 62 p.

McCauley, A., C. Jones y J. Jacobsen. 2003. Plant nutrient functions and deficiency and toxicity symptoms. Nutrient Management Module No. 9. Montana State University Extension Service. 16 p.

Meier, U. 2001. Estadios de las plantas mono-y dicotiledóneas. Centro Federal de Investigaciones Biológicas para Agricultura y Silvicultura, Alemania. 2ª Edición. 149 p.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2006. Acuerdo de competitividad de la cadena de hortalizas. Observatorio Agrocadenas Colombia. 53 p. En:

http://www.agrocadenas.gov.co/hortalizas/documentos/Acuerdo_competitividad_hortalizas.pdf. Consultado en septiembre/2006.

Monsalve, O. 1983. Efecto de dos poblaciones y dos distancias de siembra de arveja (*Pisum sativum* L.) asociada sobre el crecimiento de dos variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.). Tesis de grado, Programa de Estudios para Graduados Universidad Nacional - Instituto Colombiano Agropecuario, Bogotá. 114 p.

Morales, A. (ed). 1992. Fertilización en diversos cultivos, quinta aproximación. Manual de Asistencia Técnica No. 25. Instituto Colombiano Agropecuario ICA, Subgerencia de Investigación, Sección Recursos Naturales, Tibaitatá. 64 p.

Muehlbauer, F.J. 1993. Food and grain legumes. En: Janick, J. y J.E. Simon (eds.). New crops. Ed. Wiley, New York. pp. 256-265.

Payne, W.A., P.E. Rasmussen, C. Chen, R. Goller y R.E. Ramig. 2000. Precipitation, temperature and tillage effects upon productivity of a winter wheat-dry pea rotation. *Agronomy Journal* 92:933-937.

Pinstrup-Andersen, P. 2002. Towards a sustainable global food system: what will it take?. En: Annual John Pesek Colloquium in Sustainable Agriculture, Iowa State University. Marzo 26-27.

Ruíz, J.G., N.E. Vanegas. 1997. Efecto del riego por goteo en la producción del cultivo de arveja (*Pisumsativum* L. var. Santa Isabel). Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Bogotá. 135 p.

Sánchez, F.J., E.F. de Andrés, J.L. Tenorio y L. Ayerbe. 2004. Growth of epicotyls, turgor maintenance and osmotic adjustment in pea plants (*Pisum sativum* L.) subjected to water stress. *Field Crops Research* 86: 81-90.

Siddique, K.H., K.L. Regan, D. Tennant y B.D. Thomson. 2001. Water use and water use efficiency of cool season grain legumes in low rainfall Mediterranean-type environments. *European Journal of Agronomy* 15: 267-280.

Slinkard, A.E., R.S. Bhatti, B.N. Drew y R.A. Morrall. 1990. Dry pea and lentil as new crops in Saskatchewan: A case study. p. 159-163. En: Janick, J. y J.E. Simon (eds.), *Advances in new crops*. Timber Press, Portland, OR.

Soon, Y.K., K.N. Harker y G.W. Clayton. 2004. Plant competition effects on the nitrogen economy of field pea and the subsequent crop. *Soil Science Society of America Journal* 68:552-557.

**CAPÍTULO 4. ALGUNAS RELACIONES ALOMÉTRICAS DEL
CRECIMIENTO DE LA PLANTA DE ARVEJA (*Pisum sativum* L.)**

4.1 Resumen

Las relaciones alométricas de la planta de arveja (*Pisum sativum* L.) son importantes para modelar el crecimiento en forma estructural, determinar algunas razones que explican la distribución interna de los fotoasimilados, y facilitar el seguimiento de los cultivos. En el Centro Agropecuario de Marengo de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá (2640 m.s.n.m., 14 °C, 80% H.R., 800 mm de lluvia/año), se sembró un lote de 2 ha de arveja var. Santa Isabel, en el cual se marcaron 32 puntos para la toma de muestras, 2 plantas por punto. Se hicieron tres evaluaciones, a los 42, 62 y 120 días después de la siembra. Se utilizaron métodos de correlación y regresión para estimar asociaciones, proporciones y relaciones entre diferentes partes del fitómero. Entre las características de menor varianza estuvieron: las relaciones de largo y ancho de las láminas foliares y su área, longitud de foliolos y su distanciamiento en la hoja, y la proporción de nudos reproductivos con respecto al total de nudos formados en el tallo principal. Se propone la estimación del área de los foliolos con el largo L de la forma $0,36L^2$. La poca correlación entre la longitud de los entrenudos y el tamaño de las hojas sugiere la conveniencia de modelar por separado el crecimiento de estas estructuras. La longitud final de las vainas no dependió del tamaño de las láminas foliares del fitómero que les dio origen, y al parecer la productividad en el tallo principal es el resultado de combinar principalmente el número de nudos reproductivos y el número de vainas.

Abstract

Allometric relations in pea plants (*Pisum sativum* L.) are important to model structural growth, explain photoassimilates inner partitioning ratios, and facilitate crop monitoring. In the agropecuarian research center Marengo of Colombian National University, Bogotá (2640 m over sea level, 14 °C, 80% R.H., rainfall of 800 mm/year), was planted 2 ha of peas var. Santa Isabel, where 32 spatial points were marked as a net sampling design, two plants per point. Three evaluations were made, to 42, 62 and 120 days after planting. Several statistical methods, as correlation and regressions, were applied to estimate ratios and size relations between different phytomer parts. Low variance were observed in: leaf area in relation with length and wide of leaflets, leaflet length and distance between them in the same leaf, reproductive node number and total node number ratio in the main stem. Leaflet area can be estimated with $0.336L^2$, where L is the leaflet length. Low correlation between internode length and leaf size suggest to model separately those structures for growth simulation. Pod length was no related with leaf size at the same phytomer, and it seems that productivity in the main stem is a result of combining reproductive node number and pod number.

4.2 Introducción

Las relaciones de forma y tamaño de los órganos de las plantas reflejan la manera visible como la planta se enfrenta y adapta a su medio ambiente. Estas relaciones a menudo tienen fundamento genético y fisiológico, muestran gran estabilidad ante la variabilidad del ambiente, y muchas de sus aplicaciones aún están por explorar (Enquist, 2002).

Según West y Brown (2005), en todos los niveles de organización de la vida, desde los genomas hasta los ecosistemas, se presentan leyes de escalamiento alométrico. En las relaciones de escala, juega un papel primordial la masa del individuo, y en menor extensión la temperatura. El escalamiento del tamaño sigue típicamente una ley de potenciación simple de la forma:

$$Y=Y_0M^b \quad (4.1)$$

Donde Y es una cantidad biológica observable, Y_0 es una constante de normalización, M es la masa del organismo, b es una constante de potenciación. Ejemplos de variables Y en plantas, son el grosor del tallo, altura de la planta, tasas de crecimiento vegetal, hasta la concentración de RNA ribosomal y de enzimas metabólicas.

La alometría en las plantas tiene fundamento y se refleja a nivel molecular, o estequiométrico. Por ejemplo, las hojas son ricas en rubisco, una proteína con determinados contenidos de C y N. La producción de rubisco depende de un aporte balanceado de C con la asimilación de CO₂ por parte de las hojas, y del N que es suministrado por parte de las raíces. En general, el crecimiento y funcionalidad de los órganos debe responder al volumen requerido de sustancias nutritivas según la composición química vegetal y los requerimientos metabólicos.

Niklas y Cobb (2005) encontraron que con pocas excepciones, el contenido de N escalaba isométricamente con respecto al contenido de C en cada órgano (hojas, tallos aéreos, órganos reproductivos, raíces y tubérculos) en plantas de diferente tamaño de *Eranthis hyemalis*, mientras que P escaló a una potencia 3/4 de C, esto es: $N \propto P^{3/4}$.

Emery *et al.* (2002) encontraron que el contenido de Na⁺ en la savia del xilema se correlacionaba estrechamente con la biomasa de la raíz en arveja, lo cual puede ser aprovechado como medio indirecto para medir el desarrollo de la raíz bajo condiciones de campo o de laboratorio.

Tal como afirman Forbush y Richardson (1998), la alometría se refleja también a nivel del tamaño relativo de los órganos y sus dimensiones. En forestales su importancia radica en poder hacer estimaciones de la biomasa de un árbol sin tener que cortarlo para pesar sus partes en el laboratorio.

El conocimiento de las relaciones de forma y tamaño de los órganos de las plantas es necesario para la construcción de modelos de arquitectura vegetal que ayudan a explicar la forma como la planta intercepta la luz, distribuye sus asimilados en diferentes órganos, intercambia energía con su medio y resiste las condiciones adversas del ambiente. Las relaciones del tamaño de las hojas con el área foliar han tenido extensa aplicación práctica, y el reconocimiento de funciones que describen el desarrollo foliar a lo largo del tallo facilitan el análisis de crecimiento de los cultivos (Elings, 2000).

Entre los métodos para estimar área foliar en forestales, Jonckheere *et al.* (2003) observaron dos categorías principales: los directos e indirectos. Los primeros miden el área foliar propiamente sobre el material, mientras que los segundos derivan el área foliar de

parámetros más fácilmente medibles. Entre éstas últimas, las técnicas alométricas para árboles se basan en la relación del área foliar con cualquiera de las dimensiones del elemento vegetal que lleva la biomasa verde foliar, como el diámetro del tallo, altura del árbol, etc.

La estimación del área foliar a partir de la medida de las dimensiones de los órganos implicados, o las estructuras relacionadas, aún hoy tienen aplicabilidad. Tal como afirman Serdar y Demirsoy (2006), el área foliar puede determinarse utilizando instrumentos, herramientas y máquinas como los escáneres de mano y los aparatos de láser óptico. Sin embargo, estos aparatos son demasiado costosos y complejos para algunos estudios básicos. La estimación del área foliar con mediciones geométricas es menos costosa, y ya se han hecho estudios en este sentido para durazno (Demirsoy *et al.*, 2004), lino (Kurt *et al.*, 2005), papa (Fleisher y Timlin, 2006), maíz (Lizaso *et al.*, 2003), palma de aceite (Awal *et al.*, 2004), entre otras. Incluso, esta metodología puede ser la mejor opción en hojas aciculadas, en las cuales la medición exacta del área se hace muy difícil (Balci y Kennedy, 2003).

No sólo la forma y tamaño de las láminas foliares, sino también su distribución espacial en la arquitectura de la planta, son determinantes en la cantidad de luz que puede ser interceptada para la fotosíntesis, lo cual a su vez determina la cantidad de materia seca que puede ser producida (Monteith, 1977). Aunque no siempre una máxima interceptación de luz conduce a una mayor productividad (Herbert, 2004), a menudo se cumple lo contrario, y una alta productividad requiere una interceptación adecuada que aproveche al máximo la radiación solar incidente. El espaciamiento entre hojas y folíolos, contribuye a reducir el autosombreamiento para aprovechar al máximo la luz incidente, lo cual depende de una relación adecuada del tamaño de las estructuras de soporte de la planta (tallo, ramas, pecíolos, etc.)

Vile *et al.* (2005) utilizaron los datos de área foliar específica (SLA) y peso seco foliar para estimar el grosor de las hojas, para una amplia variedad de formas de crecimiento en ambientes contrastados de cuatro continentes. Las plantas pertenecían a más de 29 familias. La pendiente general y el intercepto de las relaciones no fueron significativamente diferentes de la unidad y de cero, respectivamente, y el error estándar del residual fue 0,11. Sólo en dos de ocho bases de datos se encontraron diferencias significativas en los interceptos, especialmente en árboles.

En este punto conviene distinguir entre las relaciones alométricas como características vegetales estables, mientras que las variaciones de forma y tamaño del organismo en respuesta a los cambios de ambiente se deben entender como parte de la plasticidad fenotípica (De Kroon *et al.*, 2005).

Aunque algunas relaciones de tamaños y formas se han hecho sobre la planta en su conjunto, un mayor detalle exige reconocer la estructura modular que caracteriza en general muchas plantas. En este sentido, la planta puede ser vista como una estructura compuesta por unidades repetitivas, que han sido llamadas de distinta forma: módulos (De Kroon *et al.*, 2005), fitómeros o metámeros (Yan *et al.*, 2004, Mathieu *et al.*, 2004). Un fitómero puede considerarse como un entrenudo, una hoja y una yema vegetativa o reproductiva. El

incremento del área foliar de una planta se hace por la aparición sucesiva de nuevos fitómeros. El comienzo de la fase reproductiva de la planta generalmente está asociado con un número de fitómero característico según el material genético (Truong y Duthion, 1993). En el caso de arveja, el nudo en el cual emerge el primer nudo floral está definido por la variedad (Marx, 2001; Duke, 1981).

El objetivo de la presente investigación es determinar algunas relaciones alométricas en el cultivo de arveja, tomando como base los fitómeros como unidades estructurales constituidas por: un entrenudo, dos estípulas, el pecíolo, raquis y foliolos. Las relaciones de las dimensiones de las hojas han sido analizadas como base para la estimación del área foliar de la planta. El desarrollo de las ramas se relacionó con el nudo de origen en el tallo principal. Considerando que la ramificación de la planta es un componente importante del rendimiento (Hatam y Amanullah, 2001), estas relaciones y proporciones se hicieron para tallo y ramas. Se estimó la relación de nudos reproductivos y vegetativos, y el número de vainas por nudo. Finalmente, se hizo la correlación entre la longitud de las vainas y el desarrollo foliar. De esta forma se construyen bases para explicar la productividad de la planta con base en algunos de los componentes del rendimiento (Timmerman *et al.*, 2004) y el crecimiento general de la planta.

4.3 Materiales y métodos

En el segundo semestre de 2004, en una extensión de 2 ha (100 x 200 m) de terreno del lote 8 del Centro Agropecuario Marengo (CAM) de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá Carretera Occidente Vía Mosquera km 15, latitud norte 4°42', longitud oeste 74°12', 2.543 msnm, 13,64 °C, 649 mm de precipitación, formación ecológica bosque seco montano bajo), de suelo francoarcilloso, se llevó a cabo un cultivo de arveja var. Santa Isabel con semilla proveniente de FENALCE. Sobre esta área se aplicó una cuadrícula de 25 x 25 m, para un total de 32 unidades, con el fin de ubicar los puntos de muestreo en las intersecciones de la cuadrícula.

Antes de la siembra, se tomó una muestra de suelo para la caracterización química del suelo. Los resultados fueron: pH 4,88, carbono orgánico 2,76%, fósforo disponible 137,39 ppm, las bases K 0,41 meq·100g⁻¹, Ca 9,70 meq·100g⁻¹, Mg 2,72 meq·100g⁻¹, Na 0,90 meq·100g⁻¹, y los elementos menores Fe 481 ppm, Mn 12,57 ppm, Cu 2,53 ppm, Zn 23,76 ppm, B 0,22 ppm. El agua para el cultivo provino de las lluvias y del riego por aspersión que se aplicó en épocas secas.

Para efectos del análisis de las partes de la planta, se consideró el fitómero constituido por un entrenudo, un par de estípulas en el nudo superior del entrenudo, y una hoja compuesta con un número variable de foliolos según el desarrollo de la planta (de 2 a 6 foliolos), y una yema que puede ser vegetativa o reproductiva.

Para el seguimiento del crecimiento, inicialmente se marcaron 2 plantas por sitio, para un total de 64, aunque algunas plantas (ocho) se perdieron posteriormente durante el desarrollo del cultivo por el ataque de plagas y enfermedades. Las observaciones se hicieron cada 8 días, a partir de los 40 días después de la siembra hasta los 112 días cuando se realizó la cosecha final.

4.3.1 Estimación del área foliar

A los 42 días después de la siembra se tomó una muestra destructiva de 24 plantas para la evaluación del tamaño de las láminas foliares por fitómero. A los 62 días después de la siembra se tomó una muestra de 30 hojas por sitio de la cuadrícula (32 puntos) para la evaluación del área foliar y la relación con las dimensiones de los folíolos. A los 112 días después de la siembra se hizo la recolección de las plantas marcadas para evaluar los tamaños de las estructuras vegetativas y la longitud de las vainas.

Para todos los casos, las relaciones se evaluaron mediante el análisis de regresión para la estimación de la razón de las proporciones entre partes del fitómero, por medio del método de mínimos cuadrados (Serdar y Demirsoy, 2006; Rossini *et al.*, 2004). Se hizo el chequeo de los supuestos de aleatoridad de los residuales y normalidad con la prueba de Shapiro-Wilks al 5% de significancia.

La longitud del folíolo (L ; cm) se tomó por la vena central, y el ancho máximo (A ; cm) perpendicular a la vena. El área foliar S del folíolo o estípula se midió mediante el escaneo de las láminas foliares y el análisis de la imagen (Igathinathane *et al.*, 2006). La relación entre S y las dimensiones L y A se hizo con varios modelos, para seleccionar el de mejor ajuste. En este caso, el área foliar constituye la variable dependiente, L y A en variables independientes. En la práctica, se mide L y A sin error (a no ser del propio de la medición), y se estima S con un nivel de error dado por el modelo.

De forma similar, se midieron las partes de la hoja de arveja (Figura 4.1), como el pecíolo, raquis, longitud de folíolos por par opuesto. Cuando la hoja tuvo más de dos pares de folíolos, se midió el raquis correspondiente al tercer par foliar. En algunos casos, un folíolo de un último par no aparecía en la hoja, y en su lugar se encontraba un zarcillo. Se hizo un análisis exploratorio de correlación para determinar las variables más adecuadas para estimar el área de la hoja con base en sus partes, o en la longitud de las estípulas del entrenudo correspondiente en el fitómero.

Se aplicó el análisis de regresión (Serdar y Dermisoy, 2006) para determinar las relaciones de las dimensiones de la hoja para cada evaluación y cada modelo propuesto por separado. La estimación de los parámetros de regresión se hizo por mínimos cuadrados.

4.3.2. Características reproductivas

Se llevó a cabo el seguimiento del cultivo cada siete días, para observar el número de nudos formados y la aparición de flores. Una vez aparecido el primer nudo reproductivo se continuó el seguimiento hasta la cosecha. En los nudos reproductivos se contó el número de flores y vainas formadas. Se calculó la proporción de nudos reproductivos con respecto al total de nudos, por separado para el tallo principal y las ramas.

El desarrollo de las ramas en la planta de arveja se analizó en función del nudo de origen del tallo principal de donde emergen, en cuanto que la aparición de ramas sigue un orden ascendente (acropétalo) por los nudos del tallo principal, y por lo tanto las ramas de los

nudos más bajos tienen mayor tiempo de desarrollo que las ramas de nudos altos. Además, el número de nudo en el tallo se asocia con una posición en el espacio que puede explicar la cantidad de luz que puede recibir para efectos de la fotosíntesis.



Figura 4.1. Partes de la hoja de arveja.

Para la evaluación de la formación de nudos en la planta, se distinguió entre la fase vegetativa y reproductiva. Estas fases estuvieron bien definidas, en cuanto que una vez se inició la fase reproductiva, las yemas axilares no formaron ramas sino únicamente flores.

En la fase reproductiva, se determinó el número de flores por nudo del tallo y las ramas. Se calculó la relación entre el número de nudos flores totales y el número de nudos reproductivos por tallo, y se analizó la distribución resultante. De forma similar, se analizó la relación entre la longitud de la vaina, y la longitud de las partes del fitómero correspondiente.

4.4 Resultados y Discusión

4.4.1 Área de los folíolos

Las plantas a los 42 días después de la siembra tenían en promedio $7,52 \pm 0,3007$ nudos formados. En estos primeros nudos las estípulas fueron más pequeñas que los folíolos, como se puede apreciar en la Tabla 4.1. Posteriormente, con el desarrollo de nuevos fitómeros, las estípulas se hicieron progresivamente más grandes y superaron en tamaño a los folíolos de su respectivo fitómero. Los primeros ocho nudos presentaron hojas de sólo un par de folíolos, ya que las hojas con más folíolos sólo aparecerán después, entre los nudos 10 y 12.

Tabla 4.1. Dimensiones de las partes del fitómero de la planta de arveja, para los primeros 8 nudos vegetativos.

Variable	n	Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Área de la estípula (cm ²)	168	2,7936	2,2296	0,09	11,96
Área del foliolo (cm ²)	125	3,6198	2,1488	0,46	12,82
Longitud de la estípula (cm)	168	2,5169	1,0867	0,36	6,00
Longitud del foliolo (cm)	125	2,8048	0,8461	1,05	5,76

En la Tabla 4.2 se presentan algunas estadísticas descriptivas del tamaño de los foliolos de las hojas de los últimos nudos vegetativos del tallo principal de la planta de arveja (nudos 15 y 16). Un 64,2% de los foliolos provinieron de hojas con cuatro foliolos, un 20,6% provino de hojas con seis foliolos, y el restante 15,2% procedieron de hojas de cinco foliolos. En los casos de hojas de cinco foliolos, el último par foliar no está completo, porque uno de los foliolos está transformado en zarcillo. La forma de los foliolos de la planta de arveja en esta fase fue aproximadamente elíptica, aunque el extremo basal es apuntado.

Tabla 4.2. Estadísticas descriptivas del tamaño de los foliolos de hojas de la planta arveja var. Santa Isabel, para los últimos nudos vegetativos del tallo principal.

Variable	n	Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Área (cm ²)	2949	8,24	2,6337	2,05	17,46
Largo (cm)	2949	4,67	0,8408	2,40	6,78
Ancho (cm)	2949	2,50	0,4349	1,12	3,97

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados de los análisis de regresión para estimar el área de los foliolos a partir de su longitud y ancho para los dos estados de desarrollo de la planta de arveja. En general, se observa que todos los modelos presentan altos coeficientes de determinación r^2 , algunos muy cercanos a la unidad. De acuerdo con Serdar y Demirsoy (2006), los modelos más adecuados se pueden escoger entre los que presenten el menor error estándar (SE) de la estimación. A este concepto se le puede agregar que entre dos modelos que presenten un nivel similar de SE de la estimación, se debe preferir el que utilice menos parámetros para su evaluación.

Siguiendo estos principios, los modelos que incluyen el largo L como el ancho A de los foliolos logran menor SE de la estimación, con la forma $S=\mathbf{b}LA$, para las dos evaluaciones en los dos estados de desarrollo del cultivo. En la Figura 4.2 se aprecia el grado de ajuste entre los valores observados y predichos por el modelo, para cada evaluación. El valor de $\mathbf{b} = 0,68$, difiere del que se ha obtenido para otras especies vegetales.

Tabla 4.3. Modelos para estimar el área de los folíolos S en cm^2 a partir del largo L y el ancho A de los mismos en cm

Evaluación	n	Modelo	SE de la estimación	r^2	b	SE del parámetro	$P > t $
1	622	$S = (LA)^b$	0,23918	0,9595	0,78645	0,0064900	<0,0001
		$S = \mathbf{b}LA$	0,32279	0,9930	0,68026	0,0023000	<0,0001
		$S = L^b$	0,41675	0,8772	1,13300	0,0170300	<0,0001
		$S = \mathbf{b}L^2$	0,71565	0,9655	0,37460	0,0028400	<0,0001
		$S = \mathbf{b}A^2$	0,96180	0,9376	1,08747	0,0112600	<0,0001
2	2950	$S = (LA)^b$	1,07106	0,9989	0,84841	0,0005154	<0,0001
		$S = \mathbf{b}LA$	0,59276	0,9953	0,67893	0,0008587	<0,0001
		$S = L^b$	1,12358	0,9969	1,35343	0,0014000	<0,0001
		$S = \mathbf{b}L^2$	0,81567	0,9911	0,36035	0,0006285	<0,0001
		$S = \mathbf{b}A^2$	0,80636	0,9913	1,26344	0,0021800	<0,0001

S = área del foliolo cm^2 , L = largo del foliolo cm , A = ancho del foliolo cm

$P > |t|$ probabilidad de encontrar valores mayores a t según la distribución t-student, para la prueba de hipótesis $b=0$.

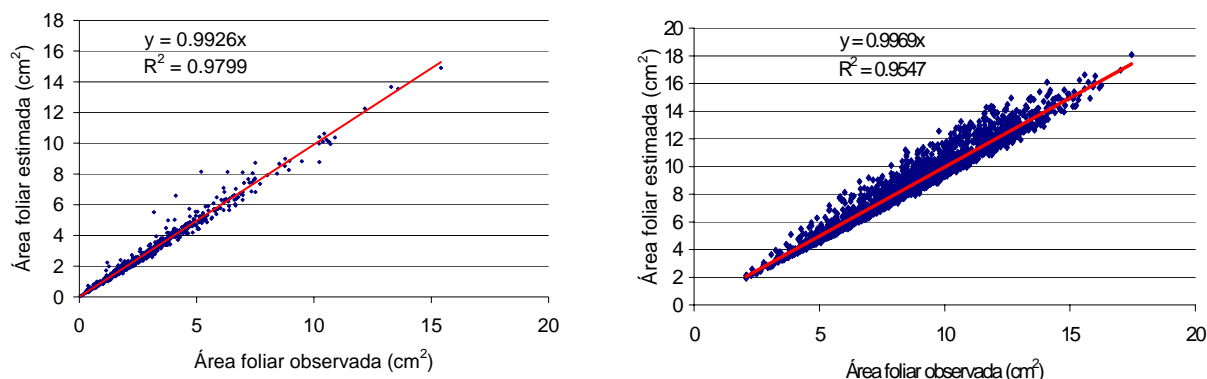


Figura 4.2. Estimación por regresión del área foliar con base en el largo y ancho de los folíolos.

A manera de referencia, si la hoja de arveja fuera una elipse perfecta, el valor del coeficiente de regresión en el modelo propuesto, deducible matemáticamente, sería $\pi/4 = 0,78$. En la medida en que las puntas del foliolo se alarguen y la forma difiera de la elipse, el coeficiente disminuye.

En palma de aceite (*Elaeis guineensis*), Awal *et al.* (2004) estimaron el área foliar de los folíolos a partir de la longitud L y el ancho medio A en cm , con la fórmula: $S = 0,80 (LA)$. Los resultados fueron comparados con las mediciones que arrojó el medidor de área foliar LI-3000a. El coeficiente de correlación fue de $r^2 = 0,99$, y el SE de la estimación fue 0,7477.

En papa, Fleisher y Timlin (2006) tomaron una muestra de hojas para estimar la relación del área foliar S en función de la longitud L y el ancho A , de la forma: $S=0,872LA$ ($r^2=0,93$, $SE = 0,003$). En maíz, Lizaso *et al.* (2003) encontraron que el área foliar de la hoja expandida S de maíz se podía estimar a partir del largo L y el ancho A con la ecuación: $S= 0,765 LA$.

En algunas especies, los modelos seleccionados son más complejos, lo cual aparentemente tiene que ver con la forma de la hoja. Serdar y Demirsoy (2006) obtuvieron un modelo para estimar el área foliar S (cm^2) en castaño (*Castanea sativa*) con base en la longitud L y el ancho A de las hojas en cm , de la forma: $S=3,36+0,11L^2-0,26L^2/A^2+1,10A^2$, con $r^2=0,988$, para 18 genotipos y árboles entre 7 y 70 años de edad. La hoja del castaño tiene bordes aserrados, lo cual seguramente obligó a un modelo más complejo.

De forma similar, Bange *et al.* (2003) propusieron un modelo para el girasol (*Helianthus annuus* L.), que permite estimar el área foliar con base en el largo y anchura de la hoja. El modelo fue $S=11,2L + 12,3A + 0,66 LA$, con $r^2=0,94$. Sin embargo, se encontró un mejor ajuste cuando se analizó la relación separadamente para cada fecha de siembra del cultivo, y cuando se consideró el desarrollo del cultivo, pero no se encontró efecto de genotipo. Es posible que los bordes aserrados de la hoja y el gran tamaño hayan influido en la complejidad del modelo.

En los modelos probados para arveja, no se incluyó en general el intercepto, el cual se asume cero, en cuanto que un foliolo sin dimensiones no posee área. Algunos investigadores han desarrollado modelos lineales para estimar el área foliar, los cuales arrojan un valor de intercepto muy cercano a cero. Rossini *et al.* (2004) obtuvieron diferentes modelos para estimar el área foliar en cm^2 de *Zinnia elegans* (“Liliput” y “Thumbeliana”) y *Zinnia haageana* (“Carpet Persa”), y *Z. elegans* x *Z. angustifolia* (“Profusion Cherry”), especies ornamentales, para el estado de botón floral y de floración, con base en la longitud L y el ancho A de las hojas, en cm . Los modelos para el estado de botón floral fueron: $S=0,0009+0,7765 LA$ (“Profusion Cherry”), $S=0,0021+0,8156 LA$ (“Thumbelina”), $S=0,0031+0,8003 LA$ (“Liliput”), $S=0,0036+0,7719 LA$ (“Carpet Persa”). Para el estado de floración, los modelos fueron: $S=0,0029+0,7899 LA$ (“Profusion Cherry”), $S=0,8318 LA$ (“Thumbelina”), $S=0,001+0,8417 LA$ (“Liliput”), $S=0,0042+0,7230 LA$ (“Carpet Persa”). Se observa que los valores del intercepto en todos los modelos aportan muy poco a la estimación del área, menos de 1 mm^2 .

Un modelo de una sola variable que mostró buen comportamiento para estimar el área de los foliolos de la arveja, especialmente en la segunda evaluación, fue:

$$S=\mathbf{b}L^2 \tag{4.1}$$

La curva correspondiente se presenta en la Figura 4.3. Obviamente, la ventaja práctica es que el tiempo de evaluación se reduce a la mitad, en cuanto que no es necesario medir el ancho de los foliolos. Además, el coeficiente \mathbf{b} difiere en menos del 4% entre las dos evaluaciones (0,3746 y 0,3604, en orden de evaluación).

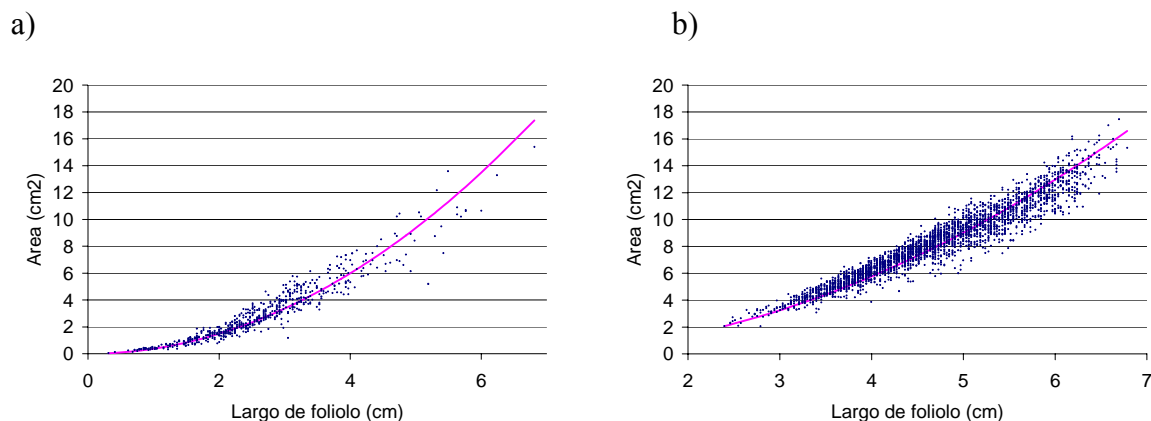


Figura 4.3. Relación entre el área (cm²) y la longitud (cm) del foliolo de arveja, para dos evaluaciones a los 42 (a) y 62 (b) días después de la siembra, con la ecuación 4.1, y la estimación del coeficiente en la Tabla 4.3.

Como lo mencionan Williams y Martinson (2003), los modelos de una sola variable evitan los problemas de colinearidad entre el ancho y largo de la hoja, y simplifican el procedimiento de medición. Ellos encontraron que para estimar el área foliar S en cm² de la vid (*Vitis labruscana* Bailey cultivar “Niagara” y el híbrido interespecífico “DeChaunac”), a partir del ancho A en cm, se pueden usar las siguientes ecuaciones: $S = 0,637 A^{1,995}$, $r^2=0,9821$, SE 10,58, para “Niagara”, y $S = 0,672 A^{1,963}$, $r^2=0,9632$, SE 5,67, para “DeChaunac”.

Para finalizar, el análisis de residuales del modelo propuesto con una sola variable para arveja, indica que la distribución normal no se ajusta bien a los datos observados según la prueba de Kolmogorov-Smirnov ($P=0,01$). Este resultado se debe en parte a la presencia de sesgo negativo, en cuanto que la ecuación tiende a arrojar en algunos casos una estimación de área foliar mayor a la real.

La presencia de sesgo negativo en los residuales se explica por la existencia de algunos folíolos que no tienen la forma elíptica típica, sino que poseen algunas salientes que terminan hacia la parte media del foliolo, y que aumentan el ancho pero no así mismo el área. Posiblemente, una estimación más precisa del área foliar en estos casos se puede lograr con una medida de ancho adicional (ancho sobre y bajo la saliente, Figura 4.4).

En hojas irregulares, pueden proponerse más de una forma de medir las dimensiones de la hoja. Lu *et al.* (2004) evaluaron diferentes modelos para estimar el área foliar del taro (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) con métodos no destructivos. Debido a la forma acorazonada de hoja, existen tres puntos de referencia para tomar medidas de largo y ancho: los extremos apical y basal, la base sinusal (corresponde a la parte hendida del corazón), y el punto de inserción del pecíolo (que se hace un poco por debajo de la base sinusal). Los modelos que presentaron las estimaciones más precisas usaron la longitud máxima de la hoja y longitud desde la base sinusal al ápice (L_{as}), o la longitud del punto de inserción del pecíolo al ápice de la hoja (L_{ap}) y el ancho de la hoja (ancho máximo, ancho foliar pasando por el punto de inserción del pecíolo y perpendicular a L_{ap} , o el ancho de la

hoja pasando por la base sinusal y perpendicular a L_{as}). En general todos los modelos presentaron coeficientes de determinación altos ($r^2 > 0,90$). Por ejemplo, cuando se tomó la longitud desde la base sinusal hasta el ápice para estimar el área foliar con un modelo lineal, el coeficiente de regresión fue de $0,70 \pm 0,025$ (promedio \pm SE).



Figura 4.4. Algunas formas irregulares de los folíolos de arveja

Para resolver el problema de la distribución asimétrica de los residuales sin complicar las medidas de campo, se puede utilizar la distribución de valores extremos de Weibull, que permite ajustarse a formas asimétricas. Aunque el resultado de la prueba de bondad de ajuste no es favorable (Cramer-von Mises, $P < 0,01$), el nivel de error en que incurre es pequeño y no tiene importancia a nivel práctico. Como se aprecia en la Tabla 4.4, en el cuantil del 5% la diferencia entre el valor observado y el propuesto por el modelo Weibull es de $0,21 \text{ cm}^2$. La importancia de ajustar un modelo a los residuales reside en la posibilidad de construir intervalos de confianza adecuados.

Tabla 4.4. Cuantiles para la distribución observada y esperada con las distribuciones normal y Weibull en el error de estimación del área foliar (cm^2) con base en el largo L del foliolo (cm) según el modelo $S = bL^2$. $n = 2950$

%	Observado	Normal	Weibull
1	-2,37695	-1,75949	-2,02557
5	-1,48862	-1,20947	-1,28257
10	-0,98554	-0,91625	-0,91166
25	-0,25007	-0,42630	-0,34485
50	0,26400	0,11807	0,20298
75	0,64763	0,66243	0,67195
90	0,96169	1,15238	1,03757
95	1,17753	1,44560	1,23502
99	1,60290	1,99562	1,56963

En general, estos resultados confirman las apreciaciones de varios investigadores que utilizan medidas de la longitud y ancho de las hojas para estimar el área foliar, en cuanto a las ventajas que tiene este método por su sencillez (no se requieren costosos equipos), seguimiento no destructivo del crecimiento vegetal, y precisión respecto a los métodos destructivos.

4.4.2. Estimación del área de la hoja

La hoja compuesta de la arveja consta de diferente número de folíolos, según su desarrollo, desde 2 hasta 6. Como se verá en los resultados expuestos, los folíolos de una misma hoja guardan entre sí una relación de tamaño que se pueden utilizar ventajosamente para estimar el área foliar total a partir de algunas medidas estratégicas de las partes del fitómero. En este análisis, se parte de la medida de longitud de los folíolos, con la cual se estima el área de los folíolos con los modelos presentados en la sección 4.4.3.

A lo largo de la hoja, los folíolos variaron de tamaño, disminuyendo en la medida en que se alejaron del tallo, de modo que los folíolos distales fueron más pequeños que los proximales de la misma hoja. En la Tabla 4.5 se muestra esta relación de tamaños en área foliar, según lo cual, el segundo par de folíolos tiene un tamaño relativo del 70,42% el tamaño del primer par de folíolos, y el tercer par de folíolos, un tamaño correspondiente al 51,81% del primer par.

Tabla 4.5. Área de los folíolos de la hoja de arveja (cm²/foliolo) según el par foliar al que corresponden en la hoja, y razón de tamaño con respecto al primer par de folíolos.

Par foliar	n	Area/foliolo (cm ²)	*	SD	Razón de tamaño
1	632	10,21	a	2,108	1,0000
2	632	7,19	b	1,709	0,7042
3	128	5,29	c	1,038	0,5181

* Promedios con letras diferentes señalan diferencias significativas según la prueba Tukey (P<0,05)

Los resultados del análisis de correlación para determinar la estructura del fitómero más adecuada para estimar el área de la hoja, se presentan en la Tabla 4.6, para tallo principal y ramas. Se observa que la longitud del pecíolo de la hojas en el tallo principal, se correlacionó con la longitud de la estípula ($r^2=0,86$; $P<0,01$), la longitud del primer par de folíolos ($r^2=0,89$; $P<0,01$), y la longitud del segundo par de folíolos ($r^2=0,82$; $P<0,01$). A nivel de las ramas, de forma similar, la longitud del pecíolo se correlacionó con la longitud de la estípula ($r^2=0,90$; $P<0,01$), la longitud del primer par de folíolos ($r^2=0,88$; $P<0,01$), y la longitud del segundo par de folíolos ($r^2=0,79$; $P<0,01$).

Esto significa que la longitud del pecíolo es una medida útil para estimar el área de la hoja. Sin embargo, es importante tener en cuenta algunas condiciones que se exponen a continuación, que pueden ayudar a mejorar las estimaciones, y que tienen que ver con el número de folíolos por hoja.

Tabla 4.6. Coeficientes de correlación simples de Pearson y número de observaciones para la longitud de algunas las estructuras de la hoja de arveja y su estípula correspondiente, en el tallo principal y las ramas de la planta de arveja a los 112 días después de la siembra

Estructura	Estructura	Estípula	Foliolos del primer par	Foliolos del segundo par
Tallo	Entrenudo del tallo	0,5303 (173)	0,2578 (217)	0,2812 (178)
	Pecíolo	0,8578 (147)	0,8915 (218)	0,8168 (178)
	Raquis del 2 ^{do} par foliar	0,7514 (124)	0,8293 (185)	0,7266 (180)
Ramas	Entrenudo del tallo	0,7026 (732)	0,5661 (818)	0,5803 (564)
	Pecíolo	0,8978 (644)	0,8761 (820)	0,7911 (565)
	Raquis del 2 ^{do} par foliar	0,8544 (457)	0,8607 (610)	0,8311 (566)

Nota: Todos los coeficientes fueron significativamente diferentes de cero ($P < 0,05$)

En la Tabla 4.7 se presentan los resultados del análisis de regresión para la longitud de los foliolos de la hoja de arveja con base en la longitud del pecíolo y del raquis. En general, los modelos son lineales y el intercepto no es significativamente diferente de cero. Además, la longitud del pecíolo es suficiente para estimar la longitud de cualquier par foliar de la hoja. Los modelos respectivos para estimar la longitud de los foliolos en función de la longitud del foliolo, se encuentran graficados en la Figura 4.5.

Como el número de foliolos en la hoja compuesta de la arveja es variable según el desarrollo de la planta, la estimación del área de la hoja debe hacerse sumando el área de los foliolos según su ubicación en la hoja, en el primer, segundo o tercer nudo foliar.

Para hojas con un sólo par foliar resulta mejor medir la longitud de un foliolo y hacer la estimación del área directamente con la ecuación 4.1, en vez de medir la longitud del pecíolo. Para hojas con dos o tres pares de foliolos se usan las ecuaciones de la Tabla 4.7.

Los foliolos que se presentaron opuestos en un mismo nudo foliar tuvieron un área muy similar. El análisis de correlación del área foliar entre pares de foliolos opuestos de una misma hoja, arrojó un valor $r^2=0,949$, y la longitud promedio no difiere en más de 0,01 cm^2 , como se observa en la Tabla 4.8, donde se presentan los promedios de área foliar para cada lado de la hoja de arveja, descartando los foliolos impares. De esta forma, el área foliar se puede trabajar por pares de foliolos opuestos, multiplicando por dos el área de uno de los foliolos.

Tabla 4.7. Modelos para estimar la longitud de los foliolos L a partir de la longitud del pecíolo P y del raquis R ($n=32$)

Modelo	SE del modelo	r^2	a	SE	b	SE
$L_1 = \mathbf{a} + \mathbf{b}P$	0,47778	0,8002	0,10839	0,32060	0,65944	0,05918
$L_2 = \mathbf{a} + \mathbf{b}P$	0,37895	0,8551	-0,16106	0,25429	0,63478	0,04694
$L_3 = \mathbf{a} + \mathbf{b}P$	0,38715	0,8100	-0,24642	0,25979	0,55124	0,04796
$L_2 = \mathbf{a} + \mathbf{b}R_1$	0,44308	0,8018	-0,07218	0,29871	0,94592	0,08446
$L_3 = \mathbf{a} + \mathbf{b}R_2$	0,52361	0,6524	0,12462	0,34183	0,71422	0,09363
$L_1 = \mathbf{b}P$	0,47112	0,9843			0,67877	0,01514
$L_2 = \mathbf{b}P$	0,37539	0,9875			0,60607	0,01206
$L_3 = \mathbf{b}P$	0,38655	0,9812			0,50731	0,01242
$L_2 = \mathbf{b}R_1$	0,43652	0,9831			0,92620	0,02148
$L_3 = \mathbf{b}R_2$	0,51647	0,9664			0,74712	0,02463

Ninguno de los interceptos \mathbf{a} fue significativamente diferente de cero según la prueba t.

Todos los coeficientes \mathbf{b} fueron significativamente diferentes de cero, según la prueba t

L_1, L_2, L_3 , se refieren a la longitud del foliolo del primer, segundo y tercer par, de la parte basal a apical de la hoja. R_1, R_2 , se refieren al raquis del segundo y tercer par foliar de la hoja.

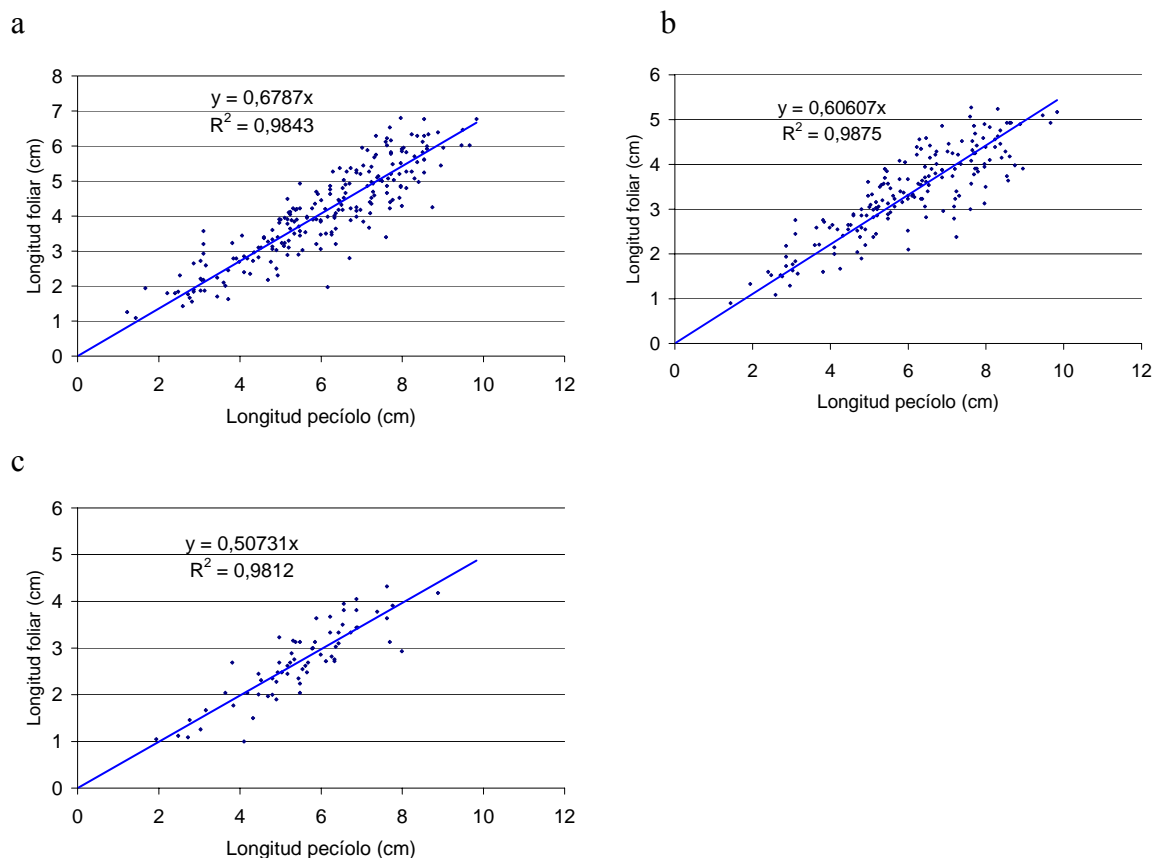


Figura 4.5. Relaciones de la longitud del pecíolo con la longitud de los foliolos de la hoja compuesta de arveja: a) longitud del primer par foliar, b) longitud del segundo par foliar, c) longitud del tercer par foliar.

Tabla 4.8. Simetría longitudinal del área foliar (cm²) de las hojas de la planta de arveja var. Santa Isabel.

Lado de la hoja	N	Área foliar (cm ²)	SD	Mínimo	Máximo
A	642	4,72	0,5429	2,65	6,06
B	642	4,73	0,5326	3,14	6,05

En general, los altos coeficientes de determinación que arrojan estos modelos son consistentes con lo expuesto por otros investigadores que trabajaron en especies vegetales de hojas compuestas, para estimar el área de la hoja con base en algunas de sus partes. Gamper (2005) encontró una relación funcional entre la longitud del foliolo terminal y el área de la hoja trifoliada en trébol (*Trifolium repens* cultivar Milkanova). El logaritmo natural del área se estimó con base en el logaritmo de la longitud del foliolo terminal, con altos coeficientes de determinación ($0,959 \leq r \leq 0,986$), pero con parámetros significativamente diferentes según el material genético. Las pendientes de la función lineal fueron de 2,191 y 1,884 para los genets G y J, respectivamente.

De Jesús *et al.* (2001) compararon dos métodos para estimar el área foliar en frijol (*Phaseolus vulgaris* L. cultivar Carioca). Uno de los métodos fue medir el ancho del foliolo central (A) en cm, y estimar el área foliar S en cm² con la fórmula: $S = 2,1371 \cdot A^{1,9642} - 2,7013$. El otro método consistió en la utilización del LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Los resultados de los dos métodos mostraron una alta correlación ($r^2 = 0,97$).

4.4.3 Área de las estípulas

En forma similar a la longitud de los foliolos en las hojas de arveja, y tal como se observa en la Tabla 4.6, la longitud de la estípula correlacionó bien con la longitud del pecíolo ($r^2 = 0,86$ y $0,90$ en el tallo principal y las ramas), pero esta relación es aplicable a fitómeros con hojas de 4 o más foliolos. Como ya se anotó anteriormente, el tamaño de la estípula para los primeros nudos del tallo fue en general menor que el tamaño de los foliolos del fitómero correspondiente. En la Tabla 4.9 se presentan dos modelos para estimar la longitud de la estípula con base en la longitud del pecíolo.

Tabla 4.9. Modelos para estimar la longitud de las estípulas E (cm) a partir de la longitud del pecíolo P (cm), en hojas con mínimo cuatro foliolos.

Modelo	SE del modelo	r ²	a	SE	b	SE
$E = a + bP$	0,64845	0,8314	0,54761	0,43513	0,99298	0,08032
$E = bP$	0,65434	0,9882			1,09061	0,02103

En el modelo lineal, el intercepto no resultó significativamente diferente de cero según la prueba t ($P > 0,05$), por lo cual, el modelo sin intercepto resulta adecuado (Figura 4.6). El valor del coeficiente de regresión b es cercano a la unidad, indicando una relación de espaciamiento necesario para evitar sombrear los folíolos con la estípula en un mismo fitómero. Con base en la longitud de la estípula, el área foliar se estima con el mismo modelo que se emplea para los folíolos (Ecuación 4.1).

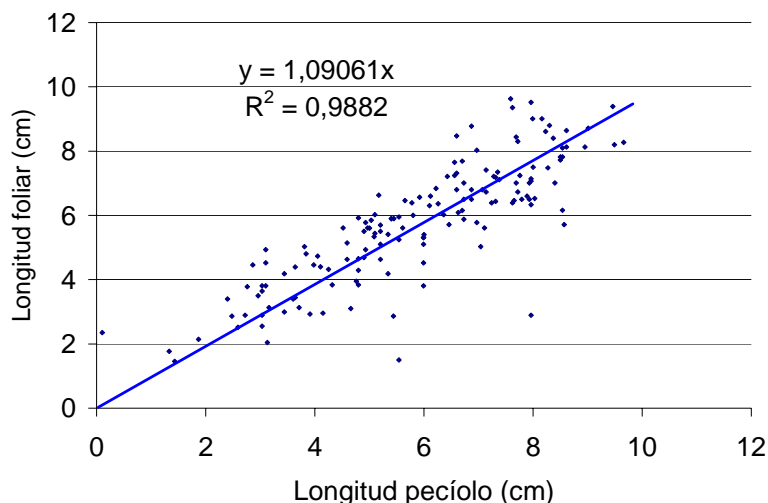


Figura 4.6. Relación de la longitud del pecíolo y la longitud de la estípula .

4.4.4 Crecimiento del tallo y ramas

La longitud de los entrenudos, como se observó en la sección 4.4.2 y en la Tabla 4.6, no guardó una correlación alta con la longitud de las partes de la hoja o de la estípula. Como se verá en esta sección, el crecimiento del tallo tiene un comportamiento particular, que le permite reaccionar al ambiente en forma diferente a como lo hacen las hojas. Por ejemplo, Muth y Bazzaz (2002) observaron una reacción diferente a la radiación fotosintéticamente activa (PAR) del tallo, los pecíolos y las hojas en plántulas del árbol *Betula papyrifera* Marshall. Ellos colocaron cada plántula bajo el efecto de dos ambientes contrastantes de luz, separados espacialmente, en un diseño factorial de niveles de PAR con diferente relación de Rojo:Rojo lejano (R:FR). Los pecíolos no respondieron orientándose hacia ningún tratamiento de luz. En cambio, la orientación de la lámina foliar y la inclinación del tallo se dirigieron hacia la zona de mayor PAR, sin importar el tratamiento de R:FR. El desarrollo del tallo y las ramas se puede expresar en cuanto al número de nudos y la longitud de los entrenudos. A continuación se revisan por separado estas dos variables.

4.4.5 Crecimiento del tallo

El número de nudos formados en el tallo principal a los 112 días después de la siembra, fue de $22,76 \pm 0,43$ (promedio y SE). Algunas plantas desarrollaron hasta 36 nudos. La longitud de los entrenudos fue en promedio de $4,56 \pm 0,13$ cm. Sin embargo, se observó gran variabilidad a nivel de campo (coeficiente de variación de 49,3%), por las condiciones heterogéneas del terreno.

La longitud de los entrenudos del tallo guardó una correlación media con la longitud de la estípula correspondiente en el fitómero ($r^2=0,53$; $P<0,01$). Sin embargo, la correlación mejoró sustancialmente cuando se consideraron únicamente los nudos vegetativos ($r^2=0,81$; $P<0,01$), lo cual se explica porque el crecimiento vegetativo en general va en aumento hasta cuando llega a su punto máximo con el inicio de la floración. La longitud de los entrenudos en las ramas guardó una mejor correlación con la longitud de la estípula ($r^2=0,70$; $P<0,01$), comparada con los tallos.

Tal como se observa en la Figura 4.7, la longitud de los entrenudos en el tallo principal fue en aumento hasta cuando se alcanzó el nudo 19. La longitud del tallo estuvo afectada por diferentes condiciones y prácticas de manejo. Un tutorado tardío hace que la planta se volque y el tallo se doble y alargue por el lado de los entrenudos que están en desarrollo para enderezarse. Además, con el inicio de la floración y el desarrollo de ramas, el tallo puede verse afectado por la competencia por luz. Con esto se explica la baja correlación de la longitud de los entrenudos con las demás partes del fitómero.

4.4.6 Crecimiento de las ramas

El desarrollo de las ramas en el tallo principal mostró claramente dos fases, una de ramificación inicial (Fase I), que ocurrió con la emergencia de las plantas, y otra que arrancó con la floración (Fase II). Entre estas dos fases, ocurrió un periodo de transición, en el cual ciertos nudos del tallo no ramificaron o lo hicieron con poca frecuencia. Según la Figura 4.8a, el nudo 6 fue el que presentó la menor frecuencia de ramificación, y marca el límite entre las dos fases. Por otra parte, el nudo 13 mostró la mayor frecuencia de ramificación en general. En la fase II se observó la ocurrencia del 80% de las ramas totales por planta.

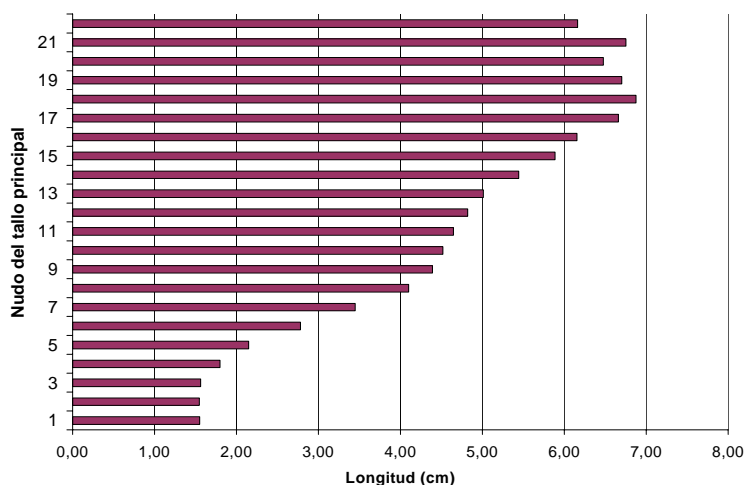


Figura 4.7. Longitud de entrenudos del tallo principal de la planta de arveja var. Santa Isabel, para el cultivo del CAM semestre B de 2004

En la Figura 4.8b se presenta el tamaño de las ramas expresada en número de nudos formados, según el nudo de procedencia del tallo principal. Se observa claramente una tendencia suave a disminuir el tamaño a medida que se asciende en el tallo principal. La tendencia que se ajusta a esta curva corresponde a una caída logarítmica, tal como se expresa en el modelo de la Figura 4.8b.

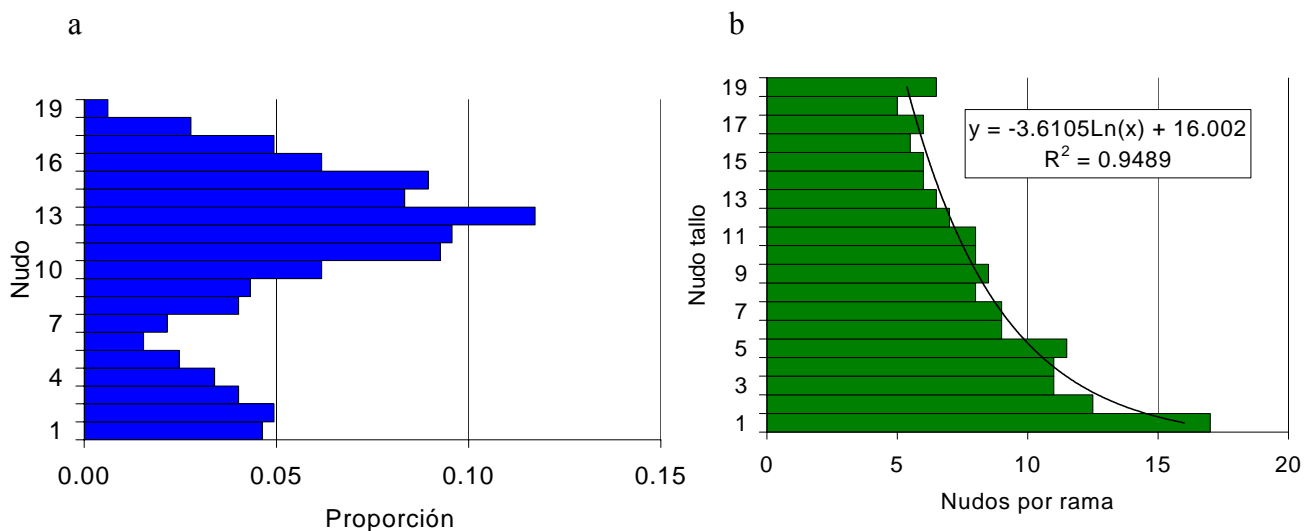


Figura 4.8. Desarrollo de ramas en el tallo principal de arveja. a) Frecuencia relativa de ramificación según el nudo del tallo principal de la planta de arveja var. Santa Isabel (324 ramas de 28 plantas), y b) mediana del número de nudos por rama según el nudo de procedencia en el tallo principal de la planta de arveja var. Santa Isabel.

Aunque las ramas de la Fase I constituyeron sólo un 20% de las ramas totales por planta, como procedieron de los primeros nudos basales, formaron tantos nudos como el tallo principal con el consecuente aumento en la producción de vainas por planta.

En cuanto a la longitud de los entrenudos en las ramas, los resultados son similares a los expuestos al nivel del tallo principal de la planta de arveja (Cuadro 9). Sin embargo, la longitud promedio de los entrenudos fue mayor en las ramas respecto al tallo principal (5,27 y 4,56 cm respectivamente). En contraste, las dimensiones de las láminas foliares fueron más pequeñas en las ramas (estípulas y folíolos), lo cual es un reflejo de la competencia por luz entre ramas de una misma planta.

4.4.7 Número y longitud de vainas

4.4.7.1 Número de flores y vainas

El número de flores que se desarrollaron en el tallo principal de la planta de arveja, dependió en primer lugar del número de nudos reproductivos, dado que cada nudo produce uno o dos flores únicamente. En condiciones ambientales desfavorables, la planta puede perder el nudo y no desarrollar flores, pero en este ensayo no se observó este caso.

El promedio del número de flores en el tallo principal fue de $9,93 \pm 0,4202$, sobre 56 plantas evaluadas a los 96 días después de la siembra. Esto significa que el promedio de flores por nudo fue de $1,6731 \pm 0,0416$, con mediana en 1,75. El número de flores formadas por nudo reproductivo en las ramas, fue en promedio de 1,5530 a los 112 días después de la siembra, por debajo del promedio que se obtuvo en el tallo principal. Cuando el nudo reproductivo desarrolló dos vainas, la primera generalmente fue mayor que la segunda, pero los tamaños guardaron una correlación marcada entre sí ($r^2=0,90$; $P<0,01$).

El número observado de nudos reproductivos por tallo es consistente con los resultados de otros investigadores. Jeuffroy y Devienne (1995), observaron entre 5 y 10 nudos reproductivos en el tallo principal de la arveja, con densidades entre 61 y 257 tallos/m². De forma similar, Roche y Jeuffroy (2000) observaron que el número de nudos reproductivos en arveja estuvo entre 4,8 y 11,3 en 25 ensayos de campo. El número de nudos reproductivos es una característica que muestra variabilidad y afecta directamente la productividad del cultivo de arveja.

El número de vainas por tallo es similar al que observaron Estupiñan y Fandiño (1986) en arveja Guatecana, entre 9-13 vainas, para los tratamientos que recibieron un adecuado control de malezas en las etapas iniciales de desarrollo.

4.4.7.2 Tamaño de las vainas

Las vainas presentaron en promedio una longitud de $5,76 \pm 0,1046$ (promedio \pm SE) sobre 147 observaciones, que corresponde con $5,4836 \pm 0,1789$ g de peso/vaina, y 6 granos/vaina aproximadamente.

No se presentó correlación entre la longitud de la vaina y las dimensiones de las estructuras del fitómero correspondiente, como se observa en el Cuadro 4.10. Esto se debe a que la longitud de las vainas varió mucho menos que los tamaños de las otras estructuras de la planta, lo cual es importante, porque la productividad de un cultivo dependerá principalmente del número de las vainas y en segundo lugar, del tamaño de las mismas.

Tabla 4.10. Correlaciones de la longitud mediana de las vainas y la mediana de diferentes partes del fitómero de la planta de arveja en el tallo principal.

Medianas de partes del fitómero	n	r	$P> r $, $H_0: \rho=0$
Longitud de entrenudo	51	0,1807	0,2045
Longitud de pecíolo	44	0,1337	0,3870
Longitud del raquis del 2do par foliar	43	0,1923	0,2167
Longitud de la estípula	26	-0,0634	0,7584
Longitud del foliolo del 1er par	29	0,1365	0,4803
Longitud del foliolo del 2do par	31	-0,0572	0,7600

4.5 Conclusiones

El crecimiento de las láminas foliares y sus estructuras de soporte es proporcional, de modo que la medida de una de sus dimensiones permite estimar las otras.

El área de los folíolos y de las estípulas se puede estimar con base en el largo y ancho de los mismos, lo cual permite hacer un seguimiento no destructivo al crecimiento foliar. La relación se mantuvo prácticamente invariable en las dos etapas de crecimiento del cultivo: vegetativa y reproductiva.

El área foliar de folíolos y estípulas se puede estimar con base en la longitud de la lámina únicamente, lo cual, aunque reduce la precisión de la estimación, también reduce a la mitad el tiempo de evaluación.

El área foliar de la hoja compuesta de la arveja se estimó con base en la longitud del pecíolo y el número de folíolos presentes por hoja. Ésto se debe a que existe una proporción entre el tamaño de los folíolos y la separación de los mismos de acuerdo con la longitud del ráquis y del pecíolo.

La longitud de los entrenudos no mostró una buena correlación con el tamaño de las hojas. Esto significa que los alargamientos del tallo por volcamiento de la planta y competencia, no conducen a un crecimiento proporcional en el tamaño de las láminas foliares.

Hay dos fases de ramificación durante el crecimiento de la planta de arveja, que corresponden con la emergencia y la floración.

La ramificación de emergencia resulta más efectiva para aumentar la productividad del cultivo, pero su efecto es similar a un aumento en la densidad de siembra, por lo cual, es importante valorar mejor el desarrollo de la planta para definir las distancias de siembra adecuadas.

La productividad de la planta de arveja depende en forma importante del número de nudos reproductivos desarrollados, tanto en el tallo principal como en las ramas. Las variaciones de tamaño de las vainas no explicaron una mayor productividad, aunque eso no excluye que ocurran vainas de mejor tamaño bajo condiciones favorables, lo cual redundaría en la calidad.

La planta tiende a formar vainas de una longitud promedio uniforme, por lo cual la correlación con la longitud de otras estructuras no fue significativa.

4.8 Literatura citada

Awal, M.A., W. Ishak, J. Endan y M. Haniff. 2004. Regression model for computing leaf area and assessment of total leaf area variation with frond ages in oil palm. *Asian Journal of Plant Sciences* 3: 642-646.

Balci, P. y J.H. Kennedy. 2003. Measures of plant surface-areas for eurasian watermilfoil and water stargrass. *Journal of Aquatic Plant Management* 41: 119-122.

- Bange, M.P., G.L. Hammer, S.P. Milroy y K.G. Rickert. 2000. Improving estimates of individual leaf area of sunflower. *Agronomy* 92:761–765
- De Kroon, H., H. Huber, J.F. Stuefer y J.M. van Groenendael. 2005. Research review. A modular concept of phenotypic plasticity in plants. *New Phytologist* 166: 73–82
- De Jesús jr., W.C., F.X.R. do Vale, R.R. Coelho y L.C. Costa. 2001. Comparison of two methods for estimating leaf area index on common bean. *Agronomy Journal* 93:989–991.
- Demirsoy, H., L. Demirsoy, S. Uzun y B. Ersoy. 2004. Non-destructive leaf area estimation in peach. *European Journal of Horticultura Science* 69:144-146.
- Duke, J.A. 1981. Hand book of legumes of world economic importance. Plenum Press, New York. pp.199-265.
- Emery, R.J., N.G. Munier-Jolain, A.S Voisin y C. Salon. 2002. Na⁺ content of xylem sap is closely related to root biomass in pea (*Pisum sativum*): A potential tool for studying root growth under controlled conditions and in the field. *Canadian Journal of Plant Science*. 82: 567–577.
- Elings, A. 2000. Estimation of Leaf Area in Tropical Maize. *Agronomy Journal* 92:436–444.
- Enquist, B.J. 2002. Universal scaling in tree and vascular plant allometry: toward a general quantitative theory linking plant form and function from cells to ecosystems. *Tree Physiology* 22: 1045–1064.
- Estupiñan, J.A., A. Fandiño. 1986. Determinación de la época crítica de competencia de malezas en arveja (*Pisum sativum* L.). Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Bogotá. 83 p.
- Fleisher, D.H. y D.J. Timlin. 2006. Modeling expansion of individual leaves in the potato canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* (en impresión)
- Forbush, J. y A. Richardson. 1998. Sassafras allometry at Totoket Mountain, North Branford, CT. Yale University School of Forestry & Environmental Studies. En: <http://www.yale.edu/fes519b/totoket/allom/allom.htm>. Consultado 11 septiembre de 2006
- Gamper, H. 2005. Nondestructive estimates of leaf area in white clover using predictive formulae: the contribution of genotype identity to trifoliolate leaf area. *Crop Science* 45:2552
- Hatam, M. y Amanullah. 2001. Grain yield potential of garden peas (*Pisum sativum* L.) Germplasm. *On Line Journal of Biological Sciences* 1 (4): 242-244.

- Igathinathane, C., V.S. Prakash, U. Padma, G. Ravi y A.R. Womac. 2006. Interactive computer software development for leaf area measurement. *Computers and Electronics in Agriculture* 51: 1–16.
- Jeuffroy, M. y F. Devienne. 1995. A simulation model for assimilate partitioning between pods in pea (*Pisum sativum* L.) during the period of seed set; validation in field conditions. *Field Crops Research* 41: 79-89.
- Jonckheere, I., S. Fleck, K. Nackaerts, B. Muys, P. Coppin, M. Weiss y F. Baret. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 19–35
- Kurt, O., H. Uysal y S. Uzun. 2005. Non-destructive leaf area estimation of flax (*Linum usitatissimum* L.). *Pakistan Journal of Botany* 37: 837-841.
- Lizaso, J.I., W.D. Batchelor, K.J. Boote, M.E. Westgate, P. Rochette y A. Moreno-Sotomayor. 2005. Evaluating a Leaf-Level Canopy Assimilation Model Linked to CERES-Maize. *Agronomy Journal* 97: 722-733.
- Lu, H.Y., C.T. Lu, M.L. Wei y L.F. Chan. 2004. Comparison of different models for nondestructive leaf area estimation in Taro. *Agronomy Journal* 96: 448.
- Marx, G. 2001. On the pea plant. *Compendium of pea diseases and pests*. American Phytopathological Society. 2nd edition. Minnesota, USA.
- Mathieu, A., P.H. Cournède y P. DeReffye. 2004. The influence of photosynthesis on the number of metamers per growth unit in GreenLab model. En: Godin, C., J. Hanan, W. Kruth, A. Lacoite, A. Takenaka, P. Prusinkiewicz, T. DeJong, C. Beveridge y B. Andrieu. (eds.). 4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models, Montpellier, France, 7-11 junio. p 248-252.
- Monteith, J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philo. Trans. R. Soc. London, Ser. B* 281. pp 277–294.
- Muth, C.C. y F.A. Bazzaz. 2002. Tree seedling canopy responses to conflicting photosensory cues. *Oecologia* 132:197–204.
- Niklas, K.J. y E.D. Cobb. 2005. N, P, and C stoichiometry of *Eranthis hyemalis* (Ranunculaceae) and the allometry of plant growth. *American Journal of Botany* 92: 1256–1263.
- Rossini, A.C., T.de J. Deléo, J.C. Barbosa y I.C. Leite. 2004. Leaf area prediction models for *Zinnia elegans* JACQ., *Zinnia haageana* REGEL and ‘Profusion cherry’. *Scientific Agriculture (Piracicaba, Brazil)* 61: 47-52.
- Serdar, Ü. y H. Demirsoy. 2006. Non-destructive leaf area estimation in chestnut. *Scientia Horticulturae* 108: 227–230.

Timmerman-Vaughan, G., T. Frew, A. Russell, T. Khan, R. Butler, M. Gilpin, S. Murray y K. Falloon. 2002. QTL mapping of partial resistance to field epidemics of ascochyta blight of pea. *Crop science* 42: 2100 -2111.

Truong, H.H. y C. Duthion. 1993. Time of flowering in pea (*Pisum sativum* L.) as a function of leaf appearance rate and node of first flower. *Annals of Botany* 72:133–142.

Vile, D., E. Garnier, B. Shipley, G. Laurent, M.L. Navas, C. Roumeti, S. Lavorel, S. Díaz, J.G. Hodgson, F. Lloret, G.F. Midgley, H. Poorter, M.C. Rutherford, P.J. Wilson y I.J. Wright. 2005. Specific leaf area and dry matter content estimate thickness in laminar leaves. *Annals of Botany* 96: 1129–1136.

West, G.B. y J.H. Brown. 2005. The origin of allometric scaling laws in biology from genomes to ecosystems: towards a quantitative unifying theory of biological structure and organization. *The Journal of Experimental Biology* 208: 1575-1592.

Williams III, L. y T.E. Martinson. 2003. Nondestructive leaf area estimation of ‘Niagara’ and ‘DeChaunac’ grapevines. *Scientia Horticulturae* 98:493–498.

Yan, H.P., M.Z. Kang, P. De Reffye y M. Dingkuhn, 2004. A Dynamic, Architectural Plant Model Simulating Resource-dependent Growth. *Annals of Botany* 93: 591-602

**CAPÍTULO 5. PARÁMETROS FENOLÓGICOS BÁSICOS PARA LA
MODELACIÓN DEL CULTIVO DE ARVEJA (*Pisum sativum* L.) BAJO
CONDICIONES DE LA SABANA DE BOGOTÁ**

5.1 Resumen

Uno de los factores más importantes que determinan la duración de los estados fenológicos y el ciclo del cultivo de arveja, es la temperatura. En esta investigación se hicieron observaciones del crecimiento de las plantas de arveja var. Santa Isabel en cuatro ambientes de la Sabana de Bogotá (2640 m.s.n.m., 14 °C, 80% H.R., 800 mm de lluvia/año), Colombia: dos bajo invernadero ($21\pm 2,5$ °C, promedio \pm SD) y dos a campo abierto ($13,9\pm 1,2$ °C). Se evaluó el tiempo a emergencia, la tasa de aparición de nudos en el tallo principal, el inicio de la floración, y la duración del ciclo de la siembra hasta cosecha. Se encontró que la temperatura bajo invernadero aceleró la emergencia de las plantas, pero las siguientes etapas fenológicas difirieron poco en su duración respecto al cultivo a campo abierto. Al parecer, la respuesta del desarrollo vegetal a la temperatura tiene forma dentada, con un rango óptimo entre los 14 y 21 °C, aproximadamente. Los parámetros observados contribuirán a la elaboración de modelos explicativos de crecimiento del cultivo de arveja.

Abstract

Temperature is one of the most important factor that determine phenologic phase duration and cycle length of pea crop. In this research, plant growth of a pea crop var. Santa Isabel was evaluated in four environments in Bogotá flat highland, Colombia (2640 m over sea level, 14 °C, 80% R.H., rainfall of 800 mm/year): two under greenhouse conditions (21.0 ± 2.5 °C) and two in open field (13.9 ± 1.2 °C). Emergence time, apparence node rate at main stem, first node with flower, and cycle length from sown to first harvest were evaluated. It was shown than greenhouse temperature accelerated plant emergence, but the next phenological stages differed a little in duration respect to the open field crop behaviour. Results suggested that optimum temperature to pea development is a range between 14 and 21 °C aprox., in a dent like function. The parameter estimation will be useful to develop explaining models of pea crop growth.

5.2 Introducción

Según la clave BBCH (Meier, 2001), el desarrollo fenológico de la planta de arveja se puede describir con los siguientes estadios: germinación, desarrollo de hojas, crecimiento longitudinal de entrenudos, aparición del órgano floral, floración, formación y maduración de vainas, senescencia.

Se acepta comúnmente que la duración de cada uno de estos estados depende en primer lugar de las condiciones de temperatura. Si la temperatura es alta sin ser excesiva, el desarrollo se acelera. Por el contrario, si la temperatura es baja, el desarrollo se hace lento o se detiene. Se maneja entonces el concepto de grados día (°C d) para calcular la edad fisiológica de los cultivos, cuyo resultado es el mismo de la edad cronológica sólo cuando las condiciones de temperatura son óptimas durante el ciclo de crecimiento (Miller *et al.*, 2001, Stöckle *et al.*, 2003).

Según Miller *et al.* (2001), la duración de algunos de los estados fenológicos de la arveja, contada en grados día ($^{\circ}\text{C d}$) a partir de la siembra, es: entre 198 y 230 para el estado de dos hojas expandidas, 724 a 835 para una floración del 50% de las plantas, 1305 a 1451 para que las semillas comiencen a madurar en un 10%, y 1527-1686 para la madurez completa.

Butler *et al.* (2002) observaron que en trébol (*Trifolium incarnatum* L.), la temperatura es el factor primario que controla la tasa de aparición foliar (RLA), más que la duración del fotoperiodo. La RLA no fue diferente entre los cultivares de maduración intermedia y tardíos. Finalmente, la relación que obtuvieron entre la RLA y la temperatura se ajustó modelos cuadráticos, que lograron un r^2 entre 0,90 y 0,99.

Respecto al inicio de la floración, puede haber variaciones de acuerdo con la susceptibilidad del material vegetal a la temperatura y el fotoperiodo. En soya, Jones *et al.* (1991) desarrollaron un modelo de desarrollo de la floración con base en la temperatura y el fotoperiodo. En arveja, algunas variedades requieren únicamente de un fotoperiodo favorable, otras de una conjugación de temperatura y fotoperiodo. Incluso hay algunas que son insensibles al fotoperiodo (Arjona *et al.*, 1977; Wilson y Robson, 2006).

En condiciones de zona templada, la variación de temperatura y fotoperiodo generalmente van asociadas. Siddique *et al.* (2002), obtuvieron que la siembra tardía de la arveja en el Reino Unido se asociaba con días largos y calurosos, condiciones que aceleraron la maduración de las plantas y condujeron a una cosecha reducida.

Roche *et al.* (1999) probaron diferentes modelos para predecir el inicio de la floración en arveja, utilizando como factores el fotoperiodo, la temperatura promedio, la latitud y la fecha de siembra. El mejor ajuste por mínimo CMEP (cuadrado medio del error de predicción) se obtuvo incluyendo todos los factores excepto la temperatura. Sin embargo, la latitud y la fecha de siembra están correlacionados con la variación estacional de la temperatura y el fotoperiodo.

Poggio *et al.* (2005) estimaron la duración de la fase en la cual se define el número de semillas en arveja. Esta fase comienza con el inicio de la floración y termina cuando el último nudo floral finaliza la etapa susceptible al aborto de semilla. Encontraron que fue de 200 $^{\circ}\text{C}$ con una temperatura base estimada en $T_b = 4^{\circ}\text{C}$.

La temperatura no sólo afecta el desarrollo fenológico del cultivo, sino que además afecta directamente el crecimiento en cuanto altera la respuesta de las enzimas que intervienen en la fotosíntesis (Bernacchi *et al.*, 2001; Farquhar *et al.*, 1980; Farquhar *et al.*, 2001). Además, la actividad de las bacterias simbióticas, presentes en las raíces de arveja, también se ve afectada. Obviamente, temperaturas extremas también pueden favorecer la senescencia (Noode'n *et al.*, 1997).

En éste Capítulo se hizo la evaluación del efecto del clima en el desarrollo de la planta de arveja en cuanto a la tasa de aparición de nudos, el inicio de floración, y el desarrollo de área foliar en la fase vegetativa. Los factores climáticos fueron la temperatura, comparando la condición de invernadero con la de campo, y la radiación incidente. Se estimó el área foliar específica para los ensayos de campo, y la producción de vainas para la estimación

del índice de cosecha. También se evaluó la distribución de materia seca a lo largo del tallo principal, para lo cual se consideraron tres estratos: alto, medio y bajo. Estos parámetros son útiles para el desarrollo de modelos de simulación (Boote, 1995a, Boote, 1995b, Goudriaan *et al.*, 1995, Marcelis *et al.*, 1998).

5.3 Materiales y métodos

Esta investigación se llevó a cabo en el municipio de Mosquera, Cundinamarca (2543 msnm), donde se establecieron cuatro ensayos para la evaluación del crecimiento del cultivo de arveja, tres en el Centro Agropecuario Marengo (CAM) de la Universidad Nacional de Colombia y uno en el Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias Tibaitatá, de CORPOICA. Dos de los ensayos se instalaron bajo condiciones de invernadero y dos en campo abierto (Figura 5.1).

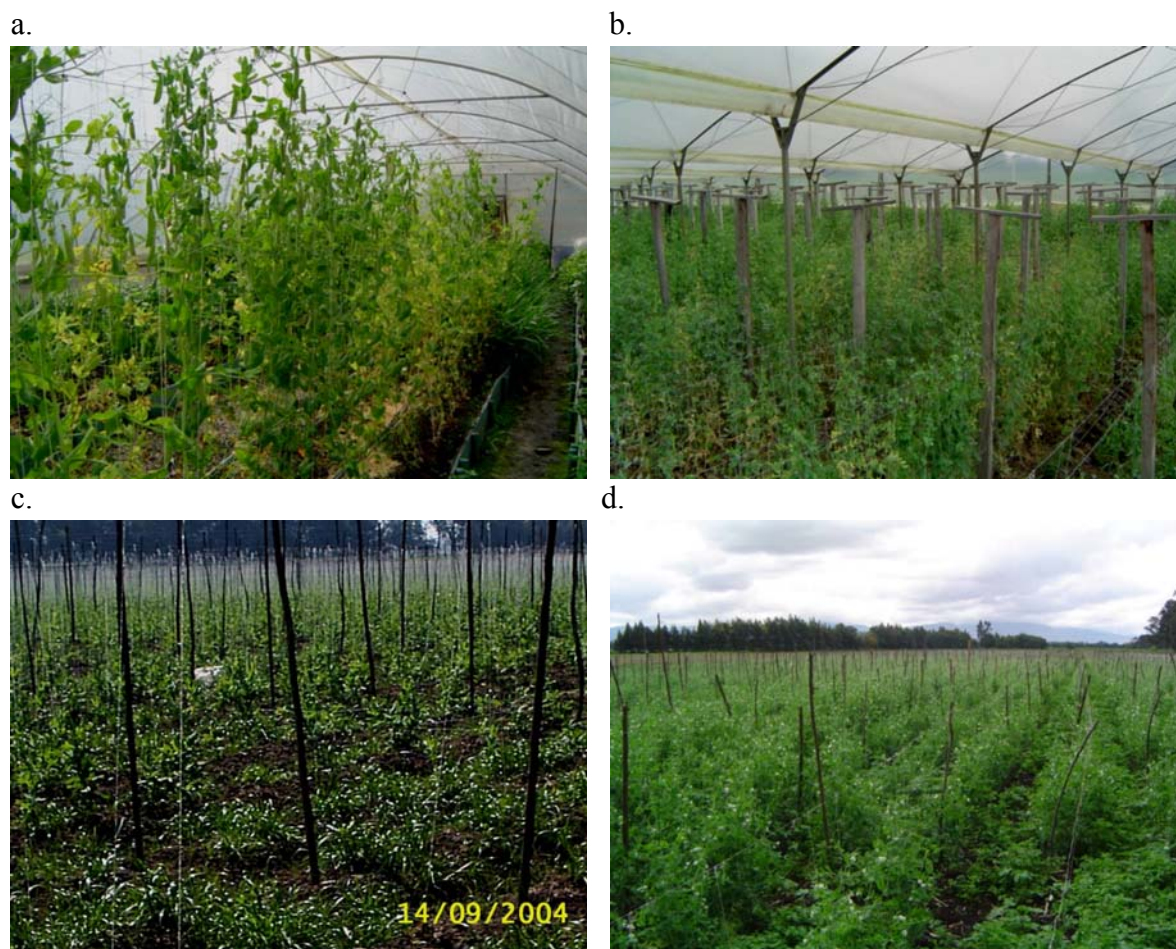


Figura 5.1. Ensayos realizados a. Invernadero túnel en Corpoica Tibaitatá, ensayo IT-2004A, b. Invernadero U.N. CAM, ensayo IC-2004B, c. Campo lote 8 del CAM, ensayo L8-2004B, d. Campo lote 7 del CAM, ensayo L7-2005A. Se aprecia el tutorado de colgadura en todos los casos.

La siembra del ensayo en el invernadero de Tibaitatá se hizo el 2 de abril/2004, a 12,5 plantas m⁻², una profundidad de siembra de dos cm, y se finalizó el 2 de julio/2004. El otro ensayo en invernadero, que se realizó en el CAM, se sembró el 11 de noviembre/2004, a una densidad de 12,3 plantas m⁻², una profundidad de siembra de dos cm, y se cosechó el 3 de marzo/2005. El ensayo en campo del lote 7 del CAM se sembró el 8 de febrero/2005, a 9,1 plantas m⁻², una profundidad de siembra de dos cm, y se cosechó el 2 de junio/2005. Finalmente, el ensayo en el Lote 8 del CAM se sembró el 8 de julio/2004, a una densidad de 3,8 plantas m⁻², 3 cm de profundidad, y se cosechó el 1 de noviembre/2004. En el ensayo de invernadero en Tibaitatá, se contó con una parcela de 10 m².

La fertilización del cultivo se estableció con base en los resultados del análisis químico del suelo y los requerimientos de la planta. Se realizaron prácticas de protección del cultivo contra plagas y enfermedades. Entre las plagas se presentaron especialmente trozadores (*Agrotis*, *Spodoptera*) y babosas (*Arion sp.*), y entre las enfermedades, *Aschochyta pisi* y *Fusarium spp.* En los ensayos de campo se aplicó riego por aspersión cuando hubo periodos secos durante el ciclo del cultivo, y en los ensayos bajo invernadero, se aplicó riego por goteo a necesidad de la planta.

5.3.1 Evaluación del crecimiento

Para el seguimiento del crecimiento de los cultivos, se marcaron plantas en la emergencia del cultivo, y se hicieron evaluaciones semanales del número de nudos visibles, primer nudo del tallo con flor, número de nudos en el momento de la cosecha. Para los ensayos de campo, se tomaron 32 puntos ubicados en los nodos de una cuadrícula imaginaria de 25x25 m, con dos plantas marcadas por punto. Para los ensayos bajo invernadero, se marcaron 10 a 12 puntos y dos plantas por punto para hacer el seguimiento respectivo.

5.3.2 Evaluación del clima

Se contó con información climática de la estación meteorológica Tibaitatá, la más cercana al CAM (1,5 km), sobre brillo solar, temperatura, humedad relativa, evaporación y precipitación, principalmente. También se contó con la evaluación en el lote de la precipitación con ayuda de un pluviómetro artesanal.

En la condición de invernadero de Tibaitatá, se contó con un termómetro de máximas y mínimas (Buttler *et al.*, 2002), además de la información de la estación meteorológica mencionada. Con esta información se pudo establecer el aumento de temperatura en el invernadero con respecto al ambiente exterior.

Según Soltani *et al.* (2006), cuando la temperatura del aire es mayor a 3 °C, la diferencia entre la temperatura del suelo con respecto a la temperatura ambiente es muy pequeña. La relación que encontraron fue que por un aumento en un grado de la temperatura en el aire, el suelo aumenta en 1,046 °C. Por lo tanto, utilizar la temperatura del aire para estimar el tiempo de emergencia en grados día no induce mayor error.

La radiación solar incidente en MJ d⁻¹, que se requiere para calcular la fotosíntesis de la planta, se calculó para cada uno de los ciclos de cultivo, con base en las horas día de brillo

solar. Para este fin, se tomó la información de la estación meteorológica de El Dorado (distante a 6,7 km aprox.), que cuenta con los dos tipos de datos, y se aplicó el análisis de regresión para determinar la relación de la radiación solar en función del brillo solar.

5.3.3 Cálculo de los grados día

Los grados día o grados día de crecimiento (Miller *et al.*, 2001, Juskiw *et al.*, 2001) se calculan, en la forma más sencilla, de la siguiente manera:

$$\Sigma(T_m > T_b \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (5.1)$$

cuando la temperatura media T_m es disponible, o cuando se dispone de la máxima y mínima:

$$\Sigma((T_{max} + T_{min})/2 > T_b \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (5.2)$$

Varios investigadores han utilizado como temperatura base $T_b = 0^\circ\text{C}$ para calcular los grados día en arveja (Roche y Jeuffroy, 2000, Lecoecur y Sinclair, 2001). Miller *et al.* (2001) afirmaron que para los cultivos de estaciones frías en Montana (U.S.A.), entre los cuales está la arveja, una temperatura base de cero $^\circ\text{C}$ resulta adecuada.

Sin embargo, en las ecuaciones 5.1 y 5.2, se asume una respuesta lineal a la temperatura, lo cual se cumple hasta una temperatura máxima dada, variable según la especie vegetal. Soltani *et al.* (2006) mencionan que existen por lo menos tres tipos de funciones para describir la relación entre la temperatura y el crecimiento vegetal: segmentada, dentada, y curvada asimétrica (tipo función Beta). Cuando se sobrepasa la temperatura óptima para el crecimiento vegetal, un aumento adicional de la temperatura resulta contraproducente y reduce la tasa de crecimiento.

5.3.4 Estimación del filocrón

Con el número de nudos formados a través del ciclo del cultivo para cada punto de muestreo en el lote, se estimó la tasa de aparición de hojas (LAR) y el filocrón, es decir, el tiempo que tarda en aparecer una nueva hoja. Se utilizan días calendario o grados día (Juskiw *et al.*, 2001, Massawe *et al.*, 2003).

Cada punto constituyó un ambiente diferente, especialmente por las condiciones de suelo, por lo cual se evaluaron separadamente. La LAR se estimó por mínimos cuadrados en la relación del número de nudos en función del tiempo (Brown y Moot, 2004). Los resultados por ensayo se analizaron con estadísticas descriptivas univariadas. La comparación de promedios entre ensayos se hizo con pruebas t, al 5% de significancia.

5.3.5. Duración de los estados fenológicos

El momento de la emergencia del cultivo ocurre cuando un 50% de las plántulas de arveja aparecen sobre el suelo. Como el seguimiento se hizo semanalmente, el día de emergencia

se estimó por regresión de la curva de formación de hojas en el tiempo. El intercepto de la función lineal estima el momento de emergencia (Soltani *et al.* 2006). El inicio de la floración se asoció con la aparición del primer nudo con botón floral. El tiempo de cosecha se definió con respecto al primer pase de recolección de vainas, que corresponden generalmente al tallo principal de las plantas.

5.4 Resultados y discusión

5.4.1 Diferencias de la temperatura ambiente entre invernadero y campo abierto

Con los resultados de la evaluación de la temperatura dentro y fuera del invernadero en condiciones del centro experimental de Tibaitatá, se observó que el efecto del invernadero de plástico hizo aumentar la temperatura promedio en 7 °C con respecto a una temperatura ambiente de 14 °C. Además, la variabilidad, expresada por la desviación estándar, se aumenta a más del doble, de 1,07 a 2,53 °C, para la condición de campo e invernadero, respectivamente. La temperatura máxima en invernadero subió en ocasiones a más de 40 °C, lo cual se convierte en un factor adverso al crecimiento de la planta de arveja. En cambio, bajo la condición de campo abierto la temperatura varió en menor proporción, fue de $13,92 \pm 1,15$ °C (promedio \pm SD), con una diferencia de un grado entre los dos ensayos, sin que se observara una tendencia significativa a aumentar o decrecer a lo largo del año.

FEDECAFE (1986) afirma que la temperatura óptima para el crecimiento de la arveja está entre los 15 y 18 °C, por encima de la cual la curva de crecimiento decrece aunque se sigue produciendo comercialmente hasta los 24 °C.

5.4.2 Estimación de la radiación incidente sobre los cultivos

Con información de la estación meteorológica de El Dorado (Tabla 5.1) se obtuvo la relación entre horas de brillo solar y radiación solar. La radiación solar estimada para los cuatro ensayos fue de $14,58 \pm 0,73$ MJ m⁻² d⁻¹ (promedio \pm SD), con la más alta en el ensayo bajo invernadero del CAM ($15,46$ MJ m⁻² d⁻¹) y la más baja en el ensayo bajo invernadero de Tibaitatá ($13,67$ MJ m⁻² d⁻¹). Las fluctuaciones obedecen principalmente a los cambios de nubosidad, y no reflejan ninguna estacionalidad que pudiera afectar diferencialmente a los ensayos.

5.4.3. Emergencia del cultivo

En la Tabla 5.1 se presentan los resultados de la estimación del momento de emergencia y la tasa de aparición de nudos en el tallo principal de la planta de arveja, para cada uno de los ensayos. Tal como se observa para los cuatro ambientes evaluados, la diferencia más importante entre la condición de invernadero y el campo abierto, es una aceleración de la emergencia de las plantas. Por una diferencia de 7°C en el ambiente se ganaron 10 días aproximadamente bajo condición de invernadero.

En la Tabla 5.2. se presenta el tiempo a emergencia expresado en grados día, para cada uno de los ensayos. Se observa una diferencia notable con el ensayo de campo L8-2004B, en cuanto que demoró más en emerger, especialmente respecto al otro ensayo de campo, L7

2005 A. Esta diferencia se explica en parte por la profundidad de siembra, la cual fue mayor en el primer ensayo. Tal como observaron Soltani *et al.* (2006) en garbanzo (*Cicer arietinum* L.), el efecto de la temperatura en la velocidad de emergencia depende de la profundidad de siembra. Ellos obtuvieron que el requerimiento en días fisiológicos se aumentó en 0,9 días por cada centímetro de aumento en la profundidad de siembra, para un rango entre 2,5 y 14 cm de profundidad. A 5 cm de profundidad de siembra, se requirieron 6 días fisiológicos (94 °C d). La forma de la curva de respuesta del tiempo de emergencia se describió con una función dentada con un mínimo en 4,5 °C de base, una meseta de temperatura óptima entre 20,2 y 29,3 °C, y una máxima de 40 °C por encima de la cual no hay emergencia.

5.4.4. Tasa de aparición de nudos en el tallo principal

Con los datos del número de nudos visibles en el tallo principal de la arveja a través del tiempo, se obtuvo una tendencia lineal positiva, cuya pendiente corresponde a la tasa de aparición de nudos. De la Tabla 5.1, se deduce que la tasa de aparición de nudos en promedio para los cuatro ambiente fue de 0,3479 nudos/d o 2,87 días/nudo, pero se observan diferencias significativas según se trate de ensayos de campo o invernadero.

Tabla 5.1. Estimación del día de emergencia, tasa de aparición de nudos y nudos totales del tallo principal de la planta de arveja en cuatro ensayos experimentales

Ensayo	Parámetro	Unidad	n	Valor parámetro	SD	SW
IT 2004A	Día de emergencia	d	10	14,6294	4,4693	0,8200
	Nudos/d	d ⁻¹	10	0,3799	0,0347	0,8601
	Nudos totales	n	22	22,3000	2,4301	0,3784
IC 2004B	Día de emergencia	d	12	11,3329	2,4376	0,9762
	Nudos/d	d ⁻¹	12	0,3560	0,0292	0,2682
	Nudos totales	n	12	26,1667	4,2817	0,4469
L8 2004B	Día de emergencia	d	32	23,8095	2,9256	0,0198
	Nudos/d	d ⁻¹	32	0,3170	0,0187	0,0993
	Nudos totales	n	54	22,5000	3,2375	0,4480
L7 2005A	Día de emergencia	d	32	18,8104	5,2061	0,0002
	Nudos/d	d ⁻¹	32	0,3386	0,0349	0,0004
	Nudos totales	n	64	24,9219	5,5128	0,0225

NOTA: Se observaron diferencias significativas ($P < 0,05$) en la tasa de aparición de nudos entre la condición de campo y la de invernadero.

Tabla 5.2. Grados día a emergencia de las plántulas de arveja para los cuatro ensayos

Ensayo	n	Promedio	SD	Mediana	RIC
IT 2004A	10	198,93	68,2118	187,41	33,7412
IC 2004B	12	171,44	85,2281	191,28	128,0606
L8 2004B	32	316,55	33,4103	316,26	28,1106
L7 2005A	32	222,34	59,6122	222,76	70,7580

Esta tendencia se mantiene mientras está activo el crecimiento del tallo, sin que se observen variaciones por efecto del cambio a la fase reproductiva, que ocurrió alrededor de los 74 días después de la siembra (Figura 5.2 y 5.3). Un resultado similar también fue observado por Cao y Moss (1989) en cebada de primavera (*Hordeum vulgare* L.), en cuanto que a una temperatura dada la aparición de nuevas hojas siguió una tendencia lineal en función del tiempo, aunque se dieron diferencias en la tasa de aparición de hojas por efecto del genotipo y entre localidades por efecto de la temperatura.

Como se puede deducir de la Tabla 5.1, la tasa de aparición de nudos es ligeramente mayor bajo la condición de invernadero respecto a la condición de campo. En promedio se forman 0,368 nudos/d bajo invernadero, y 0,328 nudos/d a campo abierto, que en días calendario corresponde a 2,72 y 3,05 días respectivamente. En otras palabras, para formar 24 nudos, bajo la condición de invernadero se requieren 65 días, mientras que a campo abierto se gastan 73 días.

En la Tabla 5.3 se presenta la estimación de la tasa de aparición de nudos expresada en grados día, para los ensayos en campo abierto. Como no se conoce el rango óptimo de temperatura para la variedad de arveja trabajada, no se utilizaron los datos de los ensayos de invernadero. Se observa que la aparición de un nuevo nudo tarda 42 y 43 °C d, respectivamente para cada ensayo. En días calendario, se cuentan 3,15 y 2,95 días respectivamente.

Tabla 5.3. Tiempo en grados día que tarda la aparición de nudos (°C / nudo) en el tallo de la planta de arveja var. Santa Isabel para diferentes ensayos bajo condiciones de campo.

Ensayo	n	Promedio	SD	Mediana	Moda	RIC
L8 2004B	32	41,97	2,5761	42,17		3,0475
L7 2005A	32	42,98	4,6078	41,96		4,0600

La tasa de aparición de nudos está por encima del rango observado para las variedades de arveja australianas, de acuerdo con la información de Wilson y Robson (2006), quienes estimaron entre 27,03 y 37,04 °C d /nudo tomando una temperatura base de 4,5 °C. Éstos investigadores también encontraron que el ascenso de la temperatura entre 6 y 16 °C hacía aumentar la tasa de aparición de nudos.

En cambio, los resultados obtenidos son similares a los reportados en otras especies leguminosas. En cacahuate (*Vigna subterranea* (L.) Verdc) Massawe *et al.* (2003) observaron que producir una hoja requiere 44,9 °C d (40,9-53,0 °C d, SE: 1.2) acumulados con una temperatura base T_b entre 8,1 y 12 °C dependiendo del material genético. Ellos probaron 10 materiales diferentes de esta especie.

En alfalfa (*Medicago sativa* L.), Brown y Moot (2004) obtuvieron un filocrón de 37 ± 7 °C d excepto para los fotoperiodos en declinación desde 15,7 a 11,4 h, en los cuales decreció de

60 a 37 °C d. Además, ellos recurrieron a dos temperaturas base: una de 1 °C para cuando la temperatura ambiente fue menor a 15 °C, y otra de 5 °C para temperaturas mayores a 15 °C.

En otras especies se encuentran resultados variables del filocrón. En papa, Fleisher *et al.* (2006) obtuvieron que el filocrón tardó 24,3 °C d hoja⁻¹, con la temperatura base de 4°C y el máximo tolerable de 29 °C. En cebada (*Hordeum vulgare* L.), Juskiw *et al.* (2001) observaron que el filocrón promedio para cinco cultivares fue de 69,1 °C, para un número total de hojas de 9.

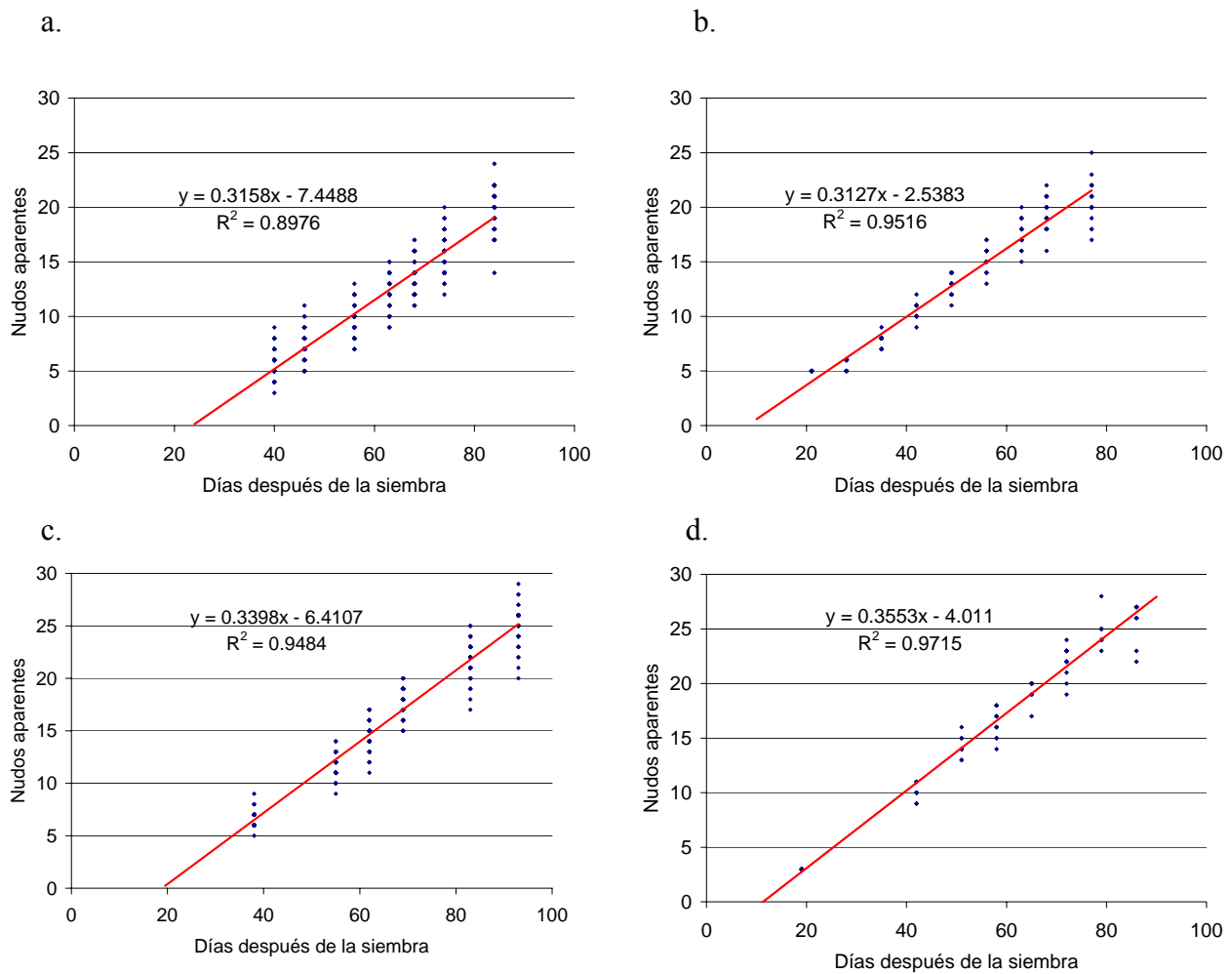


Figura 5.2. Nudos aparentes en el tallo principal de la planta de arveja para cuatro ensayos: a) L82004B, b) L72005A, c) IT2004A, d) IC2004B.

En otros trabajos se observa además, que la relación entre la tasa de aparición de hojas y la temperatura sigue una función lineal entre la temperatura base y el óptimo. En maíz, la tasa máxima de aparición de hojas fue de 40 °C d / hoja, a la temperatura óptima de 34 °C (Kiniry y Jones, 1986; Kiniry, 1991). Esta tasa aumentó linealmente a partir de la temperatura base de 8°C. En nuez Bambara (*Vigna subterranea* (L.) Verdc), Massawe *et al.*

(2003) observaron que el valor del filocrón estuvo entre 40,9 y 53,0 °C, con una relación lineal entre los 10 y 35 °C, con diferencias según el material genético. Hesketh *et al.* (1973) demostraron un aumento lineal del LAR de la soya en para el rango de temperaturas entre 8 y 30 °C.

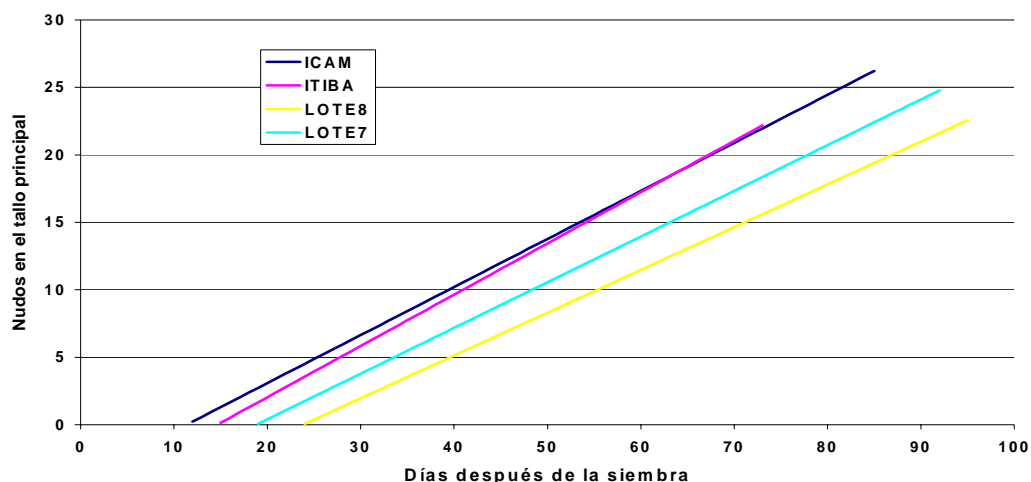


Figura 5.3. Tasa de aparición de nudos en el tallo principal de la planta de arveja var. Santa Isabel, para cuatro condiciones ambientales, dos en invernadero (ICAM, ITIBA) y dos en campo (Lote 8 y Lote 7).

Como la relación entre la tasa de aparición de nudos y la temperatura es lineal, resulta posible estimar la temperatura base para algunas especies con base en ensayos experimentales a diferentes temperaturas (Soltani *et al.*, 2006). Salazar (2006) observó que la uchuva (*Physalis peruviana* L.) responde linealmente al aumento de la temperatura en cuanto a la tasa de aparición de nudos, y de esta forma pudo estimar una temperatura base de 6,29 °C para este cultivo. Sin embargo, en la Figura 5.4 se muestra que los puntos observados no permiten una extrapolación adecuada para realizar esta estimación. Por el contrario, pueden plantearse muchas formas de unir estos puntos con diferentes modelos, además del que se presenta en la Figura 5.4. En algunas especies, la forma de respuesta de la tasa de aparición de nudos a la temperatura sigue una forma dentada, con un óptimo en un rango de temperaturas.

En haba (*Vicia faba* L.), Boote *et al.* (2002) utilizaron como temperatura base 0 °C para todo el desarrollo de la planta, considerando tres fases: formación de nudos, floración a aparición de la primera semilla y madurez. Las temperaturas óptimas mínima y máxima para una función de forma dentada, fueron de 27-30 °C, 22-26°C, y 22-35 para cada una de las tres fases respectivamente. La temperatura máxima tolerada por el cultivo fue de 40°C, 45°C y 45°C respectivamente para cada fase.

Según FEDECAFÉ (1986), la temperatura óptima para arveja está entre los 15 y 18°C. Sin embargo, si este es el caso, la temperatura de 14°C estaría más cercana al óptimo, y con 21°C se esperaría una reducción mayor en la tasa de aparición de nudos, lo cual no se

cumple con los datos experimentales expuestos. Por lo tanto, es posible que el rango óptimo de temperaturas se extienda más y posiblemente incluya los 21 °C.

La tasa de aparición de nudos se mantuvo constante a lo largo del ciclo de cultivo, tanto para la fase de crecimiento vegetativo como la fase reproductiva, sin importar el desarrollo foliar de la planta. Esto significa que la tasa de aparición de flores y vainas también se mantuvo constante durante la fase reproductiva.

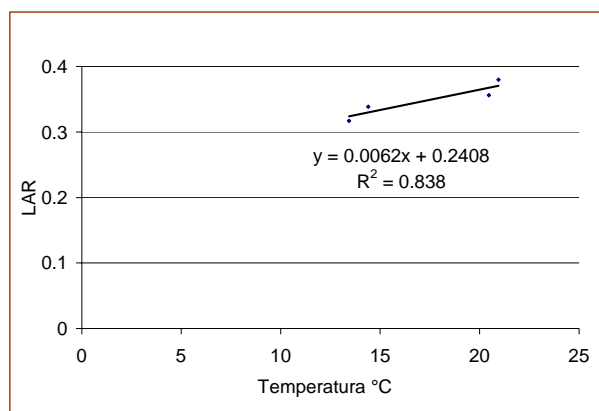


Figura 5.4. Relación de la tasa de aparición de hojas (LAR) y la temperatura del aire (°C), en la planta de arveja var. Santa Isabel.

5.4.5. Inicio de la floración y desarrollo de vainas

El inicio de la floración en condiciones de campo, ocurrió en el nudo 17 del tallo principal para los ensayos de campo, con ligeras variaciones entre los dos ensayos: 17,3 y 17,0 para el lote 7 y 8 del CAM, respectivamente (Tabla 5.4). Corresponden a 69,9 y 77,4 días después de la siembra, y a 965,9 y a 1030 en °C d respectivamente.

En condiciones de invernadero del ensayo en Tibaitatá la floración comenzó en el nudo 16, posiblemente por un ataque de *Aschochyta*, una enfermedad que afectó severamente a las hojas (aproximadamente el 80% de incidencia en hojas). Es sabido que las condiciones de estrés antes de la floración aceleran el desarrollo de las plantas. La productividad en este caso bajó ($1,3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) muy por debajo de la potencial.

Los resultados obtenidos están dentro del rango observado por Pacheco y Vergara (2005) para una muestra de materiales de arveja. Ellos observaron que el nudo a primera flor estuvo entre los 12,8 a 19,0 nudos.

Los resultados obtenidos corresponden a una variedad tardía. Algunos ejemplos en otras variedades más tempranas se presentan a continuación. Jeuffroy y Devienne (1995) observaron que la floración de la arveja comenzó entre los 705 a 860 °C d, con una temperatura base de 0°C. La tasa de aparición de nudos en la floración estuvo entre 35,9 y

70,9 °C d, para ensayos con diferentes densidades y fechas de siembra. Además, la progresión del desarrollo en el tiempo mostró una tendencia lineal. Siddique *et al.* (2002) obtuvieron que del momento de aparición de la primera flor hasta la cosecha transcurrieron de 43 a 53,2 días, y que el periodo de floración tardó entre 13 a 27,2 días.

Wilson y Robson (2006) observaron que el nudo con la primera flor en cinco cultivares de arveja, con resultados diferentes. En el cultivar Massey, no hubo respuesta al fotoperiodo. Para los cultivares Patea y Trounce, la aparición del primer nudo con flor fue un función lineal del fotoperiodo en el nudo 8. Para los cultivares Rovar y Whero, se observó una función aditiva del fotoperiodo y la temperatura (entre los nudos 8 y 12, respectivamente para cada cultivar). En días, se obtuvo un rango de duración entre emergencia a floración de 40 a 111 días, con 388 y 313 °C d.

El número de vainas en el tallo principal de la planta de arveja fue similar para los dos ensayos de campo (9,7 y 9,9 vainas/tallo en los ensayos L7-2005A y L8-2004B, respectivamente), lo cual se explica en parte por la mínima variación en las condiciones ambientales descritas de temperatura y radiación solar. El número de granos viables por planta se deduce en 50,14 y 55,04 respectivamente para los ensayos L7-2005A y L8-2004B.

Tabla 5.4. Características reproductivas de la planta de arveja var. Santa Isabel, en tres ensayos de campo.

Ensayo	Característica	n	Promedio	SD	SW	RIC
L7 2005A	Vainas/nudo	458	1,3079	0,5325	0,0001	1,00
	Óvulos/vaina	157	7,2930	0,8642	0,0001	1,00
	Granos viables/vaina	169	5,1893	1,5196	0,0001	2,00
	Vainas totales/tallo	62	9,6613	4,4092	0,0001	4,00
	Primer nudo con flor	62	17,3065	3,1860	0,0002	3,00
	Último nudo	62	24,4677	4,7657	0,0850	6,00
L8 2004B	Vainas/nudo	56	1,6731	0,3111	0,0001	0,59
	Granos viables/vaina	24	5,5434	0,8281	0,3493	0,94
	Vainas totales/tallo	56	9,9286	3,1442	0,9699	5,00
	Primer nudo con flor	50	16,9800	1,6224	0,0329	2,00
	Último nudo	50	22,2000	3,0573	0,0652	3,00
IT 2004B*	Primer nudo con flor	20	16,1000	1,1192	0,0541	2,00
	Último nudo	20	22,3000	2,4301	0,3784	3,50

La productividad en este ensayo se vio severamente reducida por un ataque de *Aschochyta*, favorecido por la alta humedad de este periodo.

El resultado es superior al que se reporta para variedades de arveja de porte pequeño que soportan altas densidades. Siddique *et al.* (2002) obtuvieron 6,2 a 6,8 vainas por planta de arveja, 4,1 a 5,4 granos por vaina, para un total de 25,4 y 36,7 granos/planta, a una densidad de siembra de 80 plantas/m². Las variaciones se debieron principalmente a las diferentes fechas de siembra, 29 en total.

Roche y Jeuffroy (2000) obtuvieron que el número de semillas por planta estuvo entre 9,73 y 39,01 para 25 ensayos de campo de la arveja cultivar Solara. Lhuillier *et al.* (1999) obtuvieron 42 semillas/planta con el cultivar Solara, pero el cultivar Frisson logró 57 semillas/planta aplicando 25 kg N /ha y 42 semillas/planta sin aplicar N.

El número de nudos reproductivos en arveja se deduce de la Tabla 5.4 entre 6,2 para el ensayo en invernadero IT2004B, hasta 7,2 para el ensayo en el L72005A, Esta característica es de importancia para definir la productividad de un cultivo. En lenteja, Whitehead *et al.* (2000) observaron que la productividad del cultivo depende del desarrollo de nudos y la proporción de ellos que son reproductivos. En trigo de invierno (*Triticum aestivum* L.) Petróczy y Matuz (2002) observaron en cuatro años de ensayos en con tres genotipos que la productividad del cultivo estuvo asociada principalmente con el número de hojas y el tamaño de la planta.

5.4.6. Cosecha

Según la Tabla 5.4, la planta desarrolló 24,5 nudos en el tallo principal para el ensayo L7-2005A, 22,2 nudos para el ensayo L8-2004B y 22,3 nudos para el ensayo IT-2004B. Se comprobó que los tallos suspendieron la formación de nudos nuevos, a los 73 días después de la siembra en el ensayo en invernadero IT-2004^a, 85 días para el ensayo de invernadero IC-2004B, 95 días para el ensayo de campo L8-2004B, y 92 días para el ensayo de campo L7-2005A. La madurez comercial de la arveja se dio entre los 93 y 115 días después de la siembra, con el primer pase de recolección, que toma las vainas del tallo principal.

Los resultados de la duración a cosecha están ligeramente por encima de lo que observaron Pacheco y Vergara (2005) en una muestra de materiales de arveja. Ellos obtuvieron la cosecha en un rango entre los 79 y 99 días después de la siembra, según el material de arveja.

5.5. Conclusiones

La alta temperatura bajo invernadero aceleró la emergencia de las plantas, la tasa de aparición de nudos y acortó la duración del ciclo de cultivo con respecto a la condición de campo.

El momento de la aparición del primer nudo con flor fue estable para las dos condiciones de campo. La condición de invernadero no hizo variar esta característica en forma significativa.

La productividad en número de vainas en el tallo principal fue similar para los ensayos de campo.

5.8 Literatura citada

Arjona, H, R. Sabogal T. y G. Suárez P. 1977. El cultivo de la arveja (*Pisum sativum*). Publicación Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Bogotá. Segunda edición. 47 p.

Bernacchi, C.J., E.L. Singaas, C. Pimentel, A.R. Portis JR y S.P. Long. 2001. Improved temperature response functions for models of Rubisco-limited photosynthesis. *Plant, Cell and Environment* 24:253-259.

Boote, K.J. 1995a. Simulating Basic Growth Processes. Carbon Balance. Training Program on Computer Simulation for Crop Growth and Nutrient Management, May 8-19. International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, Alabama, USA.

Boote, K.J. 1995b. Simulating Basic Growth Processes. Crop Development Balance. Training Program on Computer Simulation for Crop Growth and Nutrient Management, May 8-19. International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, Alabama, USA.

Brown, H.E. y D.J. Moot. 2004. Main-stem node appearance of lucerne regrowth in a temperate climate. En: Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia, 26/sept a 1/oct.

Butler, T.J., G.W. Evers, M.A. Hussey y L.J. Ringer. 2002. Rate of Leaf Appearance in Crimson Clover. *Crop Science* 42:237-241

Farquhar G.D., S. von Caemmerer y J.A. Berry. 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 149, 78-90

Farquhar G.D., S. von Caemmerer y J.A. Berry. 2001. Models of photosynthesis. *Plant Physiology* 125, 42-45

FEDECAFE. 1986. El cultivo de la arveja. Proyecto Hortalizas, Frutales y Flores. Ed. Litocencia Ltda., Cali. 18 p.

Fleisher, D.H., R.M. Shillito, D.J. Timlin, S.H. Kim y V.R. Reddy. 2006. Approaches to Modeling Potato Leaf Appearance Rate. *Agronomy Journal* 98:522-528

Goudriaan J.Y., H.H. Van Laar. 1995. Modelling Potential Growth Processes. Textbook with exercises. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. 238 p.

Hesketh, J.D., D.L. Myhre y C.R. Willey. 1973. Temperature control of time intervals between vegetative and reproductive events in soybeans. *Crop Science* 13:250-254.

Jeuffroy, M. y F. Devienne. 1995. A simulation model for assimilate partitioning between pods in pea (*Pisum sativum* L.) during the period of seed set; validation in field conditions. *Field Crops Research* 41: 79-89.

Jones, J.W., K.J. Boote, S.S. Jagtap y J.W. Mishoe. 1991. Soybean development. En: Modeling plant and soil systems. Agronomy Monograph no. 31. ASA-CSSA-SSSA, USA. Capítulo 5.

- Juskiw, P.E. Y.W. Jame y L. Kryzanowski. 2001. Phenological development of spring barley in a short-season growing area. *Agronomy Journal*. 93:370–379.
- Kiniry, J.R. 1991. Maize phasic development. En: *Modeling plant an soil systems*. Agronomy Monograph no. 31. ASSA-CSSA-SSSA, USA. Capítulo 4.
- Kiniry J.R. y C.A. Jones, (ed.) 1986. *CERES-Maize, A simulation model of Maize Growth and Development*. Texas A&M University Press, 194 p.
- Lecoeur, J. y T.R. Sinclair. 2001. Harvest index increase during seed growth of field pea. *European Journal of Agronomy* 14: 173–180.
- Lhuillier-Soundélé, A., N.G. Munier-Jolain y B. Ney. 1999. Influence of nitrogen availability on seed nitrogen accumulation in pea. *Crop Science* 39:1741–1748.
- Marcelis, L.F., E. Heuvelink y J. Goudriaan, 1998. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae* 74:83-111.
- Massawe, F.J., S.N. Azam-Ali y J.A. Roberts. 2003. The Impact of Temperature on Leaf Appearance in Bambara Groundnut Landraces. *Crop Science* 43:1375–1379
- Meier, U. 2001. *Estadios de las plantas mono y dicotyledóneas*. Centro Federal de Investigaciones Biológicas para Agricultura y Silvicultura, Alemania. 2ª. Edición. 149 p.
- Miller, P., W. Lanier y S. Brandt. 2001. *Using Growing Degree Days to Predict Plant Stages*. Montana State University, USA. Extension Service.
- Noode'n, L.D. y J.J. Guiame't. (1997). Senescence mechanisms. *Physiologia Plantarum* 101: 746–753
- Pacheco, C.A. y M.C. Vergara. 2005. Clasificación de 127 materiales de arveja (*Pisum sativum* L.) de acuerdo con el comportamiento agronómico y caracteres morfológicos. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Escuela de Posgrados.
- Petróczi, I.M. y J. Matuz. 2002. Seasonal study of tillering and phyllochron of winter wheat in field trials. *Acta Biologica Szegediensis* 46: 209-210.
- Poggio, S.L., E.H. Satorre, S. Dethiou y G.M. Gonzalo. 2005. Pod and seed numbers as a function of photothermal quotient during the seed set period of field pea (*Pisum sativum*) crops. *European Journal of Agronomy* 22: 55–69.
- Roche, R., M.H. Jeuffroy y B. Ney. 1999. Comparison of different models predicting the date of beginning of flowering in pea (*Pisum sativum* L.). *Ecological Modelling* 118:213–226.

Roche, R. y M.H. Jeuffroy. 2000. A Model to Calculate the Vertical Distribution of Grain Number in Pea. *Agronomy Journal* 92:663–671.

Salazar, M.R. 2006. Un modelo simple de producción potencial de uchuva (*Physalis peruviana* L.). Trabajo de grado, Facultad de Agronomía, Escuela de Posgrados, Universidad Nacional de Colombia. 108 p.

Siddique A. B., D. Wright y S. M. Mahbub A. 2002. Effects of sowing dates on the phenology, Seed Yield and Yield Components of Peas. *OnLine Journal of Biological Sciences* 2: 300-303.

Soltani, A., M.J. Robertson, B. Torabi, M. Yousefi-Daz, R. Sarparast. 2006. Modelling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth. *Agricultural and Forest Meteorology* 138 : 156–167

Stöckle, C.O., M. Donatelli y R.L. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18: 289-307.

Whitehead, S.J., R.J. Summerfield, F.J. Muehlbauer, C.J. Coyne, R.H. Ellis y T.R. Wheeler. 2000. Crop improvement and the accumulation and partitioning of biomass and nitrogen in lentil. *Crop Science* 40:110–120.

Wilson D.R. y M. Robson. 2006. Pea phenology responses to temperature and photoperiod. 13th Australian Agronomy Conference 10-15 Septiembre 2006, Perth, WA. En: <http://www.regional.org.au/au/asa/1996/contributed/590wilson.htm>. Consultado en septiembre /2006

**CAPÍTULO 6. ALGUNOS PARÁMETROS DE CRECIMIENTO EN
ÁREA Y BIOMASA DEL CULTIVO DE ARVEJA (*Pisum sativum* L.)**

6.1 Resumen

La capacidad de producción de biomasa de un cultivo depende de la extensión del área foliar y la eficiencia fotosintética de la planta. Además, interesa conocer la forma como la planta distribuye los asimilados ganados por fotosíntesis en el desarrollo de estructuras, y especialmente en las vainas, que son el interés principal. Con este fin, se tomó información de dos ensayos de arveja var. Santa Isabel que se realizaron bajo condiciones del Centro Agropecuario Marengo CAM, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá (2640 m.s.n.m., 14 °C, 80% H.R., 800 mm de lluvia/año). Se evaluó el desarrollo del área foliar a lo largo del tallo principal, lo cual corresponde con el crecimiento a lo largo de su ciclo vital. Además, se estimaron algunas relaciones importantes en la distribución de materia seca: el área foliar específica, que permite determinar el consumo de materia seca para el desarrollo de las hojas, y el índice de cosecha, que finalmente estima cuanta de la biomasa formada por el cultivo se destinó al desarrollo de las vainas. Estos resultados son importantes para la simulación de la productividad de los cultivos. Para el crecimiento foliar por nudo en el tallo principal se ajustó un modelo exponencial cuadrático, de forma de campana. En la fase vegetativa, el crecimiento en área foliar se pudo representar con un modelo cuadrático. El área foliar específica varió entre 18,9 a 21,2 m²·kg⁻¹, variable entre los dos ensayos de campo. El índice de cosecha en vaina fue de 0,52.

Abstract

Biomass production capacity of a crop depends on leaf area extension and photosynthetic efficiency. Also, it is important to know how the plant distributes photoassimilates to develop structures, specially pods, which are the main crop objective. With this in mind, data from two essays of pea crop var. Santa Isabel was collected at the research center called Centro Agropecuario Marengo CAM, Colombian National University, Bogotá (2640 m over sea level, 14 °C, 80% R.H., rainfall of 800 mm/year). Leaf area development along the main stem was evaluated, as it reflects plant growth along its vital cycle. Moreover, some important relations about dry matter distribution were estimated: specific leaf area, that determine how much dry matter is used to develop leaves, and harvest index, that finally estimates how much biomass were dedicated to pod formation. This results are important to simulate crop productivity. For leaf growth per node at main stem, a bell-shaped quadratic exponential model was adjusted. At vegetative stage, quadratic model to leaf area growth was adjusted. Specific leaf area ranged between 18.9 and 21.2 m²·kg⁻¹, for the two experiments at open field. Pod harvest index was 0.52.

6.2 Introducción

El área foliar de las plantas es una medida de su capacidad para interceptar radiación fotosintéticamente activa y sintetizar carbohidratos para el crecimiento. Como afirma Elings (2000), la estimación precisa del índice de área foliar (IAF) es indispensable para muchos estudios de crecimiento y competencia de los cultivos. El IAF debe distinguirse entre el área verde, fotosintéticamente activa, y el IAF total, que suma al área verde la parte senescente.

Como afirman Stewart *et al.* (2003), el ángulo foliar, la cantidad y distribución de follaje en el dosel vegetal determinan la forma como la planta intercepta la PAR, y de este modo, influyen en la fotosíntesis de la planta y el rendimiento del cultivo.

La forma como la planta desarrolla el área foliar a lo largo del tallo ha sido tema de varias investigaciones. Valentinuz y Tollenaar (2006) estimaron el área foliar total y el perfil vertical del área foliar en maíz (*Zea mays* L.). Encontraron que el perfil foliar en el tallo seguía la forma de una campana, que permite ubicar la posición de la hoja más grande, la amplitud de la distribución foliar y el sesgo del perfil. Los factores combinados del híbrido de maíz, la densidad de plantas, los niveles de nitrógeno y el espaciamiento entre surcos, no tuvieron efecto en el grado de sesgo, y poco impacto en los demás parámetros, por lo cual se recomendó el modelo como predictor del área foliar por hoja en el perfil de maíz.

El área foliar específica se utiliza comúnmente en los modelos de simulación para calcular el área foliar con base en un peso de materia seca destinado a formar hojas en la planta. Goudriaan y van Laar (1994) afirman que cuando el crecimiento de las hojas está limitado por la fuente de asimilados, una fracción del total de materia seca formado por fotosíntesis en un paso de simulación se destina a la formación de hojas, y con base en el área foliar específica se calcula el área foliar nueva. Es decir:

$$GLAI = RWLV * SLANEW \quad (6.1)$$

$$RWLV = FLV * GROWHT \quad (6.2)$$

Donde *GLAI* es el índice de área verde foliar, *RWLV* es la tasa de crecimiento del follaje en materia seca, *SLANEW* es el área foliar específica para el follaje nuevo, *FLV* es la fracción de la materia seca total formada que se dedica a la formación de hojas, *GROWHT* es el total de materia seca formada en un paso de simulación.

El índice de cosecha se ha utilizado en muchos modelos simplificados del crecimiento y productividad de los cultivos. En el modelo de simulación EPIC, Sharpley y William (1990) calculan la producción de los cultivos a partir de la materia seca total que desarrollan las plantas durante su ciclo, multiplicada por el índice de cosecha. En maíz puede variar según el estrés hídrico y el nivel de nitrógeno disponible. Además, el valor de éste índice se puede asociar con el consumo máximo de nitrógeno por la planta (Zand-Parsa *et al.*, 2005).

Algunos parámetros de simulación del crecimiento como el área foliar específica y el índice de cosecha se asumen estables para diferentes ambientes (Stöckle *et al.*, 2003; Poorter *et al.*, 2000). Según Ayaz *et al.* (2004), a nivel de productividad, se utiliza comúnmente el índice de cosecha, como una característica de materiales vegetales de uso comercial.

6.3 Materiales y métodos

Para el análisis del crecimiento y distribución de materia seca en la planta de arveja, se partió de la información de los ensayos de campo en los lotes 7 y 8 del CAM (Mosquera, Cundinamarca), conforme se describió en el Capítulo 4. Cada lote de 2 ha se dividió en cuadrículas imaginarias de 25x25 m para efectos de una malla de muestreo, para un total de

32 cuadrículas por lote. En los puntos de intersección de la cuadrícula se marcaron dos plantas, para un total de 64 plantas marcadas que se evaluaron al momento de la cosecha.

Los lotes fueron manejados con riego y fertilizados de acuerdo con el análisis de caracterización química del suelo y las necesidades de nutrientes por parte del cultivo. La variedad de arveja fue Santa Isabel, y la semilla se adquirió de FENALCE.

6.3.1. Área foliar por piso

A cada planta se le hizo la medición de la longitud de las partes del fitómero para estimar el área foliar por nudo, con los métodos propuestos en el Capítulo 3, de alometría. Con el área foliar por nudo se evaluaron modelos de regresión, de acuerdo con la metodología propuesta por Valentinuz y Tollenaar (2006), así:

$$Y = \exp(a + bx + cx^2) \quad (6.3)$$

$$Y = \exp(a + bx + cx^2 + dx^3) \quad (6.4)$$

Donde y corresponde al área foliar por nudo del tallo principal, y x corresponde a el número de nudo del tallo contado a partir de la base. a , b y c , son coeficientes del modelo a estimar por mínimos cuadrados. La expresión $\exp(\)$ es la función exponencial, de modo que $y = \exp(x)$ es equivalente a $y = e^x$.

6.3.2. Área foliar específica

Para la evaluación del área, peso seco foliar, y área foliar específica, se hizo un muestreo destructivo al inicio de la floración en los ensayos de campo (Lotes 7 y 8 del CAM), en las 32 cuadrículas de la malla imaginaria de cada lote. De cada cuadrícula se tomaron 20 plantas y de cada planta una hoja completamente desarrollada preferiblemente del nudo anterior al primer nudo con flor. Las hojas se separaron en láminas foliares y estructuras de soporte (pecíolos, raquis, zarcillos). Las láminas se escanearon para medir el área foliar. Posteriormente, la muestra se llevó a secado en estufa a 60 °C por 72 horas, o hasta cuando el peso alcanzara un mínimo estable. Entonces se pesaron en balanza de precisión. Se calculó el área foliar específica en m² de área foliar por kg de materia seca.

6.3.3. Peso seco del tallo

El tallo principal de la planta de arveja se dejó limpio de hojas, estípulas y vainas, se llevó a la estufa a 60°C hasta cuando el material se secó y se estabilizó en un peso mínimo. Los tallos se dividieron en tres partes iguales en longitud, en orden a partir de la base: zona baja, media y alta. Los tallos se partieron en segmentos de 5 cm y se pesaron para obtener un peso por unidad de longitud.

6.3.4. Índice de cosecha

Cada planta de la muestra, se separó en sus partes: tallo, hojas y estípulas, y vainas, las cuales se llevaron a la estufa para el secado a 60 °C hasta cuando se estabilizó el peso, a las 72 h. Se midió el peso seco por separado para cada parte, y para el caso de las vainas se

discriminó el peso de la cáscara y los granos. El peso de zarcillos y flores no se consideró importante, con relación al peso restante en la planta. Se calculó el índice de cosecha con base en el peso seco de las vainas (cáscara y grano), y del grano, en fracción respecto al peso seco total de la parte aérea de la planta de arveja.

Se analizó el resultado de los índices con el procedimiento univariado de SAS. La comparación de resultados entre lotes se hizo con la prueba t, al 5% de significancia estadística.

6.4 Resultados y discusión

6.4.1 Área por piso foliar

El área foliar en el tallo principal muestra que el tamaño de las láminas foliares por nudo fue aumentando gradualmente en el tiempo, en la medida en que se ascendía en el tallo principal, lo cual puede ser el resultado de la prolongación gradual del tiempo de expansión foliar en cada fitómero.

El aumento del tamaño de las láminas foliares corresponde con estípulas de mayor área, foliolos más grandes, y aumento del número de foliolos. Los primeros nudos del tallo cuentan con sólo dos foliolos, y con el desarrollo de la planta el número de foliolos por hoja se aumenta progresivamente hasta llegar a un máximo de seis, cuya aparición tiende a coincidir con el inicio de la floración.

En la Figura 6.1 se presentan las curvas de área foliar por nudo del tallo principal de la planta de arveja, para tres ensayos de campo. En todos los casos, la curva presenta un máximo hacia la mitad del número de nudos totales, lo cual es resultado de la simetría del crecimiento a lo largo del tallo.

Estos resultados son similares con los datos registrados por Lizaso *et al.* (2003) en maíz. Ellos encontraron la hoja con mayor área foliar es una función del número total de hojas formadas, de la forma:

$$LN_x = 0,67 LT \quad (6.5)$$

Los modelos de regresión respectivos se presentan en la Tabla 6.1. Se observa que el modelo exponencial cuadrático es más adecuado que el modelo exponencial cúbico, en cuanto que el coeficiente de regresión asociado con el término a la tercera potencia no es significativo. Estos resultados difieren de las observaciones de Valentinuz y Tollenaar (2006) en el perfil del área foliar en el tallo maíz. Ellos encontraron más adecuado el modelo exponencial cúbico, aunque el coeficiente asociado a la asimetría de la campana fue pequeño $c = 0,00015$.

Elings (2000) afirma que el conocimiento de la función del desarrollo foliar a lo largo del tallo de maíz (*Zea mays* L.), permite estimar con algunos parámetros, el área foliar total de la planta. Con este fin, el número de nudos, la posición de la hoja de mayor área, y el área

foliar máxima pueden ser suficientes. La sencillez del método permite hacer el seguimiento de los cultivos, especialmente al momento de la floración.

A pesar de que el modelo se ajusta adecuadamente a la tendencia del crecimiento foliar en el tallo de arveja, hay que considerar que el desarrollo de las hojas se hace a través del ciclo del cultivo, bajo condiciones ambientales que pueden ser muy variables. Por lo tanto, algunas irregularidades en la curva pueden explicarse por la ocurrencia de algún estrés ambiental temporal, como se puede apreciar en la Figura 6.1.b., para el ensayo L7-2005B, en cuanto no hay coincidencia en los picos máximos observado y modelado.

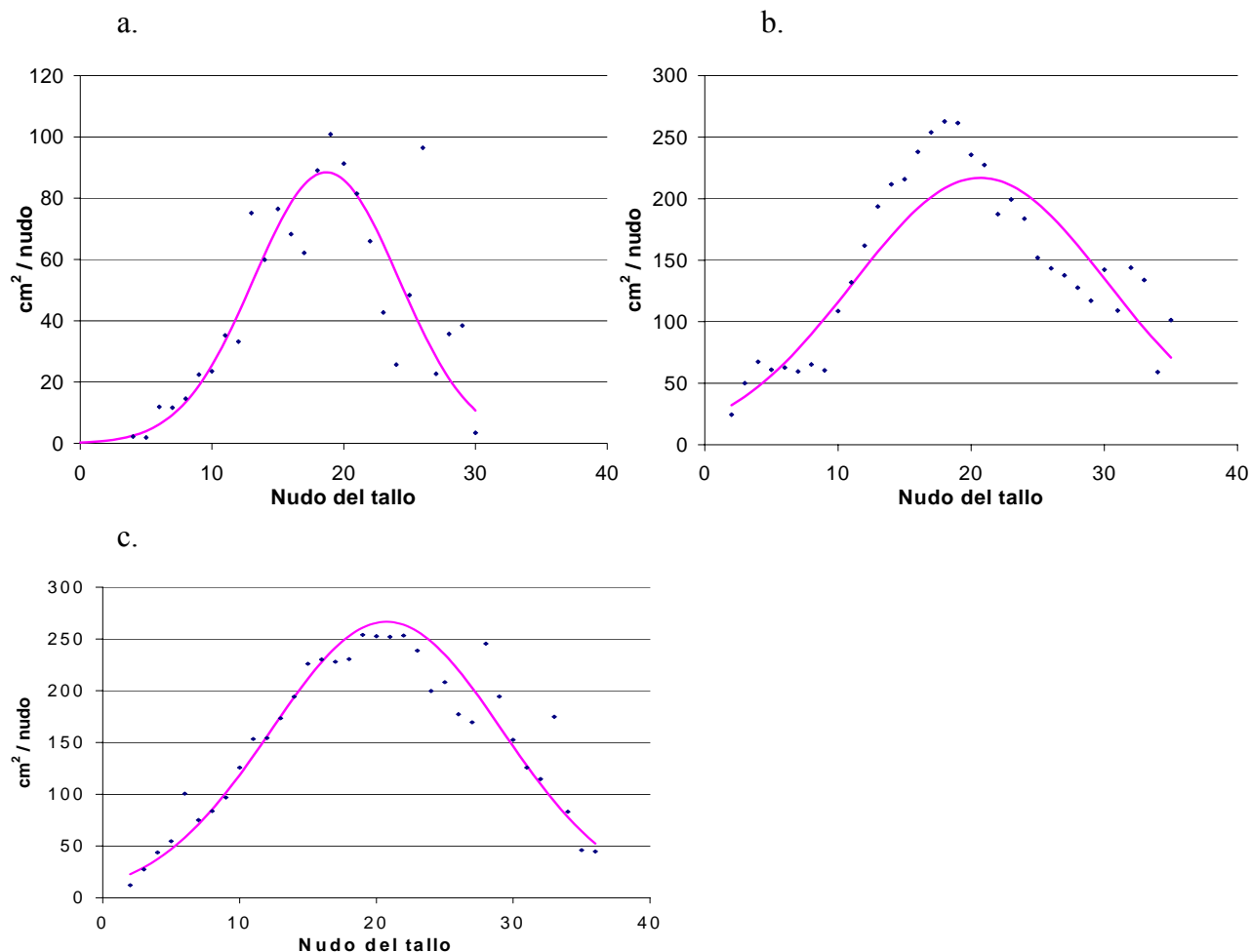


Figura 6.1. Área foliar por nudo del tallo principal en la planta de arveja en ensayos de campo en el CAM. a) Ensayo L8-2004B, b) Ensayo L7-2005A, c) Ensayo L7-2005B Donde LT es el número total de hojas, LN_x es el número de hoja con el área máxima. En este caso, la hoja de mayor área foliar se encontró en el nudo 20, un nudo por encima del resultado del cálculo propuesto.

Por otra parte, la poca área foliar que se presenta en los nudos de la parte baja y alta del tallo tienen explicaciones diferentes. Las hojas bajas eran pequeñas porque la planta estaba iniciando su desarrollo, pero las hojas superiores corresponden al final del ciclo,

cuando la planta dedica sus asimilados principalmente al llenado de los frutos, y en segunda instancia al desarrollo de más follaje. Además, el pico de máxima área foliar en el tallo corresponde con los primeros nudos con flor. En este sentido, se propone analizar separadamente estos dos periodos: el vegetativo y reproductivo.

El análisis del crecimiento foliar por planta en el tiempo, se hace para cada momento en el desarrollo del cultivo con el área foliar total por planta, que representa la suma acumulada del área de las hojas y estípulas del tallo para todos los nudos formados. El resultado es una curva sigmoide, que puede decrecer al final del ciclo por efecto de la senescencia del follaje y la caída de hojas. Esta curva se puede aproximar con diferentes funciones, como la expolineal o la logística.

Tabla 6.1. Modelos exponencial cuadrático y cúbico para el área foliar por piso en el tallo principal

Ciclo	Modelo	n	SE estimación	r ²	Parámetros	Estimación	SE	P> t
L8B2004	1	27	0,49314	0,8262	Intercepto	-1,48930	0,91294	0,1164
					x	0,66983	0,20452	0,0033
					x ²	-0,02010	0,01325	0,1430
					x ³	0,00007	0,00026	0,7862
	2	27	0,48355	0,8256	Intercepto	-1,27300	0,45154	0,0095
					x	0,61625	0,05964	<,0001
L7A2005	1	34	0,24132	0,8450	Intercepto	2,79035	0,22938	<,0001
					x	0,29356	0,05124	<,0001
					x ²	-0,00984	0,00315	0,0039
					x ³	0,00008	0,00006	0,1706
	2	34	0,24507	0,8348	Intercepto	3,03669	0,15003	<,0001
					x	0,22638	0,01859	<,0001
					x ²	-0,00547	0,00049	<,0001
					x ³	0,00005	0,00005	0,2980
L7B2005	1	34	0,22191	0,9152	Intercepto	2,40262	0,20600	<,0001
					x	0,33511	0,04486	<,0001
					x ²	-0,00982	0,00269	0,0009
					x ³	0,00005	0,00005	0,2980
	2	34	0,22232	0,9121	Intercepto	2,56892	0,13349	<,0001
					x	0,29077	0,01611	<,0001
					x ²	-0,00701	0,00041	<,0001
					x ³	0,00005	0,00005	0,2980

Para el periodo vegetativo, el modelo se puede simplificar de modo que represente el énfasis en el desarrollo foliar que se sucede en estos primeros nudos. En la Tabla 6.2 y la Figura 6.2 se presentan los resultados de la aplicación de modelos cuadráticos para representar el crecimiento en longitud de los pecíolos y el área las láminas foliares acumulados por nudo del tallo principal de la planta de arveja, durante la fase vegetativa.

En general se observa que bajo condiciones de invernadero se acumula una mayor cantidad de área foliar, que puede explicarse por efecto de la temperatura alta que favorece una mayor actividad fotosintética, por encima de la condición de campo abierto.

Lee *et al.* (2003) utilizaron un modelo expolineal para representar el crecimiento en el tiempo del cultivo del crisantemo (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) en un año, basado en la radiación fotosintéticamente activa (PAR), y se encontró buen ajuste ($r^2=0,98$) con los datos observados en cuatro experimentos con diferentes densidades de plantas (32, 48, 64 y 80 plantas m^{-2}), durante diferentes estaciones y regímenes de luz.

Aunque varios investigadores han observado que la función expolineal es útil para representar el crecimiento vegetal, se requiere un seguimiento detallado del cultivo (cada tres días) para lograr buenas estimaciones de los parámetros, especialmente en la fase exponencial (Ishag y Dennett, 1998). El modelo cuadrático se puede ajustar fácilmente por mínimos cuadrados, pero la extrapolación no es adecuada más allá del momento de la floración.

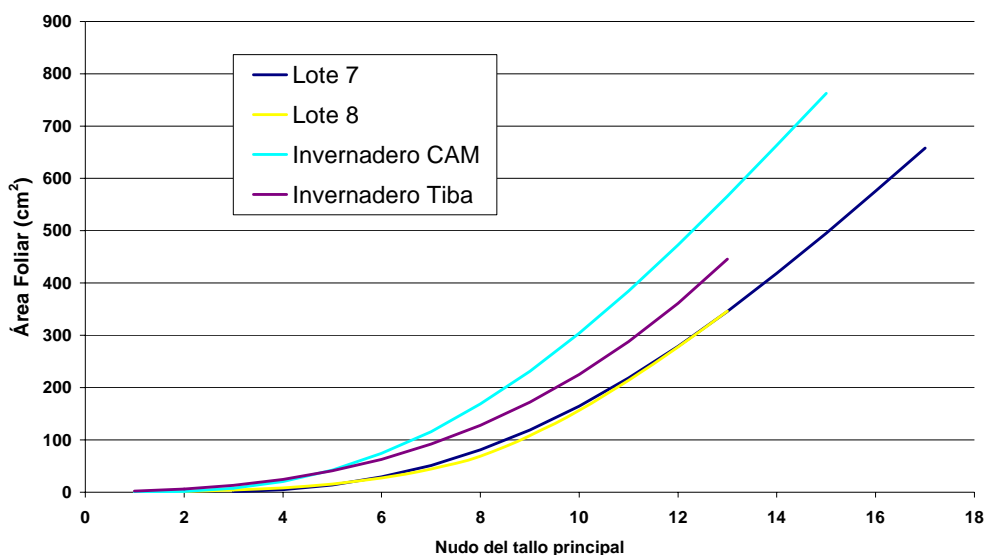


Figura 6.2. Curva estimada del área foliar acumulada a lo largo del tallo principal de la planta de arveja var. Santa Isabel, en cuatro ambientes (dos en invernadero y dos en campo abierto).

6.4.2. Área foliar específica

De los muestreos de hojas maduras que se tomaron al inicio de la floración, se obtuvieron los datos de área foliar específica para los dos ensayos de campo, y los resultados se presentan en la Tabla 6.3. Las diferencias entre los dos ensayos son significativas, de modo que en el lote 8 las hojas fueron más delgadas y livianas que en el lote 7, posiblemente porque la condición del ensayo en el lote 7 fue más seca.

Según Heagle *et al.*(2002), el área foliar específica del fríjol (*Phaseolus vulgaris* L.) fue de 31,11 m²/kg para el cultigen S156 y 26,02 para Tenderette. El primer material desarrolló 5.320 cm² de área foliar, y el segundo, 10.173 cm².

Tabla 6.2. Desarrollo del área foliar en el tallo principal durante la fase vegetativa del ciclo de la planta de arveja var. Santa Isabel

Ensayo	n	Parámetro	Valor Coeficiente	SD	SW
IT 2004A	10	Intercepto	-1,1482	5,8198	0,3209
		Nudo	1,0560	2,5351	0,3192
		Nudo ²	0,1806	0,1832	0,3077
		Último Nudo	14,0000	1,3377	0,1362
IC 2004B	12	Intercepto	8,7033	8,3236	0,1691
		Nudo	-0,4276	3,4011	0,4124
		Nudo ²	0,2512	0,2015	0,5411
		Último Nudo	17,4545	2,1616	0,9444
L8 2004B	24	Intercepto	-41,1620	30,3300	0,7394
		Nudo	10,4938	6,7977	0,5333
		Nudo ²	-0,3094	0,3530	0,9833
		Último Nudo	14,1467	1,9092	0,2210
L7 2005A	32	Intercepto	0,000		
		Nudo	1,2519	0,3167	
		Nudo ²	0,1078	0,0276	
		Último Nudo	17,000		

* En este ensayo no se contó con información para cada punto de los 32 marcados en la malla de muestreo, por lo cual no se presenta la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks (SW).

Tabla 6.3. Área foliar específica para la arveja var. Santa Isabel, en dos ensayos de campo en el Centro Agropecuario Marengo, U.N. 2004, 2005.

Ensayo	n	m ² ·kg ⁻¹	SD	SW	RIC
Lote 7	32	18,8563	2,3854	0,0301	4,0059
Lote 8	32	21,2280	2,0893	0,9039	2,9879

Diferencia significativa (P<0,0001) del promedio de área foliar específica para los dos ensayos, según la prueba t.

La razón de peso foliar por hoja, definida como el peso en gramos de la lámina foliar sobre el peso total de la hoja, fue de 0,64953±0,03768 (promedio±desviación estándar), con distribución normal sobre una muestra de 32 observaciones del lote 7 (normalidad de SW, P= 0,7823). Esta razón es alométrica y es importante para determinar la distribución de materia seca de la planta para formar sus estructuras.

6.4.3. Formación de materia seca en el tallo

En la Tabla 6.4, se presenta la distribución de materia seca a lo largo del tallo principal de la planta de arveja, dividiéndolo en tres partes o estratos: alto, medio y bajo. Se observa como la parte baja del tallo tiene mayor peso que las partes media y alta, lo cual es un indicativo de que el aumento en peso se hace gradualmente y a lo largo de todo el tallo. Sin embargo, el grosor del tallo se aumenta sólo en la parte media, porque la arveja no presenta realmente crecimiento secundario en el tallo.

Tabla 6.4. Distribución de la materia seca a lo largo del tallo principal de la planta de arveja

Parte del tallo	n	Promedio MS (g·cm ⁻¹)	SD	SW	RIC
Alta	61	0,0634	0,0398	0,0001	0,0319
Media	57	0,1254	0,0268	0,0001	0,0207
Baja	60	0,1578	0,0955	0,0001	0,0771

Jeuffroy y Devienne (1995) observaron una tasa de crecimiento del tallo entre 5,16 y 14,30 mg·tallo⁻¹·°C d, para ensayos con diferentes densidades (61 a 257 tallos/m²) y fechas de siembra.

6.4.4. Formación de materia seca en producción e índice de cosecha

En la Tabla 6.5 se presentan los resultados de la producción en materia seca de granos y cáscara, los dos componentes de la vaina de la planta de arveja, para tres pases de cosecha en el ensayo L7-2004A. Se observa que la primera recolección incluye vainas de mayor peso seco, tanto en granos como en cáscara. Esta producción corresponde principalmente a las vainas del tallo principal de la planta de arveja, que son las que primero se forman y maduran. Los siguientes pases de cosecha recogen las vainas que se producen en las ramas, principalmente, las cuales, por efecto de la competencia, son vainas de menor tamaño y peso.

Hauggaard *et al.* (2006) observaron una producción de grano de arveja (cultivar Bohatyr) de 476 g materia seca/m². Este cultivar es de crecimiento determinado y se cosecha a los 100 días después de la siembra. La densidad de siembra fue de 90 plantas/m²

Tabla 6.5. Estimación de índices de cosecha con relación a vainas y granos en la planta de arveja var. Santa Isabel, en el ensayo del lote 7 del CAM, Semestre A de 2005

Característica	Unidades	n	Valor	SD	SW	RIC
Vainas	MS (g/planta)	62	39,7768	30,0391	0,0001	30,1700
Granos	MS (g/planta)	62	24,5532	18,13077	0,0001	20,1500
Paja	MS (g/planta)	62	75,0550	53,6165	0,0001	69,2788
IC vainas		62	0,5185	0,0581	0,3094	0,0779
IC granos		62	0,3241	0,0363	0,3094	0,0487

Steppuhn *et al.* (2001) obtuvieron una producción de materia seca variable según el genotipo de arveja. Con los cultivares Carnival y otro, obtuvieron 1710 y 2036 g m⁻², respectivamente, con 88 plantas m⁻².

Lecoeur y Sinclair (2001) observaron que la producción de materia seca en el grano de arveja estuvo entre 136 y 513 g·m⁻² en condiciones de campo, y los índices de cosecha estuvieron en el rango de 0,41 a 0,59. La biomasa total fue de 267 a 1081 g·m⁻². Ellos utilizaron cultivares franceses de diferentes tipos: cuatro semi-afoliados (Aladin, Alex, Bacara y Solara) y uno foliado (Messire).

Según Ayaz *et al.* (2004) el peso por planta de arveja fue de 14,3 g/planta, para variedades de porte pequeño que toleran hasta 400 plantas/m². El índice de cosecha fue de 0,453. Ellos observaron valores similares para otras leguminosas, como el garbanzo (*Cicer arietinum*), lenteja (*Lens culinaris*) y lupino (*Lupinus angustifolius*), con valores de 0,436, 0,463 y 0,408, respectivamente.

Siddique *et al.* (2002) con variedades de arveja que soportan la densidad de 80 plantas/m², obtuvieron un peso seco de la paja por planta de arveja de 4,29 a 6,63 g, peso seco de granos por planta de 6,83 a 9,97 g, para un índice de cosecha entre el 59,9 a 61,4, según la fecha de siembra.

El peso de las vainas de 39,78 g/planta es comparable con los resultados de Heagle *et al.* (2002) en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Ellos obtuvieron un peso de vainas de 33,5 g, para el cultigen S156, y de 16,6 g para el cultigen Tenderette. La suma de la materia seca de las vainas y la paja, es de 114,83 g, según se deduce de la Tabla 6.5. Heagle *et al.* (2002) obtuvieron que el peso de la materia seca de la parte aérea de la planta de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) fue de 77,6 g para el cultigen S156, y de 103,1 g para Tenderete.

En la Tabla 6.5 también se presenta la estimación del índice de cosecha expresado en peso de vainas y en peso de granos con respecto a la biomasa total de la planta. Aunque se presenta una variabilidad en el peso de vainas, granos y paja entre las diferentes plantas muestreadas, por efecto de las condiciones cambiantes del suelo, los índices calculados presentan normalidad de acuerdo con la prueba de Shapiro-Wilks, y su coeficiente de variación es bajo (11,2% para ambos índices), lo cual es un indicativo de la baja variabilidad de estos índices frente a un ambiente heterogéneo.

La baja relación entre la productividad y el índice de cosecha ha sido observado por varios investigadores que trabajaron con diferentes especies de plantas. Kumudini *et al.* (2001) observaron que sólo un 22% del incremento en productividad del cultivo de soya (*Glycine max* (L.) Merr.) de las variedades de alto respecto a las de bajo potencial se pudo explicar por efecto del índice de cosecha.

El caupí [*Vigna unguiculata*(L.) Walp.], el índice de cosecha varía según el genotipo. Líneas de porte bajo en general presentan mayor índice de cosecha que las de porte alto. Tal como aseguran Ismail y Hall (2002), las líneas semienanas son más eficientes para

particionar el suministro de asimilados hacia la producción del grano respecto a las líneas típicas.

En lenteja, Whitehead *et al.* (2000) observaron que el índice de cosecha ha evolucionado con el desarrollo de nuevos materiales vegetales, pero el aumento de la productividad de los cultivos se ha debido principalmente al incremento en la producción de biomasa por el cultivo. De los cultivos de lenteja con progenitores (*Lens orientalis* (Boiss.)) con un índice de cosecha de 0,19, y una producción de biomasa de 0,72 t·ha⁻¹, se pasó a los cultivares actuales que tienen un HI de 0,34 y una producción de biomasa de 3,52 t·ha⁻¹.

6.5 Conclusiones

El área foliar a lo largo del tallo principal se representa con una curva acampanada cuyo máximo ocurre entre el nudo 19 y 20. Para efectos de la modelación del crecimiento foliar, conviene separar la fase vegetativa de la reproductiva. Durante la fase vegetativa, la curva de crecimiento se puede ajustar a un modelo cuadrático o a uno expolineal.

El área foliar específica para la arveja varió entre los dos ensayos de campo en el CAM, con una diferencia significativa debida posiblemente a condiciones de humedad que afectan esta característica.

La distribución de materia seca en el tallo demuestra una mayor acumulación hacia la parte basal, por lo cual se infiere que el desarrollo de la planta alimenta continuamente el desarrollo del tallo en toda su longitud, de modo que la parte basal aumenta en densidad, mientras la parte apical se elonga mientras puede formar nuevos nudos.

El índice de cosecha fue un valor constante que no se alteró por efecto de las condiciones variables del lote experimental, aunque los niveles de productividad por planta se afectaron notablemente.

6.6 Literatura citada

Ayaz, S., D.J. Moot, B.A. McKenzie, G.D. Hill y D.L. McNeil. 2004. The Use of a principal axis model to examine individual plant harvest index in four grain legumes. *Annals of Botany*, disponible en la web en: www.aob.oupjournals.org, consultado en septiembre/06.

Elings, A. 2000. Estimation of Leaf Area in Tropical Maize. *Agronomy Journal* 92:436–444.

Goudriaan J.Y., H.H. Van Laar. 1995. *Modelling Potential Growth Processes*. Textbook with exercises. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. 238 p.

Hauggaard-Nielsen, H., M.K. Andersen, B. Jørnsgaard, E.S. Jensen. 2006. Density and relative frequency effects on competitive interactions and resource use in pea–barley intercrops. *Field Crops Research* 95: 256–267.

- Heagle, A.S., J.E. Miller, K.O. Burkey, G. Eason y W.A. Pursley. 2002. Growth and yield responses of snap bean to mixtures of carbon dioxide and ozone. *Journal of Environmental Quality* 31:2008–2014.
- Ishag, K.H. y M.D. Dennett. 1998. Use of the expolinear growth model to analyse the growth of faba bean, peas and lentils at three densities: fitting the model. *Annals of Botany* 82: 497-505
- Ismail, A.M., A.E. Hall. 2002. Semidwarf and standard-height cowpea responses to row spacing in different environments. *Crop Science* 40:1618–1623.
- Jeuffroy, M. y F. Devienne. 1995. A simulation model for assimilate partitioning between pods in pea (*Pisum sativum* L.) during the period of seed set; validation in field conditions. *Field Crops Research* 41: 79-89.
- Kumudini, S., D.J. Hume y G. Chu. 2001. Genetic improvement in short season soybeans: I. Dry matter accumulation, partitioning, and leaf area duration. *Crop Science* 41:391–398.
- Lecoeur, J. y T.R. Sinclair. 2001. Harvest index increase during seed growth of field pea. *European Journal of Agronomy* 14: 173–180.
- Lee, J.H., J. Goudriaan y H. Challa. 2003. Using the expolinear growth equation for modeling crop growth in year-round cut chrysanthemum. *Annals of Botany* 92: 697-708.
- Poorter H. y E. Garnier. 1996. Plant growth analysis: an evaluation of experimental design and computational methods. *Journal of Experimental Botany* 47:1343-1351.
- Sharpley, A.N. y J.R. William (eds.) 1990. EPIC – Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. U.S. Department of Agriculture. Technical Bulletin No. 1768. 235 pp.
- Siddique A. B., D. Wright y S. M. Mahbub A. 2002. Effects of sowing dates on the phenology, Seed Yield and Yield Components of Peas. *OnLine Journal of Biological Sciences* 2: 300-303.
- Steppuhn, H., K.M. Volkmar y P.R. Miller. 2001. Comparing canola, field pea, dry bean, and durum wheat crops grown in saline media. *Crop Science* 41:1827–1833.
- Stewart, D.W., C. Costa, L.M. Dwyer, D.L. Smith, R.I. Hamilton y B.L. Ma. 2003. Canopy structure, light interception, and photosynthesis in maize. *Agronomy Journal* 95:1465–1474.
- Stöckle, C.O., M. Donatelli y R.L. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18: 289-307.
- Valentinuz, O.R. y M. Tollenaar. 2006. Effect of genotype, nitrogen, plant density, and row spacing on the area-per-leaf profile in maize. *Agronomy Journal* 98:94–99.

Whitehead, S.J., R.J. Summerfield, F.J. Muehlbauer, C.J. Coyne, R.H. Ellis y T.R. Wheeler. 2000. Crop improvement and the accumulation and partitioning of biomass and nitrogen in lentil. *Crop Science* 40:110–120.

Zand-Parsa, S., A.R. Sepaskhah y A. Ronaghi. 2005. Development and evaluation of integrated water and nitrogen model for maize. *Agricultural Water Management* 81: 227-256.

CAPÍTULO 7. MODELACIÓN DEL CRECIMIENTO Y LA PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO DE ARVEJA (*Pisum sativum* L.)

7.1. Resumen

Los modelos de simulación para el crecimiento de los cultivos han sido una herramienta importante para consolidar los conocimientos y con base en ellos hacer propuestas explicativas coherentes que puedan ser validadas posteriormente en campo. En la medida de la solidez del modelo, su utilidad redonda en estimaciones precisas de la respuesta de los cultivos ante diferentes ambientes y formas de manejo. En éste trabajo se hace una propuesta para simular el desarrollo del cultivo de arveja con base en la interacción y competencia por asimilados entre los órganos vegetativos y reproductivos. Algunos de los parámetros que se utilizaron tuvieron base experimental de ensayos anteriores en el Centro Agropecuario Marengo (CAM) de la Universidad Nacional, sede Bogotá (2640 m.s.n.m., 14 °C, 80% H.R., 800 mm de lluvia/año), y se expusieron en capítulos anteriores: índice de cosecha, razón de área foliar, filocron, nudo a primera flor, entre otros. Otros parámetros provienen de modelos de simulación como CROPSYST, CERES Maize, DSSATv4 y EPIC, especialmente: eficiencia en el uso de luz y coeficiente de extinción. La simulación se hizo discretizando el crecimiento por día, y evaluando el incremento en materia seca por razón de la interceptación de luz y la conversión de energía solar en biomasa. La partición de asimilados se hizo considerando por separado las hojas, tallo, raíz y vainas, y asignando diferentes prioridades de acuerdo con la etapa fenológica. El crecimiento en materia seca se simuló resolviendo las ecuaciones diferenciales por el método de Euler. El modelo se evaluó con el uso de tablas dinámicas de EXCEL, y los resultados fueron consistentes con los datos observados de campo.

Abstract

Crop growth simulation models has been an important tool to consolidate knowledge and use them to make coherent explanations that can be validated on field conditions. According to the soundness of the model, useful and precise estimations could be attained to explore crop responses to different environments and a sort of crop management. In this essay, a proposition to simulate pea crop development as a result of competence for assimilates and interaction between vegetative and reproductive organs. Some required parameters were taken from previous experimental data at colombian National University, Centro Agropecuario Marengo (CAM), Bogotá (2640 m over sea level, 14 °C, 80% R.H., rainfall of 800 mm/year), and they were presented in preceding chapters: harvest index, leaf area ratio, phyllocron, first node with flowers, etc. Other parameters were taken from simulation model as CROPSYST, CERES Maize, DSSATv4 and EPIC, specially: light use efficiency and extinction coefficient. Simulation was made discretizing time in days and calculating dry matter increment as a result of light interception and solar energy conversion to biomass. Assimilates partitioning was made considering separately leaves, stem, root and pods, with different priorities according to phenological stage. Dry matter increment was simulated solving differential equations by Euler method. The model was evaluated using dynamic tables in EXCEL, and the results were consistent with the reported field data.

7.2 Introducción

Los modelos son herramientas poderosas para proponer hipótesis, sintetizar conocimiento, describir y entender sistemas complejos y comparar diferentes escenarios (Marcelis *et al.*, 1998). En agronomía, los modelos se han utilizado para hacer predicciones del efecto a largo plazo de cambios climáticos (Ewert, 2004), el aumento esperado en la concentración de CO₂ de la atmósfera (Alagarswamy *et al.*, 2006), impacto del manejo del suelo en la erosión (Sharpley, 1990), sistemas de manejo de fincas en rotación de cultivos (Stöckle *et al.*, 2003), y control del clima en invernaderos (Lentz, 1998).

En los sistemas para el soporte de decisiones al nivel agrícola (Greer *et al.*, 1993) se utilizan diferentes tipos de componentes: unos para predecir el comportamiento de los cultivos, otros para generar diferentes condiciones climáticas según la zona agrícola de interés, otros más para estimar la disponibilidad de agua y nutrientes para las raíces de las plantas en el suelo. Dependiendo de los objetivos, estos sistemas también incluyen algunos análisis económicos y facilitan la toma de decisiones sobre qué cultivos sembrar, cuál es la rotación más conveniente, que impacto ambiental tiene una forma determinada de manejo agronómico, y que niveles de rendimiento y rentabilidad se pueden esperar, entre otros aspectos.

La utilidad de los modelos de simulación de cultivos agrícolas aumenta cuando se complementa con estudios georeferenciados de las zonas productoras (Turner *et al.*, 2004). De esta forma se facilita el reconocimiento de zonas aptas para el desarrollo de cultivos en sistemas de producción, y se provee un soporte sólido para la planificación adecuada del uso de la tierra.

El uso de sensores remotos ha hecho proliferar en los últimos años el volumen de información espacial, lo cual representa un desafío para los investigadores de áreas relacionadas, quienes deben dar la utilidad de acuerdo con sus objetivos particulares. Indudablemente una de las aplicaciones es la evaluación del uso del suelo y el impacto sobre el medio ambiente. Los modelos de simulación se pueden utilizar para proponer alternativas en el uso del suelo, de modo que la información generada de esta forma sirva a manera de hipótesis que puede ser validada con estudios de campo (Turner *et al.*, 2004).

El nivel de escala para la aplicación de los modelos de simulación del crecimiento de los cultivos se puede manejar en el tiempo y el espacio, dependiendo del detalle y disponibilidad de información de entrada para el modelo. En la agricultura de manejo específico por sitio se requiere conocer el comportamiento esperado del cultivo ante condiciones cambiantes del suelo, y en la medida en que los modelos expliquen el comportamiento de las plantas con información edafológica e hídrica disponible, se pueden plantear las correcciones necesarias y las proyecciones de producción que permitan justificar la aplicación de estas tecnologías (Hoskinson *et al.*, 1999).

7.2.1. Tipos de modelos

Inicialmente, los fisiólogos utilizaron modelos principalmente descriptivos del crecimiento de las plantas en cuanto a área foliar y materia seca, que se analizaron con el uso de índices

fisiológicos. El comportamiento en el tiempo de los índices se analizó con métodos estadísticos de regresión para establecer tendencias y puntos críticos. Uno de los inconvenientes de éstos modelos fue la necesidad de hacer muestreos destructivos para la toma de datos, con aumento del error por la variabilidad continua del ambiente y la necesidad de tomar plantas diferentes cada vez, lo cual se refleja en la irregularidad de las curvas y la dificultad para obtener buenos ajustes a los modelos de regresión, aunque se hicieron avances importantes para corregir estas deficiencias (Poorter, 1989; Poorter y Garnier, 1996).

Los modelos explicativos del crecimiento vegetal hicieron nuevos aportes para profundizar en el conocimiento de las plantas, enlazando el uso de los índices de crecimiento con los procesos fotosintéticos, los cuales están afectados por el medio ambiente, y en primera instancia, por la radiación solar y la concentración de CO₂ en la atmósfera. Estos modelos lograron una mejor aproximación al desarrollo de los cultivos, en un proceso que implicó en primer lugar la estimación de la interceptación de luz por la plantas, luego la asimilación de CO₂ por la fotosíntesis y finalmente el desarrollo estructural de materia seca en diferentes órganos de la planta.

7.2.2. Algunos modelos de simulación de cultivos

En la actualidad se han desarrollado varios modelos que permiten simular el crecimiento de los cultivos, que difieren en sus enfoques y objetivos. En esta medida, la recomendación sobre el uso de un modelo determinado no puede hacerse sin determinar previamente las necesidades de investigación y la disponibilidad de información completa y confiable.

Uno de los primeros modelos de simulación se desarrolló para el maíz por Kiniry y Jones (1986), el cual fue posteriormente utilizado por varios investigadores para su validación. Además, constituyó un esquema básico para la elaboración de modelos en otras especies de cultivos.

Gutierrez *et al.* (1993), desarrollaron un modelo para frijol, donde cada planta se subdividió en subunidades para discretizar la edad de los tejidos y lograr una aproximación adecuada a la dinámica del carbono y nitrógeno entre los distintos órganos de la planta. Este enfoque se enmarca dentro de los modelos de retardo.

Clemente *et al.* (2005) evaluaron tres modelos de simulación para el cultivo de maíz: CERES Maize, CROPSYST, y SWACROP. Cada modelo tiene una aproximación diferente a los aspectos del crecimiento del cultivo. En general el modelo CERES presentó un buen comportamiento para la predicción del desarrollo del IAF, la producción de biomasa, producción de grano, la humedad del suelo a diferentes profundidades, y la evapotranspiración del cultivo. CROPSYST le sigue en orden, y SWACROP, aunque pide pocos parámetros de cultivo, así mismo tiene poca precisión en aspectos fisiológicos.

Mathieu *et al.* (2004) utilizaron el modelo GreenLab (Yan *et al.*, 2004), que simula el crecimiento vegetal combinando tanto la organogénesis (en cada ciclo, un nuevo órgano se crea de acuerdo con las leyes de la genética), y la fotosíntesis (los órganos se llenan con la biomasa que producen las hojas por fotosíntesis). Este tipo de modelo se denomina

“funcional-estructural” o FSM (Functional-Structure Model). Como la aparición de nuevos órganos depende de la biomasa disponible, debe existir retroactividad entre la fotosíntesis y la organogénesis. En este modelo, por lo tanto, se calcula la demanda de biomasa por las yemas en crecimiento, y la oferta de biomasa por las hojas formadas. Con el mismo modelo y utilizando el principio de factorización de la estructura vegetal, Reffye y Cournède (2005) pudieron calcular la producción de biomasa, la partición de la misma entre los órganos vegetales y el crecimiento secundario en árboles.

Definitivamente, la incorporación de la arquitectura vegetal en los modelos junto con la representación visual permite una mejor aproximación al desarrollo tridimensional del dosel (Röhrig *et al.*, 1999) y contribuye a modelar en forma más precisa el crecimiento de la planta a partir del comportamiento de órganos individuales (Chuai *et al.*, 2002). Para citar un ejemplo, Díaz-Ambrona *et al.* (1998) utilizaron los sistemas L para modelar el desarrollo del dosel en haba. Estos sistemas representan geoméricamente las estructuras vegetales y facilitan el desarrollo de imágenes por computador para la simulación del dosel de plantas, arbustos y árboles.

De los sistemas de cultivos simples se avanzó hacia la modelación de los cultivos múltiples (Berntsen *et al.* 2004), cuya importancia es bien conocida para el mejor aprovechamiento de los recursos ambientales y la reducción del impacto ambiental de la agricultura (especialmente en cuanto puede facilitar el manejo de plagas y enfermedades). La modelación de la competencia vegetal se ha hecho con modelos de simulación dinámicos, tales como ALMANAC y GAPS (Rossiter y Riha, 1999).

No necesariamente hay que recurrir a la complejidad para lograr una buena aproximación práctica a la productividad de los cultivos. En ocasiones, los factores limitantes tienen un efecto tan marcado en determinados sistemas de producción, que se pueden obviar los demás factores. Es el caso de la disponibilidad de agua para el desarrollo de los cultivos, frente a factores como la temperatura y luminosidad, que son más estables y también muy difíciles de modificar. Payne *et al.* (2001) utilizaron un modelo simple donde se consideró sólo la precipitación y los grados día para lograr una aproximación adecuada a la productividad de la arveja en ensayos a largo plazo.

Estos son sólo algunos ejemplos, pero la proliferación de modelos en la agricultura es un indicio del interés y la utilidad que han demostrado para el desarrollo del conocimiento y la administración de recursos. En la presente investigación se sugiere un modelo de crecimiento del cultivo de arveja bajo las condiciones de la Sabana de Bogotá, con base en la información experimental y algunos parámetros de modelos de simulación reconocidos internacionalmente. Se propone explicar el rendimiento en función de la relación oferta-demanda por asimilados, y considerando que el objetivo del ciclo vegetativo es formar estructuras reproductivas, se le da prioridad a su desarrollo y se explica el efecto que tiene éste principio en la productividad del cultivo. El objetivo es estimar el potencial de productividad del cultivo, lo cual permite evaluar el efecto de los factores que la afectan y disminuyen (Loomis and Williams, 1963, Goudriaan y Laar, 1995).

Como se conoce, la arveja es la principal hortaliza en Colombia (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y Corporación Colombia Internacional, 2002), y es importante no sólo

por su valor nutritivo, sino también por su aporte de nitrógeno al suelo, que hace conveniente incluirla en sistemas de rotación de clima frío para un manejo adecuado de la fertilidad. Sin embargo, la productividad a nivel nacional aún es muy baja, alrededor de 1,5 t ha⁻¹ (Castro, 1995; MADR, 2006)

7.3 Materiales y métodos

El modelo de simulación que se propone en este trabajo, tiene como base la información experimental que se obtuvo en ensayos anteriores en el Centro Agropecuario Marengo (CAM) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, y cuyos resultados se expusieron en los capítulos anteriores. Algunos parámetros necesarios para construir el modelo que no pudieron ser tomados en campo, fueron adoptados de CROPSYST (Stöckle y Nelson, 2003), un modelo de simulación de cultivos que presenta información sobre arveja. Los resultados del modelo fueron verificados con un ensayo de campo en el CAM, que se realizó en el segundo semestre de 2005. Los detalles se describen más adelante.

Entre las fuerzas que dirigen el crecimiento y definen el potencial de productividad de un cultivo están la luz y la temperatura (Boote, 1995a). La temperatura afecta en general toda la actividad enzimática de la planta, pero la duración de las etapas fenológicas no varía en forma importante a lo largo del año en el trópico para una misma localidad, en cuanto que las variaciones de temperatura no muestran estacionalidad. La radiación se utilizó para estimar la tasa de formación de biomasa con base en la interceptación de luz por el dosel vegetal, como se describe más adelante.

En la Figura 7.1 se presenta un diagrama de Forrester para un sistema de producción de biomasa vegetal, como puede ser el cultivo de arveja, con base en unas entradas mínimas, como la luz y temperatura. El texto enmarcado en rectángulo representa variables de estado de la biomasa, que sigue el flujo de las líneas llenas. El texto enmarcado en elipses representa alguna acción específica, forma de acción, o parámetro relacionado con una acción. Las llaves representan tasas (asimilación, respiración, crecimiento y desarrollo). Las líneas punteadas reflejan flujos de información o energía.

En el modelo propuesto no se incluye explícitamente el efecto de la respiración, sino implícitamente con la eficiencia de conversión y el gasto en mantenimiento de estructuras (especialmente el tallo). La partición de biomasa se hace estructuralmente, especialmente en las hojas se distingue las láminas de las estructuras de soporte (pecíolos y raquis). La prioridad en la asignación de asimilados se hace según el estado de desarrollo de la planta. A continuación se explica cada uno de los pasos del modelo.

7.3.1. Definición de los estados de desarrollo

Se consideraron básicamente tres estados de desarrollo en el modelo: germinación a emergencia, fase vegetativa de emergencia al inicio de la floración y fase reproductiva de floración a cosecha. El momento del inicio de la floración se marcó con la aparición del nudo 17, de acuerdo con los resultados experimentales de ensayos anteriores. Esta característica es muy estable y tiene un control genético (Espinosa y Ligarreto, 2005),

aunque según la variedad puede haber efecto de la temperatura y el fotoperiodo (Roche *et al.*, 1999, Wilson y Robson, 2006). La tasa de aparición de nudos se asumió constante para todo el ciclo, en 0,35 nudos/d. El total de nudos desarrollados se determina por la competencia de asimilados entre los órganos reproductivos y vegetativos, pero está alrededor de 24.

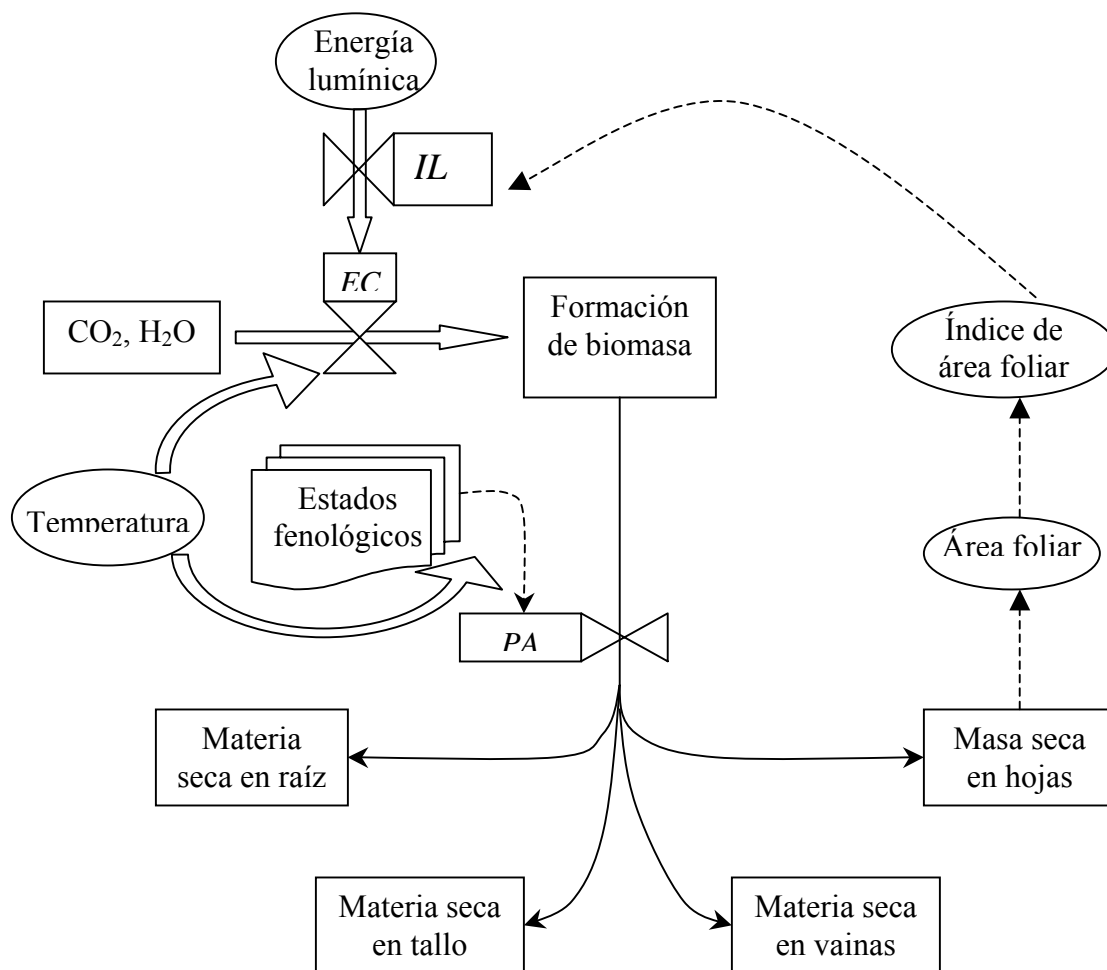


Figura 7.1 Diagrama de Forrester para el modelo de simulación del crecimiento vegetal en arveja. Las abreviaturas son: *IL*, interceptación de luz, *EC*, eficiencia de conversión, *PA*, partición de asimilados (adaptado de Marcelis *et al.*, 1998).

Para la duración de la fase de germinación a emergencia, se adoptó la aproximación de grados día registrada por Miller *et al.* (2001), según la cual, esta fase dura alrededor de 200 grados día, a una profundidad de siembra de 2 cm. Se consideró como temperatura base 0°C para el cálculo de los grados día. En general, éstos parámetros y la aplicación del criterio de grados día resultaron útiles para explicar las diferencias en el ciclo de cultivo entre la condición de invernadero y campo en los ensayos del CAM en los años 2004 y 2005 (Capítulo 4).

Para efectos del modelo, el desarrollo de nudos reproductivos se suspende por competencia por los asimilados entre los órganos reproductivos y las hojas, en detrimento de éstas últimas. Sin embargo, entre el inicio de la floración y la suspensión de la elongación del tallo transcurre un tiempo determinado durante la cual se mantiene la formación de nudos a la misma tasa de la fase vegetativa. Así, se definen dos etapas en la formación de vainas: una inicial, durante la cual las vainas se elongan mientras se continúa la formación de nuevos nudos, y una segunda, en la cual se detiene la aparición de nudos y la planta se dedica al llenado de los granos, con lo cual las vainas aumentan en grosor.

7.3.2. Desarrollo de biomasa

Para calcular la formación de biomasa por la planta de arveja, se partió de la cantidad de radiación solar fotosintéticamente activa que pudo ser interceptada por el cultivo, de acuerdo con la ecuación de Monsi y Saeki (1953) adaptada por Williams *et al.* (1989):

$$PAR(i) = 0,5 * RA(i) * (1 - EXP(- 0,65 * IAF(i))) \quad (7.1)$$

donde PAR es la radiación fotosintéticamente activa expresada en $MJ \cdot m^{-2}$ para un día dado i , RA es la radiación solar incidente sobre el cultivo en $MJ \cdot m^{-2}$, IAF es el índice de área foliar (sin dimensiones). $EXP()$ es la función exponencial. La constante $0,65$ corresponde al coeficiente de extinción k , que varía entre genotipos según la arquitectura del dosel. O'Connell *et al.* (2004) obtuvieron un valor $k = 0,76 \pm 0,03$, $r^2 = 0,88$ y $n = 32$, para la arveja en condiciones australianas. Sin embargo, para la arveja tipo semi-afoliada, Ridao *et al.* (1995) obtuvieron un coeficiente de extinción $k = 0,50$.

Es importante considerar que el modelo de Monsi-Saeki tiene fundamento en la ley de Beer-Lambert, que se construyó para explicar el paso de la luz a través de un fluido uniforme. Song y Band (2004) llamaron la atención del sesgo que se genera por este supuesto cuando se presentan espacios libres (brechas) en la vegetación, como ocurre naturalmente en los bosques. Una aproximación consiste en incluir un índice de aglomeración para corregir la interceptación de luz. Otra aproximación es utilizar modelos ópticos geométricos. Lo importante es que la interceptación de luz en cultivos a baja densidad debe ser corregida considerando la cantidad de espacio libre entre plantas.

La formación de biomasa por la planta se estimó con base en un coeficiente de conversión de energía en biomasa, que se asumió en $2,1 \text{ kg} \cdot \text{MJ}^{-1}$ con base en el modelo CROPSYST (Stöckle *et al.*, 2003). La ecuación resultante fue:

$$DELTA B(i) = 2,1 * RFA(i) \quad (7.2)$$

Donde $DELTA B$ es el incremento potencial de biomasa en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ en el día i . A pesar de que las plantas $C3$ tienden a saturarse con niveles altos de radiación, existe una relación lineal entre la PAR interceptada y la fotosíntesis del dosel (Rosati y Dejong, 2003).

La razón de conversión de energía en biomasa se relaciona con la eficiencia en el uso de la luz (o Radiation Use Efficiency, RUE), que aquí se asume de valor constante. O'Connell *et al.* (2004) observaron una RUE de $1,52 \pm 0,05 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ IPAR para arveja en la fase vegetativa

sin variaciones importantes en cinco años de cultivo en ambientes semiáridos de Australia. El rango de radiación solar fue de 8-10 MJ·m⁻².

El valor de la RUE puede variar según el estado fenológico del cultivo. En cultivos irrigados de arveja tipo semi-afoliado, Ridao *et al.* (1996) observaron que la RUE varió según se tratara de la fase anterior al comienzo del llenado de granos, o la posterior. Además, hubo efecto del genotipo; para el cultivar Solara, fue de 1,87±0,18 y 2,10±0,84 g MJ⁻¹±95% de intervalo de confianza, respectivamente para las dos fases, con un promedio de 1,99±0,56, y para el cultivar Esla fue de 1,37±0,10 y 1,91±0,40, para las dos fases respectivas, con un promedio de 1,68±0,28. Lecoeur y Ney (2003), afirman que estas variaciones de la RUE son especialmente importantes en condiciones fluctuantes de clima, como las que son usuales en zonas templadas.

En otras especies vegetales, la RUE también puede mostrar variaciones con el desarrollo fenológico. Salazar (2006) obtuvo una eficiencia en el uso de la luz de 0,46 y 2,62 g·MJ⁻¹ para la uchuva en la etapa vegetativa y reproductiva, respectivamente. Sin embargo, en algunas especies se puede asumir una RUE constante. Por ejemplo, en ajo (*Allium sativum* L.), Rizalli *et al.* (2002) estimaron un valor promedio para toda la temporada de cultivo de 2,0 g·(MJ PAR)⁻¹.

7.3.3. Distribución de asimilados

En este modelo se propone que la asignación de asimilados se haga con distintas prioridades de acuerdo con la etapa de desarrollo, en particular, las fases vegetativa y reproductiva. Se retoma la apreciación que hace Poorter y Nagel (2000), en cuanto que es conveniente evaluar por separado la asignación de asimilados entre las hojas, tallo y raíz en la fase vegetativa, y no solamente entre la parte aérea y la raíz.

En general, la prioridad para la asignación de asimilados se le da al tallo, lo cual permite la elongación de los entrenudos y la aparición de nuevos fitómeros. Esta prioridad se mantiene para todo el ciclo de desarrollo de la planta mientras haya elongación, la cual se suspende sólo por competencia interna cuando las vainas empiezan a llenar los granos.

En segundo lugar, la planta desarrolla las hojas, las cuales por medio de la fotosíntesis serán las encargadas de generar la materia seca necesaria para el crecimiento de la planta. Por lo tanto, el desarrollo de las hojas, y más exactamente el crecimiento en área foliar, tiene una tendencia exponencial positiva, que se ve contrarrestada en la fase vegetativa especialmente por la demanda creciente de asimilados por parte del tallo y las estructuras de soporte.

En tercer lugar, y sólo cuando se entra en la etapa reproductiva, ocurren dos posibles situaciones. La primera situación ocurre si el tallo todavía puede elongar, entonces el orden de prioridades para la asignación de asimilados es el siguiente: tallo, vainas y láminas foliares. Esto permite que la planta pueda formar nudos reproductivos en una cantidad determinada mientras aún continúa formando nuevas hojas y estípulas.

La segunda situación se da cuando el tallo, por competencia de asimilados con las vainas, suspende su crecimiento, por lo cual la formación de nuevas vainas y láminas foliares se suspende. Entonces las hojas y estípulas sólo producen asimilados para el llenado de las vainas, hasta que termina el ciclo y las láminas foliares comienzan a senescer.

De acuerdo con las prioridades propuestas en el modelo, la biomasa producida se utiliza en primer lugar para formar estructuras de soporte, como el tallo y raíz, proporcionalmente al área foliar generada en el paso anterior, esto es, alométricamente:

$$\text{DeltaPesoRaquis}(i) = \text{DELTAB}(i-1) * (1 - \text{RLR}) \quad (7.3)$$

$$\text{DeltaPesoLamina}(i) = \text{DELTAB}(i-1) * \text{RLR} \quad (7.4)$$

$$\text{DeltaPesoRaíz}(i) = \text{DELTAB}(i-1) * \text{RHR} \quad (7.5)$$

Donde *RLR* es la razón de partición de biomasa entre la lámina foliar y el ráquis de la hoja (incluyendo el pecíolo), y *RHR* es la razón de partición de biomasa entre la hoja y la raíz. De acuerdo con resultados preliminares en arveja, *RLR* se aproxima a 0,75. El valor de *RHR* se ajustó por simulación.

El incremento del peso del tallo se explicó por la ocurrencia de dos procesos: uno de elongación, que corresponde con los entrenudos en crecimiento, y otro de fortalecimiento general del tallo, que exige mayor cantidad de asimilados en la medida de la extensión total del tallo. La magnitud de la elongación del tallo depende alométricamente del área foliar desarrollada, o más exactamente de la longitud de las hojas, de la siguiente manera:

$$\text{Elongación}(i) = \text{LONHOJAS}(i) * \text{RELON} \quad (7.6)$$

Donde *RELON* es la razón de la longitud de las hojas con la longitud de tallo. Normalmente esta relación permite que los folíolos de las hojas queden espaciados entre sí y se reduzca el autosombreamiento. Sin embargo, las densidades de siembra altas obligan a una mayor elongación del tallo a costa de un menor desarrollo foliar (efecto de competencia por luz). De este modo, la relación entre la elongación del tallo y la densidad de siembra sigue una función de forma logarítmica, de modo que *RELON* en cultivos a altas densidades tiende a llegar a un máximo, pero el resultado son plantas de hojas pequeñas y achaparradas.

La longitud de las hojas se estima por alometría a partir del área foliar generada, de la siguiente forma:

$$\text{AREAFOL}(i) = \text{DeltaPesoLamina}(i) * \text{AFE} * 10 \quad (7.9)$$

$$\text{LONHOJAS}(i) = \text{RAÍZ}(\text{AREAFOL}(i)/2) / 0,36 / \text{NPLANTAS} \quad (7.10)$$

Donde *AREAFOL* se refiere al área foliar por área de suelo ($\text{cm}^2 \cdot \text{m}^{-2}$), *AFE* es el área foliar específica que se asumió en $21 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, con base en ensayos anteriores (sección 6.4.2). *NPLANTAS* es la densidad expresada como plantas/ m^2 . El área foliar se divide en dos para distinguir de la lámina foliar de la estípula y de la hoja. La constante 0,36 se refiere a la proporción de la longitud de la lámina foliar y su área. La constante 10 es un ajuste de unidades.

El costo en biomasa para el crecimiento del tallo se calcula entonces con la siguiente ecuación:

$$\text{CrecimientoTallo}(i) = \text{Elongación}(i) + \text{LlenadoTallo}(i) \quad (7.11)$$

El llenado del tallo (ya que el engrosamiento es sólo aparente dado que el tallo es hueco), es una razón de la longitud total del tallo y se hace diariamente.

Finalmente, la biomasa dedicada a la formación de nueva lámina foliar en el paso posterior de simulación ($i+1$), se calcula a partir de la asimilación total de la planta menos los gastos de formación de estructuras:

$$\text{DELTABH}(i+1) = \text{DELTAB}(i) - \text{MantenimientoTallo}(i) - \text{DeltaPesoRaíz}(i) \quad (7.12)$$

Heagle *et al.* (2002) encontraron que la relación de peso seco ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) entre la raíz y la parte aérea de la planta de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) fue de 0,12 para el cultigen S156 y 0,20 para Tenderette. Además, la relación de peso seco entre las vainas y el tallo fue de 1,46 para S156 y 0,38 para Tenderette. Estas relaciones no están especificadas directamente en el modelo, pero deben ajustarse como resultado de la simulación.

7.3.4 Desarrollo reproductivo

La regulación interna de la planta determina el cambio de la etapa vegetativa a la reproductiva, que ocurre cuando se cumple un número determinado de nudos en el tallo principal (Truong y Duthion, 1993).

Con el inicio de la etapa reproductiva se cambian las prioridades de desarrollo interno en la planta (Boote, 1995b), de modo que las flores y vainas reciben fotoasimilados hasta satisfacer su demanda interna (limitación por demanda). Sólo si queda algún residuo de asimilados después de alimentar las vainas y el tallo, se produce más área foliar. Por lo tanto, el desarrollo foliar comienza a declinar hasta detenerse, pero la actividad fotosintética se continúa para llenar las vainas. La forma como la planta cambia la partición de asimilados por efecto de la fuerza del vertedero ha sido discutida por Marcelis (1996), y verificada en cultivos de crecimiento indeterminado, como el tomate (Heuvelink, 1996).

En la fase reproductiva, ocurre una fase inicial de formación y elongación de las vainas, y posteriormente una fase de llenado de los granos. En la fase inicial de formación de vainas hay un gasto energético mayor que se explica en cuanto que los tejidos de las estructuras reproductivas son más complejos que los tejidos foliares. La tasa de expansión foliar comienza a declinar en forma proporcional con el desarrollo de las vainas en esta fase.

Cuando termina la fase de formación de vainas, la planta suspende su expansión foliar por competencia interna, y comienza la fase de llenado del grano, dedicando la producción de asimilados casi exclusivamente a esta tarea (limitación por oferta), la cual comienza a declinar con la senescencia de las hojas.

7.3.5 Senescencia

La senescencia se consideró simplemente una función de retardo del crecimiento que se resta al crecimiento actual. Dado que la duración del área foliar se aproxima en 600 grados día (Stöckle *et al.*, 2003, Pic *et al.*, 2002), el retardo se hizo de la misma forma (45 días aproximadamente). En la práctica, debido al aporque que se realiza en la planta, se pierden alrededor de tres hojas en la fase inicial de crecimiento, que se espera que redunde en un mejor desarrollo posterior porque se favorece un mayor desarrollo de raíces.

Esta aproximación es similar a la expuesta por Lizaso *et al.* (2003), quienes propusieron que la senescencia de las hojas individuales de maíz se simulara con la misma función de predicción de la expansión foliar, es decir, el modelo logístico. El valor del coeficiente de forma k del modelo logístico fue el mismo para ambos procesos: expansión y senescencia.

7.3.6 Programación

El esquema propuesto se expresó matemáticamente y se procesó con Tablas dinámicas. Sin embargo, la funcionalidad del modelo se optimiza con la programación en lenguajes especializados, lo cual es parte de un trabajo próximo, que permita incluir el clima como un subsistema.

7.4 Resultados y discusión

Para efectos del modelo, se trabajó con una radiación solar incidente diaria sobre el lote, que resultó ser en promedio de $14,2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, y una temperatura de $14 \text{ }^\circ\text{C}$ promedio día, que corresponde a las observaciones de la estación meteorológica de Tibaitatá durante el ensayo de campo (Sección 5.3.2)

El desarrollo del índice de área foliar según el modelo se representa en la Figura 7.1. La forma de la curva sigue una tendencia sigmoide, pero no tiene la simetría que la caracteriza, lo cual se debe a que en la fase final se reduce drásticamente la biomasa dedicada a la formación de hojas a favor del desarrollo de las vainas. Las irregularidades se deben a la variación diaria de la radiación solar.

En general, como observaron Ishag y Dennett (1998), la curva de desarrollo en peso seco en arveja y otras leguminosas se puede representar con una función expolineal, que permite distinguir una fase inicial exponencial y otra fase de crecimiento lineal. La fase lineal ocurre cuando el cultivo logra cubrir el terreno y la interceptación de la radiación solar es máxima. Una vez se alcanza la fase lineal, el crecimiento de las estructuras de la planta, incluyendo las hojas, también se hace linealmente.

El índice de área foliar llega a un máximo menor de 3. Este valor es similar al que encontraron Ishag y Dennett (1998) para arveja a una densidad de siembra de 20 plantas/m^2 . Sin embargo, los cultivares ‘Countess’ y ‘Consort’ pudieron tolerar densidades de hasta 80 plantas/m^2 , con índices de área foliar mayores a ocho.

En la Figura 7.2 se presenta la curva de consumo de biomasa para el desarrollo de láminas foliares a través del tiempo, donde se pueden distinguir tres fases: una de expansión y crecimiento exponencial, otra de declinación por competencia con el desarrollo de las vainas, y otra final de suspensión de la expansión que coincide con el comienzo de la senescencia. La aparición del primer nudo con flor no impide que la curva de desarrollo foliar siga aumentando unos días (entre 15-20 días), hasta que comienza a declinar rápidamente.

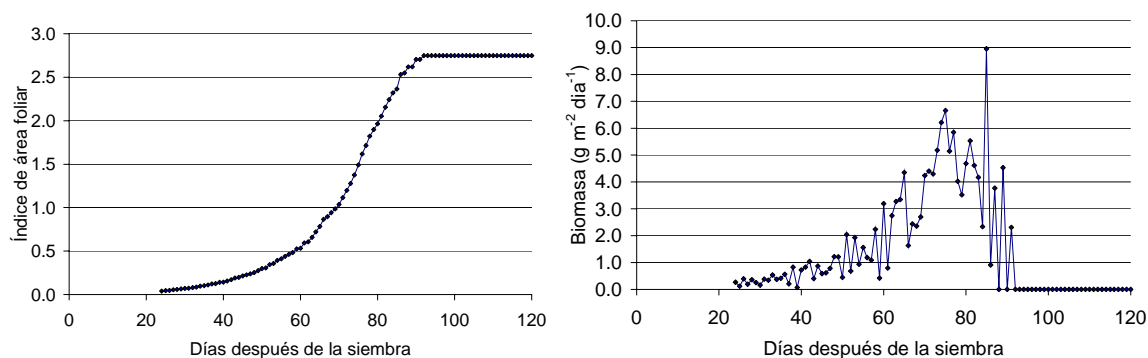


Figura 7.2. Curva simulada del índice de área foliar y de la biomasa dedicada a la formación de follaje

El inicio de la floración tiene un efecto marcado en el desarrollo foliar. Pic *et al.* (2002) observaron que la abscisión de las flores en las plantas de arveja retardaba la senescencia de las hojas en 17 d (270 °C d), comparadas con las hojas de la misma edad en plantas con flores.

Expresar el crecimiento foliar de la planta por la interacción de dos fuerzas orientadoras, también fue utilizada por Yang y Alley (2005), quienes plantearon que la tasa del crecimiento foliar era el resultado de restarle al crecimiento potencial, una tasa correspondiente al crecimiento de tallos, raíces, hojas maduras, y órganos reproductivos. Para una hoja individual de rango L , el área S se estima con la fórmula:

$$S = S_0 \exp[(L-L_0)^2 / (-2k^2)] \quad (7.13)$$

Donde S_0 es el área máxima de la hoja individual en el rango L_0 , y k es una constante. Este modelo se evaluó en el cultivo de maíz con resultados de 64 combinaciones de genotipo por ambiente entre 1989 y 2001, con un ajuste alto, según el coeficiente de correlación múltiple ($r \geq 0,97$).

La suspensión del desarrollo foliar ocurre entre los 90 y 100 días, no está determinada explícitamente en el modelo, sino que resulta de la competencia por asimilados entre las hojas y las vainas, a favor de estas últimas. Esta fase es absolutamente necesaria porque permite el desarrollo de nudos reproductivos (son 7 nudos reproductivos en promedio). El pico de desarrollo foliar cercano a los 100 días está de acuerdo con los resultados que

presentaron O'Connell *et al.* (2004) para el índice de área foliar verde. Después del pico, el índice comienza a decrecer a razón de la senescencia de las hojas.

La forma de estimar el crecimiento de las estructuras vegetales partiendo del máximo potencial, es común a muchos modelos. Lawless *et al.* (2005) propusieron un modelo de desarrollo foliar para trigo donde se calcula primero el crecimiento potencial de la hoja, y posteriormente se aplican las limitantes al crecimiento por razón de la disponibilidad de recursos, para obtener finalmente las áreas de las hojas individuales.

En la fase de suspensión de la expansión foliar, el crecimiento reproductivo aumenta dramáticamente porque la planta dedica la mayor parte de sus asimilados para este efecto (Figura 7.3) lo cual comprende la formación de vainas y el llenado de los granos. Jeuffroy y Devienne (1995) observaron que la acumulación de materia seca en las vainas individuales, gastaban 600 °C d contados a partir del momento de la antesis y considerando una temperatura base de 0°C.

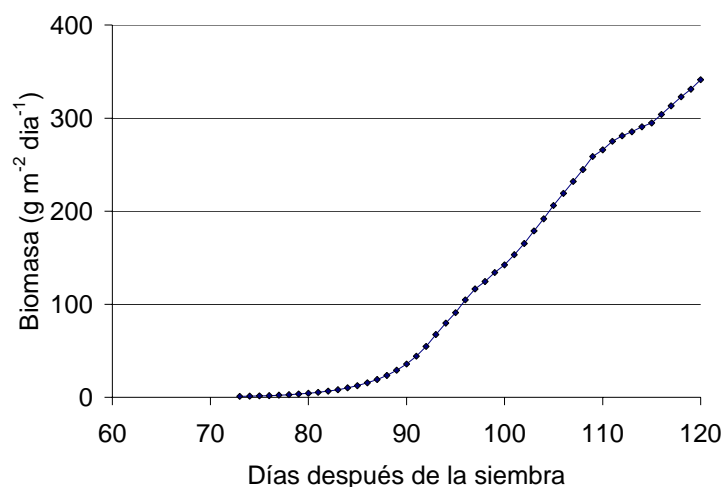


Figura 7.3. Curva de biomasa acumulada para el crecimiento de las vainas de arveja

La forma de la curva de crecimiento de las vainas es similar a la que observaron Torres (1983) en arveja var. Early Sweet, de ciclo vegetativo corto. La curva inicia lentamente su ascenso a partir de los 40 días con la aparición de flores, y posteriormente aumenta linealmente hasta el fin del ciclo del cultivo, para un total de 42 días de periodo reproductivo.

Según el modelo, la asignación de asimilados se hace mayor en la medida del desarrollo de frutos, lo cual es consistente con las observaciones de Lecoeur y Sinclair (2001) que corroboran un crecimiento lineal del índice de cosecha en función del tiempo térmico en el cultivo de arveja, para 31 experimentos que cubrieron un rango amplio de condiciones de temperatura.

En soya, Koch y Schrader (1984) obtuvieron que la contribución de las hojas al llenado de los granos en cuanto al contenido de aminoácidos aumentó del 12 al 48% a través del desarrollo de las vainas.

Según el modelo propuesto, la fotosíntesis de la fase final del ciclo del cultivo es la responsable de la producción, mientras que las fases iniciales están encargadas de construir la infraestructura necesaria para llevar a cabo esta función. Como observaron Aguirrezábal *et al.* (2003) en girasol (*Helianthus annuus* L.), el periodo comprendido entre los 250 °C d y 450 °C después de floración, fue el que determinó el peso final y la concentración de aceite en la semilla en la cosecha.

Esta tendencia se aplica a especies muy diferentes. En sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], Gerik *et al.* (2004) observaron que la mejor estimación del número de granos por planta se obtiene de la acumulación de materia seca durante el intervalo de 360 °C d que comprende desde la ramificación de la panícula para formar espiguillas, hasta la elongación de la panícula durante y después de antesis. Después de esta fase, la panícula aumenta su tamaño, pero el número de granos ya está definido.

Por la construcción del modelo, el número de nudos que puede formar la planta no es un parámetro explícito del modelo, sino que depende de la disponibilidad de asimilados para llenar la demanda de los granos, y formar nuevos nudos con el sobrante. Esto le da la capacidad al modelo de acercarse al comportamiento del cultivo de arveja, el cual, cuando las condiciones son favorables, puede formar mayor número de nudos y aumentar su productividad aún a costa de alargar la duración del ciclo. Como observaron Vega *et al.* (2001) en soya, el crecimiento indeterminado de la planta permite una relación lineal entre el número de granos formados y la duración del período de llenado, reflejo de una alta plasticidad reproductiva, mientras que en maíz y girasol se observaron toques de productividad asociadas a restricciones morfogénicas.

La forma como el modelo representa el llenado de las vainas lleva implícita la prioridad de llenado de los granos para las primeras vainas formadas, aunque la competencia por luz puede alterar esta tendencia. Roche y Jeuffroy (2000) observaron en arveja variedad Solara que el número del nudo reproductivo con mayor número de semillas fue el segundo, aunque bajo densidades altas podía subir hasta el sexto.

Jeuffroy y Devienne (1995) observaron que la distribución de asimilados hacia las vainas es diferente según la etapa de desarrollo de las mismas: en la fase inicial, en la cual los granos son susceptibles a abortar, depende de la biomasa de la vaina, y en la fase posterior, terminada la fase abortiva, del número de granos formados.

El modelo exhibe un rendimiento promedio de la planta, dado que se parte de información de campo para estimar los parámetros, y corresponde únicamente a la producción del tallo principal. Sin embargo, la producción por planta generalmente es alrededor de dos veces la producción del tallo principal, como se verá más adelante con los datos de campo (Capítulo 8).

7.5. Conclusiones

En este capítulo se plantea un modelo de simulación que explica como se producen y distribuyen los asimilados en la planta de arveja. Se propuso que la declinación observada en el crecimiento foliar después del inicio de la floración, se explique por el consumo de asimilados por parte de las estructuras reproductivas en desarrollo.

El modelo no plantea explícitamente la detención del crecimiento de la planta, de modo que permite el desarrollo de nudos en forma indeterminada. Es el grado de desarrollo de las estructuras vegetativas antes de la floración, lo que le permite a la planta suplir los requerimientos del mayor número de nudos con estructuras reproductivas después de floración, antes de que la demanda total de asimilados por las vainas llegue a un nivel que impida la aparición de nuevos nudos.

El modelo considera que el consumo de biomasa por parte del tallo es continuo a lo largo del ciclo de desarrollo hasta que se suspende la aparición de nuevos nudos. De este modo se discrimina el crecimiento en el tallo en elongación y llenado.

7.6 Literatura citada

Aguirrezábal, L.A., Y. Lavaud, G.A. Dosio, N.G. Izquierdo, F.H. Andrade y L.M. González. 2003. Intercepted solar radiation during seed filing determines sunflower weight per seed and oil concentration. *Crop Science* 43:152–161.

Alagarswamy, G., K.J. Boote, L.H. Allen jr. y J.W. Jones. 2006. Evaluating the CROPGRO–soybean model ability to simulate photosynthesis response to carbon dioxide levels. *Agronomy Journal* 98: 34–42

Berntsen, J., H. Hauggard-Nielsen, J.E. Olsen, B.M. Petersen, E.S. Jensen y A. Thomsen, 2004. Modelling dry matter production and resource use in intercrops of pea and barley. *Field Crops Research* 88: 69–83

Boote, K.J. 1995a. Simulating Basic Growth Processes. Carbon Balance. Training Program on Computer Simulation for Crop Growth and Nutrient Management, May 8-19. International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, Alabama, USA.

Boote, K.J. 1995b. Simulating Basic Growth Proceses. Crop Development Balance. Training Program on Computer Simulation for Crop Growth and Nutrient Management, May 8-19. International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, Alabama, USA.

Castro R., M. 1995. Evaluación de arveja voluble (*Pisum sativum* L.) en diferentes densidades y sistemas de siembra en la región de Simijaca (Cundinamarca). Tesis de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 86 p.

Chuai-Aree, S.W. Jäger, H.G. Bock y S. Siripani. 2002. Smooth animation for plant growth using time embedded component and growth function. *Computational Mathematics and Modeling*. Mahidol University, Curtin University of Technology. 8 p.

- Clemente, R.S., M.E. Asadi y N.D. Prakash. 2005. Assessment and comparison of three crop growth models under tropical climate conditions. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 3: 254-261.
- Díaz-Ambrona, C.H., A.M. Tarquis y M.I. Mínguez. 1998. Faba bean canopy modelling with a parametric open L-system: a comparison with the Monsi and Saeki model. *Field Crops Research* 58: 1-13.
- Espinosa, N. y G. Ligarreto, 2005. Evaluación de la habilidad combinatoria y heterosis de siete progenitores de arveja *Pisum sativum* L. *Agronomía Colombiana* 23:197-206
- Ewert, F., 2004. Modelling Plant Responses to Elevated CO₂: How Important is Leaf Area Index?. *Annals of Botany* 93: 619-627.
- Gerik, T.J., W.D. Rosenthal, R.L. Vanderlip y L.J. Wade. 2004. Simulating seed number in grain sorghum from increases in plant dry weight. *Agronomy Journal* 96:1222–1230.
- Goudriaan J.Y., H.H. Van Laar. 1995. Modelling Potential Growth Processes. Textbook with exercises. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. 238 p.
- Greer J.E., S. Falk, K.J. Greer y M.J. Bentham. 1993. Explaining and justifying recommendations in an agriculture decision support system. *Computers and Electronics for Agriculture* 11: 195-214.
- Gutierrez A.P., J.R. Hakim, E. Mariot y A. Villacorta. 1993. A model for the growth and development of three varieties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.): Factors affecting yield and quality. *Agricultural Systems* 44: 35-63.
- Heagle, A.S., J.E. Miller, K.O. Burkey, G. Eason y W.A. Pursley. 2002. Growth and yield responses of snap bean to mixtures of carbon dioxide and ozone. *Journal of Environmental Quality* 31:2008–2014.
- Hoskinson R.L., J.R. Hess y R.K. Fink. 1999. A Decision Support System for Optimum Use of Fertilizers. 2nd European Conference on Precision Agriculture, July 11-15. INEEL (Idaho National Engineering&Environmental Laboratory).
- Ishag, K.H. y M.D. Dennett. 1998. Use of the exponential growth model to analyse the growth of faba bean, peas and lentils at three densities: fitting the model. *Annals of Botany* 82: 497-505
- Jeuffroy, M. y F. Devienne. 1995. A simulation model for assimilate partitioning between pods in pea (*Pisum sativum* L.) during the period of seed set; validation in field conditions. *Field Crops Research* 41: 79-89.
- Kiniry J.R. y C.A. Jones, (ed.) 1986. CERES-Maize, A simulation model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press, 194 p.

- Koch, K.E. y L.E. Schrade. 1984. 14C-Photosynthate partitioning and translocation in soybeans during reproductive development. *Plant Physiology* 75: 1040-1043.
- Lawless, C., M.A. Semenov, P.D. Jamieson. 2003. A wheat canopy model linking leaf area and phenology. *European Journal of Agronomy* 22: 19–32.
- Lecoeur, J. y B. Ney. 2003. Change with time in potential radiation-use efficiency in field Pea. *European Journal of Agronomy* 19: 91-105.
- Lecoeur, J. y T.R. Sinclair. 2001. Harvest index increase during seed growth of field pea. *European Journal of Agronomy* 14: 173–180.
- Lentz, W. 1998. Model applications in horticulture: a review. *Scientific Horticulture* 74: 151-174.
- Lizaso, J.I., W.D. Batchelor, K.J. Boote, M.E. Westgate, P. Rochette y A. Moreno-Sotomayor. 2005. Evaluating a leaf-level canopy assimilation model linked to CERES-Maize. *Agronomy Journal* 97: 722-733.
- Loomis, R.S. y W.A. Williams. 1963. Maximum crop productivity: an estimate. *Crop Science* 3: 67-72.
- Marcelis, L.F. 1996. Sink Strength as a Determinant of Dry Matter Partitioning in the Whole Plant. *Journal of Experimental Botany* 47:1281-1291.
- Marcelis, L.F., E. Heuvelink y J. Goudriaan, 1998. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae* 74:83-111.
- Mathieu, A., P.H. Cournède y P. DeReffye. 2004. The influence of photosynthesis on the number of metamers per growth unit in GreenLab model. En: Godin, C., J. Hanan, W. Kruth, A. Lacoïnte, A. Takenaka, P. Prusinkiewicz, T. DeJong, C. Beveridge y B. Andrieu. (eds.). 4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models, Montpellier, France, 7-11 junio. p 248-252.
- Miller, P., W. Lanier y S. Brandt. 2001. Using Growing Degree Days to Predict Plant Stages. Montana State University, USA. Extension Service.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2006. Acuerdo de competitividad de la cadena de hortalizas. Observatorio Agrocadenas Colombia. 53 p. En: http://www.agrocadenas.gov.co/hortalizas/documentos/Acuerdo_competitividad_hortalizas.pdf. Consultado en septiembre/2006.
- Monsi, M. y T. Saeki. 1953. Über den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und sein bedeutung für die stoffproduktion. *Japan Journal of Botany* 14:22-52

O'Connell, M.G., G.J. O'Leary, D.M. Whitfield y D.J. Connor. 2004. Interception of photosynthetically active radiation and radiation-use efficiency of wheat, field pea and mustard in a semi-arid environment. *Field Crops Research* 85: 111–124.

Payne W.A., P.E. Rasmussen, C. Chen y R.E. Ramig, 2001. Assessing Simple Wheat and Pea Models Using Data from a Long-Term Tillage Experiment. *Agronomy Journal*. 93:250–260.

Pic, E., B. Teyssendier, F. Tardieu y O. Turc. 2002. Leaf senescence induced by mild water deficit follows the same sequence of macroscopic, biochemical, and molecular events as monocarpic senescence in pea. *Plant Physiology* 128: 236–246.

Poorter, H., 1989. Plant growth analysis: towards a synthesis of the classical and the functional approach. *Physiologia Plantarum* 75:237-244.

Poorter H. y E. Garnier. 1996. Plant growth analysis: an evaluation of experimental design and computational methods. *Journal of Experimental Botany* 47:1343-1351.

Poorter, H. y O. Nagel. 2000. The role of biomass allocation in the growth response of plants to different levels of light, CO₂, nutrients and water: a quantitative review. *Australian Journal of Plant Physiology* 27: 595–607.

Reffye, P. de y P.H. Cournède, 2005. A Powerful Factorization Method to Compute Plant Growth and Architecture. Applications in Agronomy and Computer Graphics. Blaise Pascal University, France.

Ridao, E., C.F.Oliveira, J.R. Conde y M.I. Mínguez. 1996. Radiation interception and use, and spectral reflectance of contrasting canopies of autumn sown faba beans and semi-leafless peas. *Agricultural and Forest Meteorology* 79:183-203.

Rizalli, R.H., F.J. Villalobos y F. Orgaz. 2002. Radiation interception, radiation-use efficiency and dry matter partitioning in garlic (*Allium sativum* L.). *European Journal of Agronomy* (18): 33-43.

Roche, R. y M.H. Jeuffroy. 2000. A Model to Calculate the Vertical Distribution of Grain Number in Pea. *Agronomy Journal* 92:663–671.

Roche, R., M.H. Jeuffroy y B. Ney. 1999. Comparison of different models predicting the date of beginning of flowering in pea (*Pisum sativum* L.). *Ecological Modelling* 118:213–226.

Röhrig M., H. Stützel y C. Alt. 1999. A Three-Dimensional Approach to Modeling Light Interception in Heterogeneous Canopies. *Agronomy Journal* 91: 1024-1032.

Rosati, A. y T.M. Dejong. 2003. Estimating photosynthetic radiation use efficiency using incident light and photosynthesis of individual leaves. *Annals of Botany* 91: 869-877.

Rossiter, D.G. y S.J. Riha. 1999. Modeling Plant Competition with the GAPS Object-Oriented Dynamic Simulation Model. *Agronomy Journal* 91:773–783.

Salazar, M.R. 2006. Un modelo simple de producción potencial de uchuva (*Physalis peruviana* L.). Trabajo de grado, Facultad de Agronomía, Escuela de Posgrados, Universidad Nacional de Colombia. 108 p.

Sharpley, A.N. y J.R. William (eds.) 1990. EPIC – Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. U.S. Department of Agriculture. Technical Bulletin No. 1768. 235 pp.

Song, C. y L.E. Band. 2004. MVP: a model to simulate the spatial patterns of photosynthetically active radiation under discrete forest canopies. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 1192-1203.

Stöckle, C.O., M. Donatelli y R.L. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18: 289-307.

Torres, F.A. 1983. Acción del ácido naftalenacético sobre el crecimiento y floración en arveja (*Pisum sativum* L.). Tesis de grado, Programa de Estudios para Graduados en Ciencias Agrarias Universidad Nacional de Colombia – Instituto Colombiano Agropecuario, Bogotá. 67 p.

Truong, H.H. y C. Duthion. 1993. Time of flowering in pea (*Pisum sativum* L.) as a function of leaf appearance rate and node of first flower. *Annals of Botany* 72:133–142.

Turner, D.P., S.V. Ollinger y J.S. Kimball, 2004. Integrating Remote Sensing and Ecosystem Process Models for Landscape- to Regional-Scale Analysis of the Carbon Cycle. *BioScience* 54(6): 573-584.

Vega, C.R., F.H. Andrade, V.O. Sadras, S.A. Uhart y O.R. Valentinuz. 2001. Seed number as a function of growth. A comparative study in soybean, sunflower, and maize. *Crop Science* 41:748–754

Williams, J.R., C.A. Jones, J.R. Kiniry y D.A. Spindel. 1989. The EPIC crop growth model. *Transactions of the ASAE* 32: 497-511.

Wilson D.R. y M. Robson. 2006. Pea phenology responses to temperature and photoperiod. 13th Australian Agronomy Conference 10-15 Septiembre 2006, Perth, WA. En: <http://www.regional.org.au/au/asa/1996/contributed/590wilson.htm>. Consultado en septiembre/2006

Yan, H.P., M.Z. Kang, P. De Reffye y M. Dingkuhn, 2004. A Dynamic, Architectural Plant Model Simulating Resource-dependent Growth. *Annals of Botany* 93: 591-602

Yang, J. y M. Alley. 2005. A mechanistic model for describing corn plant leaf area distribution. *Agronomy Journal* 97:41–48.

CAPÍTULO 8. MODELACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD POTENCIAL DEL CULTIVO DE ARVEJA (*Pisum sativum* L.) EN RESPUESTA A LA DENSIDAD DE PLANTAS

8.1 Resumen

Un factor determinante en la interceptación de luz por el cultivo, la eficiencia en el uso de la luz, y la productividad, es la densidad de plantas. En esta investigación se evalúa el modelo de simulación propuesto en el Capítulo 7, para determinar el efecto de la densidad de plantas en la productividad del cultivo de arveja. Se encontró que la curva de productividad sigue la forma logarítmica, con tendencia a converger cerca de los $12 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, con 30 tallos/m^2 . Los resultados se confrontaron con un ensayo de campo en la Sabana de Bogotá (2640 m.s.n.m., $14 \text{ }^\circ\text{C}$, 80% H.R., 800 mm de lluvia/año), en el cual se exploró el nivel de productividad en diferentes puntos del terreno con propiedades de suelos y humedad diferentes. Se observó que el máximo de productividad alcanzado fue de $9,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Sin embargo, la condición de campo en el CAM no puede considerarse la ideal, y debe continuarse la validación del resultado con nuevos experimentos. Otros parámetros de crecimiento y desarrollo, como el primer nudo con flor, nudos totales a cosecha y número de nudos reproductivos en el tallo principal fueron consistentes con los resultados de ensayos anteriores.

Abstract

A determinant factor in crop light interception, light use efficiency, and productivity, is the plant density. In this research a simulation model proposed in Chapter 7 was evaluated to determine plant density effect on pea crop productivity. It was found that the productivity curve follow a logarithmic function shape, with trend to converge near $12 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ at 30 stems/m^2 . The results were confronted with data from a field experiment at Bogotá flat highland (2640 m over sea level, $14 \text{ }^\circ\text{C}$, 80% R.H., rainfall of 800 mm/year), where the productivity was evaluated at several points with different properties of fertility and water content. Maximum observed crop productivity at field conditions was $9,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. However, field conditions on CAM should not be considered the best, so new experiments are required to validate the simulation results. Other growth and development parameters, as first reproductive node, total node number and total reproductive node number in main stem, were consistent with the results of previous experiments.

8.2 Introducción

Como se expuso en capítulos anteriores, la capacidad del dosel para interceptar la luz determina en primera instancia el nivel de productividad posible del cultivo. El desarrollo del número de hojas y el IAF son parámetros comunes a todos los modelos de simulación. Un factor que incide directamente en este sentido, es la densidad de siembra y la densidad de plantas.

Andrieu *et al.* (2004) afirman que la planta reacciona ante la presencia de plantas vecinas con cambios en su arquitectura que hacen parte de su plasticidad fenotípica. Tales cambios conciernen al crecimiento y desarrollo, a través de la regulación del macollamiento, la extensión de hojas y tallos, la coordinación del cambio de fases en los meristemos apicales, y la modulación del número de fitómeros. Los efectos son mediados por los cambios en las

condiciones del medio ambiente que los órganos vegetales perciben debido a la presencia de los vecinos, especialmente en cuanto a la cantidad de luz.

La densidad de plantas de un cultivo debe ser suficientemente alta para aprovechar el máximo la radiación solar. Sin embargo, una densidad excesiva puede traer problemas de competencia por luz, y reducir la cantidad y calidad de la cosecha. Schwinning (1996) analizó el efecto de la densidad de plantas considerando dos modos de competencia por luz: simétrica, cuando la luz se aprovecha proporcionalmente con la biomasa de los individuos en competencia, o asimétrica, cuando los competidores grandes consiguen más luz de la que corresponde por su tamaño. Shwinning encontró que a bajas densidades del pasto *Pennisetum americanum*, la competencia era simétrica, pero que a altas densidades era asimétrica. Sin embargo, a altas densidades las variaciones de tamaño se mantienen porque las plantas de cualquier tamaño tienen igual promedio de tasa de crecimiento relativo.

La productividad primaria de los cultivos es proporcional a la radiación solar interceptada, condición que representa en últimas el límite a la productividad (Rosati y Dejong, 2003), de modo que la densidad de plantas, en la medida en que afecta la interceptación de luz, está correlacionada directamente con el rendimiento de los cultivos.

Como afirmaron Kadaja y Tooming (2004), establecer un rendimiento de referencia basado en el principio de máxima productividad, limitada únicamente por la PAR y la condición de temperatura, permite ver las posibilidades potenciales de las cultivos y sus variedades bajo condiciones meteorológicas óptimas y situaciones reales de clima subóptimo. Se pueden utilizar para evaluar los recursos agroclimáticos y predecir resultados de materiales mejorados, estimar las necesidades de adecuación de tierras, y ubicar convenientemente los terrenos para los cultivos de acuerdo con el clima y microclima de diferentes regiones y áreas.

De manera análoga, Lisson *et al.* (2005) establecieron que los modelos de simulación se pueden utilizar para establecer el potencial de productividad de los cultivos como punto de referencia para optimizar las prácticas de manejo y guiar la expansión de los sistemas de mercadeo e industria relacionados. Naab *et al.* (2004) utilizaron el modelo CROPGRO para estimar la brecha de productividad del cultivo de maní (*Arachis hypogaea* L.) en Ghana. Observaron que las pérdidas de productividad por limitaciones hídricas estuvieron entre el 10 al 20% cuando se sembró en las estaciones favorables del año. Los daños por plagas y enfermedades fueron en promedio del 40% bajo condiciones limitantes de humedad.

8.3. Materiales y métodos

8.3.1. Ensayo de campo

El ensayo de campo tiene como fin lograr una aproximación a la productividad potencial del cultivo, que ocurre bajo una condición ideal en la cual la planta no sufre por estrés hídrico o nutricional, y no presenta daños bióticos por plagas, enfermedades o malezas (Goudrian y Van Laar, 1994). Sin embargo, durante el desarrollo normal de un cultivo, usualmente ocurren condiciones desfavorables por estrés hídrico que no necesariamente conducen a la manifestación de síntomas aparentes, pero que si pueden reducir la

productividad. En este sentido, Kiniry y Jones (1986) incluyeron varios índices de estrés hídrico diario que afectan directamente la fotosíntesis y la expansión celular en el modelo de crecimiento del maíz CERES-Maize.

Basado en estos principios, se estableció que la productividad se debía evaluar en diferentes puntos del terreno, buscando la condición más favorable para el desarrollo del cultivo. Se partió de un cultivo de arveja var. Santa Isabel, que se llevó a cabo en el Centro Agropecuario Marengo de la Universidad Nacional de Colombia, en el lote 7, durante el primer semestre de 2005. La densidad de plantas fue de 16,6 plantas/m². Se utilizó un lote de 2 hectáreas, en el cual se marcaron 32 puntos en una cuadrícula de 25x25 m. Se hizo un seguimiento del cultivo con evaluaciones semanales del número aparente de nudos en el tallo principal. Al final del ciclo se cosecharon las plantas marcadas para evaluar el tamaño de las hojas por nudo y la producción por planta.

Se tomó la información climática de la estación más cercana del IDEAM, que corresponde al Centro Nacional de Investigación Agropecuaria Tibaitatá, de Corpoica (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria). También se llevó un registro de la precipitación en el lote. Debido a que la condición de temperatura no sufre variaciones estacionales, para efectos de la simulación se tomó la información promedio de éste factor, lo cual no altera en mayor medida los resultados.

Además, la condición del suelo difícilmente es uniforme en la medida de su extensión, y ocurren variaciones espaciales de los niveles de fertilidad. Por lo tanto, se procedió a hacer un análisis foliar de los contenidos de elementos minerales por medio de un muestreo al inicio de la floración (Flynn *et al.*, 1999). Los niveles de nutrientes obtenidos se interpretaron con base en las tablas de Agri-Food Laboratories (2005). Finalmente se aplicó el análisis de correlación lineal simple entre las propiedades del tejido foliar y la productividad del cultivo para explicar en parte las diferencias de crecimiento de las plantas observadas a lo largo del lote.

8.3.2. Simulación del efecto de la densidad

Con base en el modelo descrito en el Capítulo 7, se simularon densidades de 5 a 30 cada 5 unidades de tallos/m² para obtener el rendimiento esperado del cultivo en peso fresco. Las condiciones de temperatura y radiación solar se asumieron constantes durante el desarrollo del cultivo, en 14 °C y 14 MJ·m⁻², que corresponden a los promedios de temperatura y radiación solar que ocurrieron durante el ensayo de campo, según la estación meteorológica de Tibaitatá, CORPOICA.

8.4. Resultados y Discusión

8.4.1 Ensayo de campo

En el lote 7 del CAM ocurrió una gran heterogeneidad en el crecimiento de las plantas de arveja, debido a las condiciones del suelo, en cuanto a nutrientes y drenaje. En la Tabla 8.1 se presentan los resultados del análisis de correlación simple entre los contenidos de elementos minerales en el tejido vegetal de la planta de arveja y la productividad del

cultivo. Se puede apreciar que la variabilidad de la productividad en el lote se explica por los niveles de fósforo, potasio y zinc, pero que los niveles altos de manganeso tiene efecto detrimental. Algunas zonas bajas del lote presentaron encharcamiento en algún periodo del cultivo de arveja. El objetivo en este caso fue buscar sitios específicos donde el cultivo logró la mayor productividad, por la mayor combinación de factores favorables, para aproximarse en lo posible al potencial del cultivo.

Los resultados del desarrollo del cultivo, en cuanto al momento de emergencia y la tasa de aparición de nudos, se presentan en la Tabla 8.2. La tasa de aparición de nudos fue de $0,28 \pm 0,0424$ nudos/día (promedio y desviación estándar, Tabla 8.2), inferior al observado en ensayos anteriores (Tabla 5.1). De acuerdo con el modelo normal, algunas zonas del lote presentan tasas de aparición de nudos iguales o mayores a $0,3615$ nudos.día⁻¹, con un 5% de probabilidad, que se aproxima mejor a los resultados de la condición de invernadero, donde no hubo limitantes por estrés hídrico.

Tabla 8.1. Coeficiente de correlación simple (r^2) de la productividad del cultivo de arveja y los contenidos de nutrientes en el tejido foliar de la planta, según los resultados del ensayo en el lote 7 del CAM, semestre 2 de 2005, n=30

Propiedad	Unidades	Promedio	SD	r^2	Valor P ⁽¹⁾
N	%	2,843	0,233	0,2198	0,2432
P	%	0,290	0,031	0,5007	0,0048 *
Ca	%	0,941	0,157	-0,1613	0,3944
K	%	1,993	0,227	0,4047	0,0265 *
Mg	%	0,181	0,019	0,1493	0,4309
Cu	ppm	7,407	1,912	0,2318	0,2178
Fe	ppm	71,200	9,974	0,1475	0,4367
Mn	ppm	67,667	34,905	-0,6422	0,0001 *
Zn	ppm	89,180	28,770	0,4831	0,0068 *
B	ppm	22,960	10,189	0,0208	0,9132

(1) Probabilidad según la distribución Chi-cuadrado. Valores menores a 0,05 indican correlación entre la propiedad del tejido y la productividad

Tabla 8.2. Estimación por regresión del día de emergencia de las plántulas y la tasa de aparición de nudos en el tallo principal de las plantas de arveja var. Santa Isabel, semestre 2 de 2006, CAM

Característica	N	Promedio	D.E.	Mediana	RIC	SW
Día de emergencia	59	10,3425	4,3995	10,3660	6,9129	0,5048
Tasa de aparición de nudos/d	59	0,2767	0,0424	0,2772	0,0699	0,7502

El inicio de la floración en el nudo 17 y el número de nudos totales a la cosecha de 23,8 que se presentan en la Tabla 8.3, confirman los supuestos establecidos para el trabajo del

modelo. Estas características tienen control genético, como mencionaron Pacheco y Vergara (2005), lo cual explica la poca variación frente a la heterogeneidad de las condiciones del lote.

Respecto al crecimiento en área foliar, también se observaron grandes variaciones, con un promedio de 2795,3 cm²/tallo (Tabla 8.3), para un IAF estimado de 2,3. El máximo de área foliar, en las zonas más productivas, no sobrepasó de 4,5. Esto se debe a la característica del dosel de la planta de arveja, tipo planófilo, que no soporta bien altas densidades.

La mayor productividad observada en el lote estuvo en las 9,5 t·ha⁻¹ (Figura 8.1). El potencial de productividad de la arveja var. Santa Isabel también ha sido observado por Ruíz y Vanegas (1997), con riego por goteo, en 6,3 t·ha⁻¹. FEDECAFE estimó la productividad de la arveja entre 6-8 t·ha⁻¹ para las variedades de crecimiento indeterminado con destino al mercado fresco (FEDECAFE, 1986).

Tabla 8.3. Características de desarrollo de las plantas de arveja var. Santa Isabel, semestre 2 de 2006, CAM

Característica	N	Promedio	SD	Mediana	RIC	SW
Área foliar en el tallo principal	58	2795,31	1974,12	2179,7	3279	0,0001
Primer nudo con flor	55	17,38	3,31	18,0	4	0,0001
Nudos totales a la cosecha	58	23,83	5,49	24,5	7	0,8984
Vainas en el tallo principal	55	9,00	4,77	9,0	8	0,0400
Vainas totales por planta	56	20,93	19,07	15,0	28	0,0001
Productividad (kg·ha ⁻¹)	32	2418,75	2465,12	1965,0	3180	0,0003

8.4.2. Resultados de simulación

Con el modelo propuesto se estimó la producción esperada con diferentes densidades de tallos/m², y los resultados se presentan gráficamente en la Figura 8.3. Se observa que la productividad tiende a converger hacia un máximo por debajo de 12 t·ha⁻¹. Sin embargo, es de suponer que altas densidades traigan consigo los inconvenientes de plagas y enfermedades que se agudizan por la alta humedad generada dentro del cultivo. Además, la calidad de las vainas también puede disminuir, haciéndose más pequeñas y con menor número de granos. Por lo tanto, es posible que en la práctica no sea recomendable apuntar hacia la máxima productividad por m². Con los datos de campo que se presentan adelante se presenta el máximo observado de productividad a nivel experimental en el CAM.

Tal como observaron Lamb *et al.* (2003) en alfalfa (*Medicago sativa*), las altas densidades (450 plantas/m²) producen tallos más delgados, aumentan la caída de hojas debido al autosombreamiento, disminuyen el tamaño de la raíz y el peso de la corona. Además, favorecen la presencia de enfermedades del follaje. Ellos recomendaron una densidad de 180 plantas/m² para este cultivo.

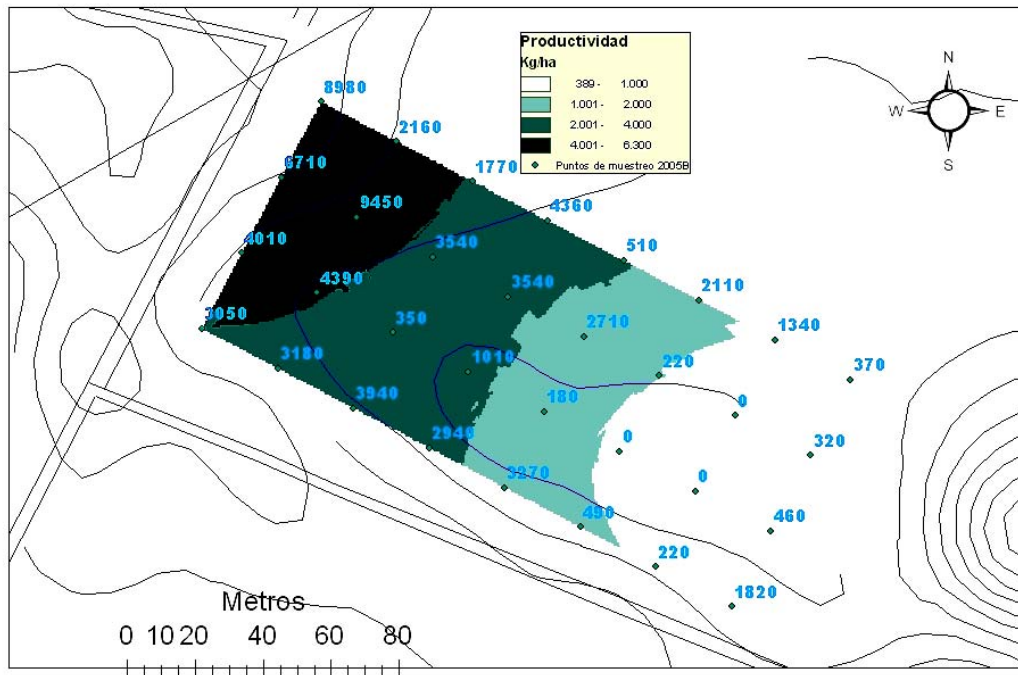


Figura 8.1. Mapa de productividad del cultivo de arveja var. Santa Isabel en el Lote 7 del CAM, segundo semestre de 2006. El objetivo de este análisis fue explorar los sitios de mayor productividad.

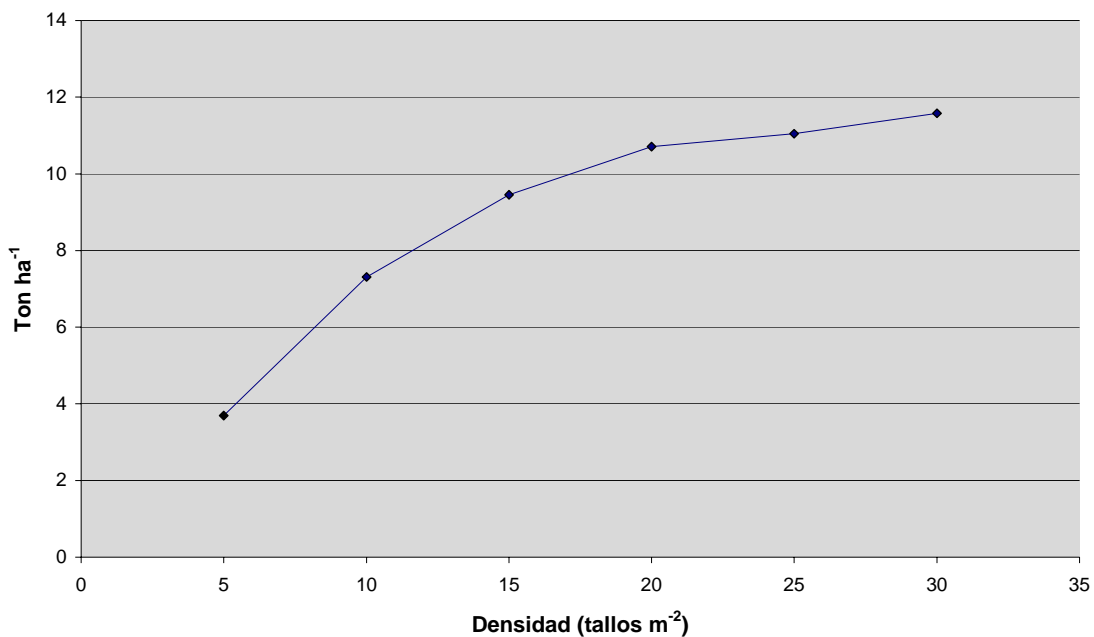


Figura 8.2. Niveles de productividad esperada con diferentes densidades de tallo de arveja var. Santa Isabel bajo condiciones de la Sabana de Bogotá

Jeuffroy y Devienne (1995) observaron que tasa de crecimiento por tallo de arveja varió entre $5,16$ y $14,30 \text{ mg}\cdot(\text{°C d})^{-1}$, por efecto de la densidad de tallos (61 a 257 tallos/m^2), entre otros factores. La relación entre estas dos variables es inversa y sigue la forma de una caída exponencial, según lo cual a mayor densidad, menor peso por tallo, con tendencia a converger hacia un mínimo de peso.

De manera similar al tallo, la forma de la curva de productividad en respuesta a la densidad de siembra, es un reflejo de los diferentes niveles de interceptación de luz. Tal como observaron Stewart *et al.*(2003) en maíz, la curva de respuesta en producción de fotosintetizados en función del área foliar muestra una forma logarítmica, de modo que a mayor área foliar, mayor productividad, pero con convergencia hacia un máximo.

Los niveles de productividad de la arveja pueden variar según el material genético. Se encuentran resultados diferentes según se trate de arveja seca o verde. Monsalve (1983) obtuvo un rendimiento de arveja Guatecana de $4,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ en dos ciclos de cultivo, sembrada a razón de $18,5 \text{ plantas/m}^2$. Noreña y Ortega (1985) obtuvieron un rendimiento máximo para la variedad de arveja Piquinegra de $6,3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ con una densidad de $18,5 \text{ plantas/m}^2$. López (1986) obtuvo un rendimiento de $5,9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, con $16,7 \text{ plantas/m}^2$, con arveja var. Santa Isabel.

Forero y Torres (1986) obtuvieron niveles de rendimiento de arveja var. Santa Isabel hasta de $11,2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ con métodos de labranza cero, a una densidad de 30 plantas/m^2 . Torres (1983) obtuvo un rendimiento máximo de $5,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ con la variedad de arveja voluble de ciclo corto “Early Sweet 11”, a 30 plantas/m^2 .

Peksen *et al.* (2002) obtuvieron diferentes niveles de productividad para los cultivos de arveja verde en Canadá según la distancia entre surcos (20 , 40 y 60 cm) y el cultivar. La productividad en vaina verde más alta fue de $14,49 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, en cultivos a una distancia entre surcos de 20 cm , con el cultivar Utrillo en el ciclo de otoño. El peso de los granos verdes fue de $5,82 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ para el mismo cultivar. Posteriormente, Pekşen *et al.* (2004), en una evaluación de materiales de arveja verde *P. sativum* L., obtuvieron niveles de productividad máximas de $17,84 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ con el cultivar Vilmoren, y un mínimo de $12,3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ con el cultivar Progress No. 9, entre 8 materiales evaluados, con una densidad de 50 plantas/m^2 .

La arveja seca maneja otros niveles de productividad y responde a otros niveles de densidad de plantas, respecto a la arveja verde. La arveja verde maneja hasta un 85% de humedad, mientras que la arveja seca, un 15% o menos. FEDECAFE (1986) menciona que los rendimientos de arveja seca desgranada son del orden de 60 a $100 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Hauggaard *et al.* (2006) observaron que la producción de materia seca en el grano de arveja (cultivar Bohatyr) de crecimiento determinado, aumentó de 470 , 476 y $549 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ para densidades entre 45 , 90 y 180 plantas/m^2 , respectivamente. Poggio *et al.* (2005) observaron que la producción de semilla de *P. sativum* L. varió entre 119 a $331 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, con un peso por semilla entre 67 - 150 mg , por efecto de la combinación de cultivares, fechas de siembra, y ciclo anual. Steppuhn *et al.* (2001) obtuvieron diferentes niveles de productividad del cultivo de arveja según el material. Para el cultivar Carneval, la productividad de grano fue de $1093,8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, y para el cultivar Radley, fue de $836,1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$.

8.5 Conclusiones

El modelo propuesto estima el efecto de las densidades de plantas en la productividad del cultivo de arveja, como resultado de la interacción de las fases vegetativa y reproductiva.

A bajas densidades se favorece el desarrollo de las plantas individuales, las cuales pueden formar área foliar con hojas más grandes, a favor de una mayor productividad por planta. Cuando la densidad es alta, la planta no alcanza a desarrollar suficiente área foliar y la demanda de asimilados por las vainas en la etapa reproductiva rápidamente hace disminuir la partición de asimilados para la formación de más área foliar, con la consecuente reducción en productividad por planta.

Un paso posterior es incluir en el modelo más componentes de rendimiento, y hacer validaciones adecuadas probando diferentes densidades de plantas. Además, se puede incorporar los efectos del medio ambiente, como pueden ser en primer lugar, de la radiación solar y la temperatura. Con un trabajo multidisciplinario, más componentes del ambiente se deben incluir, para evaluar el efecto de la disponibilidad del agua y nutrientes en el crecimiento vegetal.

8.6 Literatura citada

Agri-Food Laboratories. 2005. Ag-Test, providing measurement for management. En: <http://www.agtest.com/main.htm>. Consultado en septiembre de 2006.

Andrieu, B., B. Moulia, G. Maddonni, C. Birch, G. Sonohat y. Sohbi, C. Fournier, J.M. Allirand, M. Chartier, J. Hillier, J.L. Drouet, R. Bonhomme. 2004. Plasticity of plant architecture in response to density: using maize as a model. En: Godin, C., J. Hanan, W. Kruth, A. Lacoite, A. Takenaka, P. Prusinkiewicz, T. DeJong, C. Beveridge y B. Andrieu. (eds.). 4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models, Montpellier, France, 7-11 june. p 141-145.

FEDECAFÉ. 1986. El cultivo de la arveja. Proyecto Hortalizas, Frutales y Flores. Ed. Litocenco Ltda., Cali. 18 p.

Flynn, R., S.T. Ball y R.R. Baker. 1999. Sampling for plant tissue analysis. New Mexico State University. College of Agriculture and Home Economics. Cooperative Extension Service.

Forero, R.A., O.A. Torres. 1986. Control químico de malezas en el cultivo de la arveja (*Pisum sativum* L.) en diferentes épocas en el municipio de Motavita-Boyacá. Trabajo de grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Tunja. 108 p.

Goudriaan J.Y., H.H. Van Laar. 1995. Modelling Potential Growth Processes. Textbook with exercises. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. 238 p.

Hauggaard-Nielsen, H., M.K. Andersen, B. Jørnsgaard, E.S. Jensen. 2006. Density and relative frequency effects on competitive interactions and resource use in pea–barley intercrops. *Field Crops Research* 95: 256–267.

Jeuffroy, M. y F. Devienne. 1995. A simulation model for assimilate partitioning between pods in pea (*Pisum sativum* L.) during the period of seed set; validation in field conditions. *Field Crops Research* 41: 79-89.

Kadaja, J., H. Tooming. 2004. Potato production model based on principle of maximum plant productivity. *Agricultural and Forest Meteorology* 127:17–33.

Kiniry J.R. y C.A. Jones, (ed.) 1986. CERES-Maize, A simulation model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press, 194 p.

Lamb, J.F., C.C. Sheaffer y D.A. Samac. 2003. Population density and harvest maturity effects on leaf and stem yield in alfalfa. *Agronomy Journal* 95:635–641.

Lisson, S.N., N.G. Inman-Bamber, M.J. Robertson y B.A. Keating. 2005. The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems. *Field Crops Research* 92: 321–335.

Monsalve, O. 1983. Efecto de dos poblaciones y dos distancias de siembra de arveja (*Pisum sativum* L.) asociada sobre el crecimiento de dos variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.). Tesis de grado, Programa de Estudios para Graduados Universidad Nacional - Instituto Colombiano Agropecuario, Bogotá. 114 p.

Naab, J.B., P. Singh, K.J. Boote, J.W. Jones y K.O. Marfo. 2004. Using the CROPGRO-peanut model to quantify yield gaps of peanut in the Guinean savanna zone of Ghana. *Agronomy Journal* 96:1231–1242.

Noreña, C.S. y H.A. Ortega. 1985. Efecto comparativo de genotipos en el rendimiento del sistema papa (*Solanum tuberosum*) intercalado con arveja (*Pisum sativum*). Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Bogotá. 95 p.

Pacheco, C.A. y M.C. Vergara. 2005. Clasificación de 127 materiales de arveja (*Pisum sativum* L.) de acuerdo con el comportamiento agronómico y caracteres morfológicos. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Escuela de Posgrados.

Peksen, E., H. Bozoglu, A. Peksen y A. Gülümser. 2002. Determination of the different row spacings on yield an some other properties of pea (*Pisum sativum* L.) cultivars sown in sprint and autumn. *Acta Horticulture* 579:313-318.

Rosati, A. y T.M. Dejong. 2003. Estimating photosynthetic radiation use efficiency using incident light and photosynthesis of individual leaves. *Annals of Botany* 91: 869-877.

Ruíz, J.G., N.E. Vanegas. 1997. Efecto del riego por goteo en la producción del cultivo de arveja (*Pisum sativum* L. var. Santa Isabel). Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Bogotá. 135 p.

Schwinning, S. 1996. Decomposition analysis of competitive symmetry and size structure dynamics. *Annals of Botany* 77:47-57

Steppuhn, H., K.M. Volkmar y P.R. Miller. 2001. Comparing canola, field pea, dry bean, and durum wheat crops grown in saline media. *Crop Science* 41:1827–1833.

Stewart, D.W., C. Costa, L.M. Dwyer, D.L. Smith, R.I. Hamilton y B.L. Ma. 2003. Canopy structure, light interception, and photosynthesis in maize. *Agronomy Journal* 95:1465–1474.

Torres, F.A. 1983. Acción del ácido naftalenacético sobre el crecimiento y floración en arveja (*Pisum sativum* L.). Tesis de grado, Programa de Estudios para Graduados en Ciencias Agrarias Universidad Nacional de Colombia – Instituto Colombiano Agropecuario, Bogotá. 67 p.

9. DISCUSIÓN GENERAL

Whisler *et al.* (1986) manifestaron que los modelos de simulación no son sólo para predecir un resultado final como la biomasa o el rendimiento. Por el contrario, deben ayudar a comprender como la planta crece y se desarrolla, incluyendo los mecanismos fisiológicos apropiados. Esto permite que el modelo permita resolver una amplia variedad de problemas y situaciones.

La interceptación de luz es definitiva en una modelación acertada de la productividad de los cultivos. Stewart *et al.* (2003) afirmaron que con sólo los factores como forma de la planta, densidad de la población, y distancia entre surcos se obtiene una combinación infinita de distribuciones foliares, cada una con la posibilidad de generar una respuesta diferente en fotosíntesis y rendimiento del cultivo.

Marcelis *et al.* (1998) observaron que una de las debilidades de los modelos explicativos del crecimiento de los cultivos era la simulación del desarrollo foliar. En este trabajo se hizo un aporte en el sentido de proveer algunos métodos para estimar el área foliar de la planta en forma no destructiva, lo cual permite hacer un seguimiento al crecimiento con un nivel suficiente de precisión, como lo confirman varios investigadores en otras especies (Awal, 2004; Fleisher y Timlin, 2006; Lizaso *et al.*, 2003; Serdar y Demirsoy, 2006; Bange *et al.*, 2003). Este resultado también refleja un comportamiento regular en la forma de las hojas y las relaciones entre las dimensiones de sus partes, incluyendo estructuras de soporte como pecíolo y ráquis.

El análisis de crecimiento foliar tiene su justificación en la medida de la interceptación de luz y la producción de asimilados por fotosíntesis. Como la interceptación de la RAF no sólo depende del IAF, sino también de las características del dosel, especialmente en cuanto al coeficiente de extinción, es conveniente combinar los métodos propuestos de evaluación de área foliar con algunos métodos para medir la interceptación. En este sentido, el análisis de imágenes para evaluar la cobertura del cultivo puede ser de gran ayuda, como propuso Purcell (2000).

Respecto al desarrollo fenológico del cultivo de arveja, tal como mencionaron Whisler *et al.* (1986), el concepto de unidades acumuladas de calor para predecir el momento de ocurrencia de los estados de crecimiento se ha asumido como un principio universal. La base teórica consiste en que si existe un proceso limitante del crecimiento que es sensible a la temperatura, se afecta todo el desarrollo del cultivo.

Según los resultados obtenidos en arveja, las diferencias en la velocidad de desarrollo son pequeñas en un rango entre 14 °C y 21 °C, lo cual sugiere que la forma de respuesta de la planta a la temperatura tiene forma dentada, donde la temperatura óptima ocurre dentro de un rango. Esta forma dentada ya ha sido observado en otras especies como la papa (Griffin *et al.*, 1993), la soya (Jones *et al.*, 1991), y garbanzo (Soltani *et al.*, 2006), entre otras. En los modelos de respuesta a la temperatura donde la función tiene forma dentada o de meseta, con un rango óptimo entre un mínimo y máximo, resulta más conveniente con fines de simulación calcular los días fisiológicos con un índice que asuma el valor de la unidad

cuando la temperatura ambiente promedio día este dentro del rango óptimo. Por otra parte, el cálculo de los días calor es relativamente sencillo en aquellas especies cuyo punto óptimo es un pico, generalmente superior a los 30 °C, después de lo cual la función decrece linealmente hasta la temperatura máxima en la cual la planta suspende su crecimiento. En maíz, el pico óptimo se encuentra a 34 °C, con una temperatura base de 8°C para el periodo después de emergencia (Jones y Kiniry, 1986). En yuca (*Manihot esculenta* L.), la temperatura óptima está en 30 °C y la base en 13°C (Mathews y Hunt, 1994).

La comparación del desarrollo de la planta de arveja entre la condición de campo y la de invernadero, resalta la importancia de determinar el rango óptimo de temperatura para este cultivo, que según FEDECAFE (1986) está entre los 15 y 18 °C, pero que según los resultados obtenidos, puede estar entre los 14 y 21 °C.

Sin embargo, sin restar importancia al concepto de grados día, para una condición local en la zona tropical, donde la temperatura a lo largo del año varía muy poco, el desarrollo de los cultivos puede predecirse directamente en días calendario sin mayor error. De hecho, algunos investigadores usan las dos formas de medir el tiempo: en días calor o en días calendario (Juskiw *et al.*, 2001, Massawe *et al.*, 2003).

El crecimiento del cultivo de arveja, se expresó en cuanto a la expansión foliar y el aumento de peso seco. En general, los procesos de crecimiento deben ser evaluados separadamente de los de desarrollo, tal como propuso Ritchie (1991). En este sentido conviene distinguir entre el desarrollo morfológico, que se usa para determinar la aparición y el número de estructuras, ya sean hojas, ramas o frutos, y el desarrollo fásico, que se usa para determinar la duración entre dos estados vegetales o eventos de desarrollo morfológico. Estos dos procesos trabajan en forma bastante independiente, aunque estrechamente acoplados. Por ejemplo, en arveja se observó que el cultivo comienza la floración a los 74 días después de la siembra, pero a su vez, coincide con el nudo número 17 en el tallo principal.

En vez de utilizar la propuesta de Verdoodt *et al.* (2004) para simular el crecimiento del follaje en dos fases: una vegetativa de crecimiento lineal rápida, y otra reproductiva con una caída exponencial hasta el final del ciclo del cultivo, o la que proponen Jones y Kiniry (1986) de utilizar una función diferente de crecimiento foliar para cada etapa fenológica del cultivo, en este modelo se sugiere deducir la caída del crecimiento del follaje por efecto del desarrollo mismo de las estructuras reproductivas. Aunque las dos aproximaciones puedan arrojar resultados similares, el modelo de arveja permite simplificar el sistema y explicarlo con fundamento por la competencia entre los órganos vegetativos y reproductivos por los asimilados.

En el modelo propuesto se estima la productividad potencial del cultivo de arveja, basándose únicamente en la condición de temperatura y radiación solar como entradas al sistema, y utilizando algunas funciones básicas de crecimiento y desarrollo. A este nivel, cuando la planta no sufre los limitantes por agua o nutrientes, ni el ataque de otros organismos en su medio biótico (plagas, enfermedades y arvenses), se obtiene una productividad teórica, un tope del cual sólo se obtienen aproximaciones a nivel de campo. Sin embargo, en el desarrollo de modelos de simulación, es conveniente avanzar por etapas,

comenzando por los niveles más sencillos, como afirmaron Goudriaan y van Laar (1994). Esto permite un ajuste progresivo de los parámetros, en la medida en que se va avanzando en complejidad.

Como aseguraron Jones y Boote (1987), el principal problema de crear un modelo con muchas variables es que la investigación requerida para implementar, probar y aplicar el modelo puede ser tan extensa que se sale de los límites prácticos de cualquier estudio. Además, cuando los modelos incluyen muchos componentes, es frecuente la existencia de una alta correlación entre los parámetros, de modo que la calibración se hace cada vez más difícil. Aunque Wallach *et al.* (2001) propusieron un método que permite reducir el número de parámetros a estimar y por esta vía simplificar los problemas numéricos asociados en el ajuste de modelos más complejos, queda claro que el desarrollo de los modelos también debe avanzar hacia una mayor simplificación, sin perder su capacidad predictiva.

Como afirma Sirotenko (2001), la inclusión de aspectos adaptativos del crecimiento y desarrollo de la planta hará que los modelos tengan un comportamiento más complejo, pero no necesariamente irá acompañado de una complicación innecesaria de los modelos en sí mismos. La matemática asociada al desarrollo de modelos, juega un papel importante en la creatividad necesaria para construir una teoría adecuada de soporte.

El objetivo principal del modelo fue estimar el rendimiento potencial del cultivo. En este modelo, la tasa de formación de asimilados y las pérdidas por respiración de crecimiento y mantenimiento, están cuantificadas con la eficiencia de conversión de energía en biomasa neta, de la forma como propusieron Verdoodt *et al.* (2004). Ellos utilizaron el simulador DAICROS (DAILY CROp growth Simulator) para calcular la producción potencial del fríjol (*Phaseolus vulgaris* L.). Seguramente, un desarrollo posterior del modelo debe discriminar entre fotosíntesis y respiración, con el fin de simular en forma adecuada los efectos adversos del medio ambiente, especialmente en cuanto temperaturas extremas o de estrés hídrico (Lizaso *et al.*, 2005).

Aunque el interés del modelo sea el rendimiento del cultivo, es necesario que exista un soporte a nivel fisiológico y bioquímico que explique los procesos involucrados y permita posteriormente prever el efecto de las condiciones ambientales y los factores de manejo agronómico que puedan intervenir en el resultado (Goudriaan y van Laar, 1994). Por ejemplo, la fuerza del vertedero que se plantea en el modelo, ha sido demostrada experimentalmente en la planta de arveja (Munier y Salon, 2003). El flujo de sacarosa en la savia floemática se aumenta con el número de nudos. Además, el suministro de sacarosa a las semillas durante la fase de multiplicación celular está correlacionado con la tasa de crecimiento potencial de la semilla. Estas relaciones no están afectadas por los niveles de nitrógeno en la planta. Por el contrario, la deficiencia de nitrógeno tiene efecto en cuanto a la reducción del número de nudos florales y el número de semillas por vaina.

De esta forma se pueden hacer nuevas propuestas para enriquecer el modelo cuando se considere como limitante el suministro de nitrógeno a la planta. Esto significa que el enfoque de sistemas para analizar el comportamiento de los cultivos ha motivado un cambio en la forma de investigar en agricultura. Como afirmaron Uehara y Tsuji (1993), este enfoque se sustenta en que la mejora de un componente del sistema no necesariamente

conduce a un mejor desempeño del sistema completo, si no se entiende como los componentes del sistema interactúan entre sí. Por lo tanto, es necesario que los temas de investigación estén siempre enmarcados dentro de un sistema que los comprenda.

En general, existen unos procesos fisiológicos básicos que se cumplen en todos los cultivos, de modo que los modelos de simulación se pueden desarrollar sobre una estructura única, a partir de la cual se hacen los ajustes necesarios para cada especie vegetal y cada material genético con ayuda de los “coeficientes genéticos” (Williams *et al.*, 1989). Estos coeficientes en su mayoría se determinan en forma más precisa bajo condiciones controladas en cámaras bioclimáticas (Ritchie, 1993).

Poluektov y Topaj (2001) afirmaron que la modelación de cultivos es ahora una industria poderosa por sí misma, con sus propias tareas, métodos y campos de aplicación. Ellos argumentaron que el desarrollo de una base matemática adecuada para los modelos era necesaria para explicar en forma coherente los procesos involucrados en la productividad de los cultivos.

Una limitación importante para el uso de los modelos de simulación, es la necesidad de disponer de información confiable de suelos y clima. Este problema es común a muchos países en vías de desarrollo, especialmente en lo referente a la radiación solar, y por ello Rivington *et al.* (2002) propusieron y evaluaron varios métodos de estimación a partir de los diferentes datos climáticos disponibles, como son: conversión a partir de la duración del brillo solar, estimación a partir de las dos estaciones meteorológicas más cercanas, y el método de Campbell-Donatelli, que utiliza la radiación extraterrestre y la corrige por transmisividad atmosférica con base en la temperatura del aire.

10. CONCLUSIONES GENERALES

Los métodos no destructivos propuestos para estimar el área foliar de la planta de arveja hacen posible el seguimiento al crecimiento a través del tiempo para medir parámetros de interés en simulación.

La tasa de aparición de nudos en el tallo de arveja fue una característica fenológica constante sin variaciones importantes a lo largo del ciclo del cultivo, incluso con el cambio de la etapa vegetativa a la reproductiva.

La forma de la curva de respuesta de la planta a la temperatura es dentada, con una meseta óptima cuyo rango está por definir. Se requiere evaluar más ambientes con diferentes temperaturas para una conclusión definitiva.

El análisis de crecimiento debe hacerse por separado para láminas foliares (hojas y estípulas), tallo, raíz, y estructuras reproductivas. Las observaciones alométricas permiten asegurar la conveniencia de esta división.

El crecimiento del cultivo de arveja se modeló de acuerdo con los parámetros observados de tiempo de emergencia del cultivo, área foliar específica, primer nudo del tallo con flor, e índice de cosecha.

El modelo de simulación explica el crecimiento indeterminado del cultivo, de modo que el número de nudos que se forman en el tallo principal es variable y depende de la capacidad de la planta para suplir las necesidades de las estructuras reproductivas y con el restante de asimilados, formar más nudos.

La declinación del desarrollo foliar después de floración, se explicó por efecto de la competencia de asimilados entre las estructuras vegetativas y reproductivas.

El potencial de productividad del cultivo bajo condiciones de la Sabana de Bogotá, se estimó basándose en los parámetros de crecimiento, y asumiendo que no hay limitaciones en el suministro de agua y nutrientes, ni reducciones de biomasa por agentes bióticos (plagas, enfermedades, y arvenses).

11. RECOMENDACIONES

El desarrollo posterior del modelo requiere un trabajo multidisciplinario, para incluir aspectos como el balance hídrico del suelo, la eficiencia en el uso del agua por parte del cultivo, el efecto de las condiciones del suelo en la nutrición vegetal, la reducción de los rendimientos por el ataque de plagas y enfermedades, la competencia con arvenses, entre otros aspectos que requieren el concurso de diferentes especialidades.

Es conveniente evaluar la posibilidad de incluir los parámetros del modelo de arveja en otros sistemas de simulación como CROPSYST y DSSAT, para de este modo acceder los módulos ya construidos de suelos, clima, y manejo de rotaciones de cultivos.

El uso de los modelos tiene aplicabilidad en la medida en que existan bases de datos confiables y consolidadas especialmente en aspectos de suelos, recursos hídricos, y clima. Aunque se han hecho ya algunas aproximaciones interesantes por parte de la FAO, para interpolar la información climática con las diferentes estaciones disponibles, aún debe recalcar en la importancia de unos datos de buena calidad con registros continuos.

La investigación en arveja, como en otras especies, debería diseñarse pensando en alimentar el modelo de simulación. Esto obliga a un trabajo interdisciplinario en el cual se deben integrar profesionales de diferentes áreas para un objetivo común.

12. Literatura general citada

Agri-Food Laboratories. 2005. Ag-Test, providing measurement for management. En: <http://www.agtest.com/main.htm>. Consultado en septiembre de 2006.

Aggarwal, P.K., N. Kalra, S. Chander y H. Pathak. 2006a. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. I. Model description. *Agricultural Systems* 89: 1–25.

Aggarwal, P.K., B. Banerjee, M.G. Daryaei, A. Bhatia, A. Bala, S. Rani, S. Chander, H. Pathak y N. Kalra. 2006b. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. II. Performance of the model. *Agricultural Systems* 89: 47–67.

Aguirrezábal, L.A., Y. Lavaud, G.A. Dosio, N.G. Izquierdo, F.H. Andrade y L.M. González. 2003. Intercepted solar radiation during seed filing determines sunflower weight per seed and oil concentration. *Crop Science* 43:152–161.

Alagarswamy, G., K.J. Boote, L.H. Allen jr. y J.W. Jones. 2006. Evaluating the CROPGRO–soybean model ability to simulate photosynthesis response to carbon dioxide levels. *Agronomy Journal* 98: 34–42.

Andrieu, B., B. Mouliá, G. Maddonni, C. Birch, G. Sonohat, Y. Sohbi, C. Fournier, J.M. Allirand, M. Chartier, J. Hillier, J.L. Drouet, R. Bonhomme. 2004. Plasticity of plant architecture in response to density: using maize as a model. En: Godin, C., J. Hanan, W. Kruth, A. Lacombe, A. Takenaka, P. Prusinkiewicz, T. DeJong, C. Beveridge y B. Andrieu. (eds.). 4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models, Montpellier, France, 7-11 june. p 141-145.

Arjona, H, R. Sabogal T. y G. Suárez P. 1977. El cultivo de la arveja (*Pisum sativum*). Publicación Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Bogotá. Segunda edición. 47 p.

Awal, M.A., W. Ishak, J. Endan y M. Haniff. 2004. Regression model for computing leaf area and assessment of total leaf area variation with frond ages in oil palm. *Asian Journal of Plant Sciences* 3: 642-646.

Ayaz, S., D.J. Moot, B.A. McKenzie, G.D. Hill y D.L. McNeil. 2004. The Use of a principal axis model to examine individual plant harvest index in four grain legumes. *Annals of Botany*, disponible en la web en: www.aob.oupjournals.org, consultado en septiembre/06.

Báez-González, A.D., J.R. Kiniry, S.J. Maas, M. Tiscareno, J. Macías, J.L. Mendoza, C.W. Richardson, J. Salinas y J.R. Manjarrez. 2005. Large-area maize yield forecasting using leaf area index based yield model. *Agronomy Journal* 97:418–425.

Báez-González, A.D., P. Chen, M. Tiscareño-López, y R. Srinivasan. 2002. Using satellite and field data with crop growth modeling to monitor and estimate corn yield in Mexico. *Crop Science* 42:1943–1949.

Baigorri, H., M.C. Antolín y M. Sánchez-Díaz. 1999. Reproductive response of two morphologically different pea cultivars to drought. *European Journal of Agronomy* 10: 119–128

Balci, P. y J.H. Kennedy. 2003. Measures of plant surface-areas for eurasian watermilfoil and water stargrass. *Journal of Aquatic Plant Management* 41: 119-122.

Bange, M.P., G.L. Hammer, S.P. Milroy y K.G. Rickert. 2000. Improving estimates of individual leaf area of sunflower. *Agronomy* 92:761–765.

Baquero, I. 2006. Avances en cuentas del suelo en Colombia. VII Seminario Internacional de Control Fiscal Ambiental, Villa de Leyva, 8-10 de mayo. En: www.contraloriagen.gov.co/html/comtema/pdf/suelo.pdf. Consultado en septiembre/2006.

Bernacchi, C.J., E.L. Singsaas, C. Pimentel, A.R. Portis JR y S.P. Long. 2001. Improved temperature response functions for models of Rubisco-limited photosynthesis. *Plant, Cell and Environment* 24:253-259.

Berntsen, J., H. Hauggard-Nielsen, J.E. Olsen, B.M. Petersen, E.S. Jensen y A. Thomsen, 2004. Modelling dry matter production and resource use in intercrops of pea and barley. *Field Crops Research* 88: 69–83.

Bokhove, O., J. Dubbeldam, P. Getto, B. 't Hof van, N. Ovenden, D. Pik, G. Prokert, V. Rottschäfer y D. Sar van der. 2002. Roses are unselfish: a greenhouse growth model to predict harvest. En: Hek, G.M. (ed.). *Proceedings of the forty-second European Study Group with Industry*. pp.59-76.

Bolaños, L., A. El-Hamdaoui, e I. Bonilla. 2003. Recovery of development and functionality of nodules and plant growth in salt-stressed *Pisum sativum* – *Rhizobium leguminosarum* symbiosis by boron and calcium. *Journal of Plant Physiology* 160:1493–1497.

Boote, K.J. 1995a. Simulating Basic Growth Processes. Carbon Balance. Training Program on Computer Simulation for Crop Growth and Nutrient Management, May 8-19. International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, Alabama, USA.

Boote, K.J. 1995b. Simulating Basic Growth Proceses. Crop Development Balance. Training Program on Computer Simulation for Crop Growth and Nutrient Management, May 8-19. International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, Alabama, USA.

Boote, K.J., M.I. Mínguez y F. Sau. 2002. Adapting the CROPGRO legume model to simulate growth of faba bean. *Agronomy Journal* 94:743–756.

Boote, K.J., N.B. Pickering, J.W. Jones y C.H. Porter. 2001. Canopy photosynthesis module in DSSAT v.4.0, documentation and source code listing. University of Florida, Gainesville, Florida. Agricultural and Biological Engineering Department. Research Report No 2001-104.

Bowen, W.T., J.W. Jones y P.K. Thornton. 1993. Crop simulation as a potential tool for evaluating sustainable land management. En: Kimble, J.M. (ed.). Proceedings of the Eighth International Soil Management Workshop: Utilization of soil survey information for sustainable land use. Soil Conservation Service, USDA. pp.15-21.

Brisson, N. C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche, D. Zimmer, J. Sierra, P. Bertuzzi, P. Burger, F. Bussière, Y.M. Cabidoche, P. Cellier, P. Debaeke, J.P. Gaudillère, C. Hénault, F. Maraux, B. Seguin y H. Sinoquet. 2003. An overview of the crop model STICS. European Journal of Agronomy 18: 309-332.

Brown, H.E. y D.J. Moot. 2004. Main-stem node appearance of lucerne regrowth in a temperate climate. En: Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia, 26/sept a 1/oct.

Butler, T.J., G.W. Evers, M.A. Hussey y L.J. Ringer. 2002. Rate of Leaf Appearance in Crimson Clover. Crop Science 42:237-241.

Cao, W. y D.N. Moss. 1989. Temperature effect on leaf emergency and phyllochron in wheat and barley. Crop Science 29:1018-1021.

Carr, P.M., E.D. Eriksmoen, G.B. Martin y N.R. Olson. 1996. Grain yield of oat-pea intercrop. p. 240-243. En: J. Janick (ed.), Progress in new crops. ASHS Press, Alexandria, VA.

Castillo B.E. y N. González. 2006. Ordenamiento territorial, una herramienta para el desarrollo rural sostenible; experiencias y aprendizajes. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Informe Técnico No.1. 52 p.

Castro R., M. 1995. Evaluación de arveja voluble (*Pisum sativum* L.) en diferentes densidades y sistemas de siembra en la región de Simijaca (Cundinamarca). Tesis de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 86 p.

Chartres, C., T. Veldkamp y R. Matthews. 2003. Center-Commissioned External Review of spatial analysis at the International Center for Tropical Agriculture (CIAT). Informe final. En: gisweb.ciat.cgiar.org/Sig/download/CCER_Final_Report2003_CIAT.pdf, consultado en septiembre de 2006.

Chuai-Aree, S.W. Jäger, H.G. Bock y S. Siripani. 2002. Smooth animation for plant growth using time embedded component and growth function. Computational Mathematics and Modeling. Mahidol University, Curtin University of Technology. 8 p.

Clemente, R.S., M.E. Asadi y N.D. Prakash. 2005. Assessment and comparison of three crop growth models under tropical climate conditions. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 3: 254-261.

Cordovilla, M., F. Ligeró y C. Lluch, 1999. Effects of NaCl on growth and nitrogen fixation and assimilation of inoculated and KNO₃ fertilized *Vicia faba* L. and *Pisum sativum* L. plants. *Plant Science* 140:127–136.

De Jesús jr., W.C., F.X.R. do Vale, R.R. Coelho y L.C. Costa. 2001. Comparison of two methods for estimating leaf area index on common bean. *Agronomy Journal* 93:989–991.

De Kroon, H., H. Huber, J.F. Stuefer y J.M. van Groenendael. 2005. Research review. A modular concept of phenotypic plasticity in plants. *New Phytologist* 166: 73–82

De Sousa, E.F., M. Campanati, R. Prucoli, E. Detmann, S. Bernardo, P. Amorim y P.A. dos Santos. 2005. Estimating the total leaf area of the green dwarf coconut tree (*Cocos nucifera* L.). *Scientific Agriculture (Piracicaba, Brazil)* 62: 597-600.

Delahaut, K.A. y A.C. Newenhouse. 1997. Growing beans and peas in Wisconsin. A guide for fresh-market growers. University of Wisconsin-System Board of Regents and University of Wisconsin-Extension. Cooperative Extension. Madison. 19 p.

Demirsoy, H., L. Demirsoy, S. Uzun y B. Ersoy. 2004. Non-destructive leaf area estimation in peach. *European Journal of Horticultura Science* 69:144-146.

Díaz-Ambrona, C.H., A.M. Tarquis y M.I. Mínguez. 1998. Faba bean canopy modelling with a parametric open L-system: a comparison with the Monsi and Saeki model. *Field Crops Research* 58: 1-13.

Dingkuhn, M. y D. Luquet. 2005. Phenotypic plasticity of crops and adaptation to stress environments. En : *The global food&product chain- Dynamics, innovations, conflicts, strategies*. Deutscher Tropentag, Hohenheim. October 11-13.

DSSAT V.3. 1994. A decision support system for agrotechnology transfer. *Manuales de Programación*. University Hawaii. 99 p.

Duke, J.A. 1981. Hand book of legumes of world economic importance. Plenum Press, New York. 199-265 p.

Elings, A. 2000. Estimation of Leaf Area in Tropical Maize. *Agronomy Journal* 92:436–444.

Emery, R.J., N.G. Munier-Jolain, A.S Voisin y C. Salon. 2002. Na⁺ content of xylem sap is closely related to root biomass in pea (*Pisum sativum*): A potential tool for studying root growth under controlled conditions and in the field. *Canadian Journal of Plant Science*. 82: 567–577.

Enquist, B.J. 2002. Universal scaling in tree and vascular plant allometry: toward a general quantitative theory linking plant form and function from cells to ecosystems. *Tree Physiology* 22: 1045–1064.

Espinosa, N. y G. Ligarreto, 2005. Evaluación de la habilidad combinatoria y heterosis de siete progenitores de arveja *Pisum sativum* L. *Agronomía Colombiana* 23:197-206.

Estupiñan, J.A., A. Fandiño. 1986. Determinación de la época crítica de competencia de malezas en arveja (*Pisum sativum* L.). Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Bogotá. 83 p.

Ewert, F., 2004. Modelling plant responses to elevated CO₂: how important is leaf area index?. *Annals of Botany* 93: 619-627.

FAO, 2006. Ordenamiento territorial y competitividad rural. Proyecto Regional Ordenamiento Territorial Rural Sostenible. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. III Taller Regional de FAO, Montevideo, Uruguay, 31 de marzo.

FAO/LATINFOODS. 2002. Tabla de composición de alimentos de América Latina. En: <http://www.rlc.fao.org/bases/alimento>. Consultado en agosto de 2006.

FAOSTAT. 2006. FAO Statistic Division. En: <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567>, consultado en septiembre de 2006

Farquhar G.D., S. von Caemmerer y J.A. Berry. 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 149, 78-90

Farquhar G.D., S. von Caemmerer y J.A. Berry. 2001. Models of photosynthesis. *Plant Physiology* 125, 42-45

FEDECAFÉ. 1986. El cultivo de la arveja. Proyecto Hortalizas, Frutales y Flores. Ed. Litocenco Ltda., Cali. 18 p.

FENALCE. 2006. Resumen de sensibilidades al TLC. Características generales por producto. En: <http://www.fenalce.org/datos/TLC/ImpactoSector/RiesgoFrenteTLC.doc>. Consultado en Septiembre/2006.

Flinn, A.M. y J.S. Pate. 1970. A quantitative study of carbon transfer from pod and subtending leaf to the ripening seeds of the field pea (*Pisum arvense* L.). *Journal of Experimental Botany* 21:71-82.

Fleisher, D.H., R.M. Shillito, D.J. Timlin, S.H. Kim y V.R. Reddy. 2006. Approaches to Modeling Potato Leaf Appearance Rate. *Agronomy Journal* 98:522-528

Fleisher, D.H. y D.J. Timlin. 2006. Modeling expansion of individual leaves in the potato canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* (en impresión)

Forbush, J. y A. Richardson. 1998. Sassafras allometry at Totoket Mountain, North Branford, CT. Yale University School of Forestry & Environmental Studies. En: <http://www.yale.edu/fes519b/totoket/allom/allom.htm>. Consultado 11 septiembre de 2006

Forero R., S.C. 2005. Desarrollo territorial, ambiente y ruralidad en Colombia: situación actual y avance de la política para regiones. En: II Taller Regional de FAO Ordenamiento territorial y desarrollo rural. Informe País Colombia. Santiago de Chile, octubre.

Forero, R.A., O.A. Torres. 1986. Control químico de malezas en el cultivo de la arveja (*Pisum sativum* L.) en diferentes épocas en el municipio de Motavita-Boyacá. Tesis de grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Tunja. 108 p.

Foroutan-pour, K. P. Dutilleul y D.L. Smith. 2001. Inclusion of the fractal dimension of leafless plant structure in the Beer-Lambert law. *Agronomy Journal* 93: 333-338.

Franko, U. y W. Mirschel. 2001. Integration of a crop growth model with a model of soil dynamics. *Agronomy Journal* 93:666–670.

Friend, A.L., M.D. Coleman y J.G. Isebrands. 1994. Carbon allocation to root and shoot systems of woody plants. En: Davis. T.D. y B.E. Haissig (ed.). *Biology of Adventitious Root Formation*. Plenum Press. New York.

Flynn, R., S.T. Ball y R.R. Baker. 1999. Sampling for plant tissue analysis. New Mexico State University. College of Agriculture and Home Economics. Cooperative Extension Service.

Gamper, H. 2005. Nondestructive estimates of leaf area in white clover using predictive formulae: the contribution of genotype identity to trifoliolate leaf area. *Crop Science* 45:2552

Gerik, T.J., W.D. Rosenthal, R.L. Vanderlip y L.J. Wade. 2004. Simulating seed number in grain sorghum from increases in plant dry weight. *Agronomy Journal* 96:1222–1230.

Gijsman, A.J., G. Hoogenboom, W.J. Parton y P.C. Kerridge. 2002. Modifying DSSAT crop models for low-input agricultural systems using a soil organic matter–residue module from CENTURY. *Agronomy Journal* 94:462–474.

Gladish, D.K y T. Niki. 2000. Factors inducing cavity formation in the vascular cylinders of pea roots (*Pisum sativum* L., cultivar Alaska). *Environmental and Experimental Botany* 43: 1–9

González, E.M., L. Gálvez, M. Royuela, P.M. Aparicio-Tejo y C. Arrese-Igor. 2001. Insights into the regulation of nitrogen fixation in pea nodules: lessons from drought, abscisic acid and increased photoassimilate availability. *Agronomie* 21:607–613.

Goodstein, D. 2000. How science works. Reference manual in scientific evidence. California Institute of Technology, Pasadena, California, USA. 16 p. En: www.its.caltech.edu/~dg/HowScien.pdf. Consultado en septiembre/2006.

Goudriaan J.Y., H.H. Van Laar. 1995. Modelling Potential Growth Processes. Textbook with exercises. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. 238 p.

Greer J.E., S. Falk, K.J. Greer y M.J. Bentham. 1993. Explaining and justifying recommendations in an agriculture decision support system. Computers and Electronics for Agriculture 11: 195-214.

Griffin, T.S., B.S. Johnson y J.T. Ritchie. 1993. A simulation model for potato growth and development: Substor-Potato Version 2.0. IBSNAT Research Report Series 02. Department of Agronomy and Soil Science, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii, Honolulu, HI, USA.

Gutierrez A.P., J.R. Hakim, E. Mariot y A. Villacorta. 1993. A model for the growth and development of three varieties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.): Factors affecting yield and quality. Agricultural Systems 44: 35-63.

Hammer, G.L., M.J. Kropff, T.R. Sinclair y J.R. Porter. 2002. Future contributions of crop modelling*/from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement. European Journal of Agronomy 18:15-31.

Harvey, D.M. 1973. The translocation of ^{14}C photosynthate in *Pisum sativum* L. Annals of Botany 37: 787-794.

Hartkamp, A.D., G. Hoogenboom y J.W. White. 2002. Adaptation of the CROPGRO growth model to velvet bean (*Mucuna pruriens*) I. Model development. Field Crops Research 78: 9-25.

Hatam, M. y Amanullah. 2001. Grain yield potential of garden peas (*Pisum sativum* L.) Germplasm. On Line Journal of Biological Sciences 1 (4): 242-244.

Hauggaard-Nielsen, H., M.K. Andersen, B. Jørnsgaard, E.S. Jensen. 2006. Density and relative frequency effects on competitive interactions and resource use in pea-barley intercrops. Field Crops Research 95: 256-267.

Heagle, A.S., J.E. Miller, K.O. Burkey, G. Eason y W.A. Pursley. 2002. Growth and yield responses of snap bean to mixtures of carbon dioxide and ozone. Journal of Environmental Quality 31:2008-2014.

Herbert, T.J. 2004. A Simple Model of Canopy Photosynthesis. University of Miami. College of Arts and Sciences. Department of Biology. En: http://www.bio.miami.edu/tom/bil160/bil160goods/platform/13b_platform.html. Consultado en septiembre/2006

Hesketh, J.D., D.L. Myhre y C.R. Willey. 1973. Temperature control of time intervals between vegetative and reproductive events in soybeans. *Crop Science* 13:250-254.

Heuvelink, E. 1996. Dry Matter partitioning in tomato: validation of a dynamic simulation model. *Annals of Botany* 77: 71-80.

Hoogenboom, G. y J.W. White. 2003. Improving physiological assumptions of simulation models by using gene-based approaches. *Agronomy Journal* 95:82–89.

Hoogenboom, G., J.W. White y C.D. Messina. 2004. From genome to crop: integration through simulation modeling. *Field Crops Research* 90:145–163.

Hoskinson R.L., J.R. Hess y R.K. Fink. 1999. A Decision Support System for Optimum Use of Fertilizers. 2nd European Conference on Precision Agriculture, July 11-15. INEEL (Idaho National Engineering&Environmental Laboratory).

Igathinathane, C., V.S. Prakash, U. Padma, G. Ravi y A.R. Womac. 2006. Interactive computer software development for leaf area measurement. *Computers and Electronics in Agriculture* 51: 1–16.

Ishag, K.H. y M.D. Dennett. 1998. Use of the exponential growth model to analyse the growth of faba bean, peas and lentils at three densities: fitting the model. *Annals of Botany* 82: 497-505.

Ismail, A.M., A.E. Hall. 2002. Semidwarf and standard-height cowpea responses to row spacing in different environments. *Crop Science* 40:1618–1623.

Jeuffroy, M. y F. Devienne. 1995. A simulation model for assimilate partitioning between pods in pea (*Pisum sativum* L.) during the period of seed set; validation in field conditions. *Field Crops Research* 41: 79-89.

Jonckheere, I., S. Fleck, K. Nackaerts, B. Muys, P. Coppin, M. Weiss, F. Baret. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 19–35.

Jones, J.W. y K.J. Boote. 1987. Concepts of crop systems. En: *Simulation models for soybeans and other crops*. ASPAC, Food&Fertilizer Technology Center, China. Technical Bulletin no. 106: 1-7.

Jones, J.W., K.J. Boote, S.S. Jagtap y J.W. Mishoe. 1991. Soybean development. En: *Modeling plant and soil systems*. Agronomy Monograph no. 31. ASA-CSSA-SSSA, USA. Capítulo 5.

Johnston, A. 2002. Field pea responses to phosphorus fertilization. News and views. Boletín regional del Potash & Phosphate Institute (PPI) y el Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC).

- Juskiw, P.E. Y.W. Jame y L. Kryzanowski. 2001. Phenological development of spring barley in a short-season growing area. *Agronomy Journal*. 93:370–379.
- Kadaja, J., H. Tooming. 2004. Potato production model based on principle of maximum plant productivity. *Agricultural and Forest Meteorology* 127:17–33.
- Kiniry, J.R. 1991. Maize phasic development. En: *Modeling plant an soil systems*. Agronomy Monograph no. 31. ASSA-CSSA-SSSA, USA. Capitulo 4.
- Kiniry J.R. y C.A. Jones, (ed.) 1986. CERES-Maize, A simulation model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press, 194 p.
- Koch, K.E. y L.E. Schrade. 1984. 14C-Photosynthate partitioning and translocation in soybeans during reproductive development. *Plant Physiology* 75: 1040-1043.
- Krall, J.M., S.D. Miller, J.T. Cecil, C. Bstian, T. Foulke, D.D. Baltensperger, B.M. Harveson, P.A. Burgener, G.W. Hergert, G.L. Hein, D.J. Lyon, T. Nleya, J. Rickertsen y S. Blodgett. 2006. Pea production in the High Plains. South Dakota State University Extension, Fact Sheet FS932.
- Kovács, G.J. 2005. Modelling of adaptation processes of crops to water and nitrogen stress. *Physics and Chemistry of the Earth* 30: 209–216.
- Kumudini, S., D.J. Hume y G. Chu. 2001. Genetic improvement in short season soybeans: I. Dry matter accumulation, partitioning, and leaf area duration. *Crop Science* 41:391–398.
- Lawless, C., M.A. Semenov, P.D. Jamieson. 2003. A wheat canopy model linking leaf area and phenology. *European Journal of Agronomy* 22: 19–32.
- Lentz, W. 1998. Model applications in horticulture: a review. *Scientific Horticulture* 74: 151-174.
- Li, C. y F. Bangerth, 2002, Stimulatory effect of cytokinins and interaction with IAA on the release of lateral buds of pea plants from apical dominance. *Journal of Plant Physiology* 160: 1059.
- Jones C.A. y Kiniry J.R. (eds.). 1986. CERES-Maize, a simulation model of maize growth and development. Texas A&M University Press. College Station. 194 p.
- Kurt, O., H. Uysal y S. Uzun. 2005. Non-destructive leaf area estimation of flax (*Linum usitatissimum* L.). *Pakistan Journal of Botany* 37: 837-841.
- Lamb, J.F., C.C. Sheaffer y D.A. Samac. 2003. Population density and harvest maturity effects on leaf and stem yield in alfalfa. *Agronomy Journal* 95:635–641.

- Lizaso, J.I., W.D. Batchelor, K.J. Boote, M.E. Westgate, P. Rochette y A. Moreno-Sotomayor. 2005. Evaluating a leaf-level canopy assimilation model linked to CERES-Maize. *Agronomy Journal* 97: 722-733.
- Lecoeur, J. y B. Ney. 2003. Change with time in potential radiation-use efficiency in field Pea. *European Journal of Agronomy* 19: 91-105.
- Lecoeur, J. y T.R. Sinclair. 2001. Harvest index increase during seed growth of field pea. *European Journal of Agronomy* 14: 173–180.
- Lee, J.H., J. Goudriaan y H. Challa. 2003. Using the expolinear growth equation for modeling crop growth in year-round cut chrysanthemum. *Annals of Botany* 92: 697-708.
- Lhuillier-Soundélé, A., N.G. Munier-Jolain y B. Ney. 1999. Influence of nitrogen availability on seed nitrogen accumulation in pea. *Crop Science* 39:1741–1748.
- Ligarreto, G. 1994. Presentación de nuevas variedades de frijol L-34103 y arveja L-3661 MA. Centro de Investigaciones Tibaitatá, Mosquera, Colombia.
- Lindemann, W.C. y C.R. Glover. 2003. Nitrogen fixation by legumes. New Mexico State University, College of Agriculture and Home Economics, Cooperative Extension Service.
- Lira jr., M.de A., A.S. Lima y J.R. Arruda, D.L. Smith. 2005. Effect of root temperature on nodule development of bean, lentil and pea. *Soil Biology & Biochemistry* 37: 235–239.
- Lisson, S.N., N.G. Inman-Bamber, M.J. Robertson y B.A. Keating. 2005. The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems. *Field Crops Research* 92: 321–335.
- Lizaso, J.I., W.D. Batchelor y M.E. Westgate. 2003. A leaf area model to simulate cultivar-specific expansion and senescence of maize leaves. *Field Crops Research* 80:1-17.
- Londoño, J., M.L. Naranjo. 1996. Aplicación de aminoácidos como complemento a la fertilización química y orgánica en el cultivo de arveja (*Pisum sativum* L.) var. Piquinegra. Trabajo de grado. Universidad de Caldas, Facultad de Agronomía, Manizales, 62 p.
- Loomis, R.S. y W.A. Williams. 1963. Maximum crop productivity: an estimate. *Crop Science* 3: 67-72.
- López, A.V. 1986. Época crítica de competencia de malezas con el cultivo de arveja *Pisum sativum* L. Tesis de grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Tunja. 79 p.
- Lu, H.Y., C.T. Lu, M.L. Wei y L.F. Chan. 2004. Comparison of different models for nondestructive leaf area estimation in Taro. *Agronomy Journal* 96: 448.

Lyons, S.W. 2004. The scientific method. Education Resource Group. En: <http://www.lessonplans.com/scientificmethod.pdf>. Consultado en septiembre/2006.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, MADR. 2006. Acuerdo de competitividad de la cadena de hortalizas. Observatorio Agrocadenas Colombia. 53 p. En: http://www.agrocadenas.gov.co/hortalizas/documentos/Acuerdo_competitividad_hortalizas.pdf. Consultado en septiembre/2006.

Marcelis, L.F., E. Heuvelink y J. Goudriaan, 1998. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae* 74:83-111.

Marcelis, L.F. 1996. Sink Strength as a Determinant of Dry Matter Partitioning in the Whole Plant. *Journal of Experimental Botany* 47:1281-1291.

Marx, G. 2001. On the pea plant. Compendium of pea diseases and pests. American Phytopathological Society. 2nd edition. Minnesota, USA.

Massawe, F.J., S.N. Azam-Ali y J.A. Roberts. 2003. The Impact of Temperature on Leaf Appearance in Bambara Groundnut Landraces. *Crop Science* 43:1375–1379

Mathews, R.B. y L.A. Hunt. 1994. GUMCAS: a model describing the growth of cassava (*Manihot esculanta* L. Crantz). *Field Crop Research* 36: 69-84.

Mathieu, A., P.H. Cournède y P. DeReffye. 2004. The influence of photosynthesis on the number of metamers per growth unit in GreenLab model. En: Godin, C., J. Hanan, W. Kruth, A. Lacoite, A. Takenaka, P. Prusinkiewicz, T. DeJong, C. Beveridge y B. Andrieu. (eds.). 4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models, Montpellier, France, 7-11 junio. pp.248-252.

Mavromatis, T., K.J. Boote, J.W. Jones, A. Irmak, D. Shinde y G. Hoogenboom. 2001. Developing genetic coefficients for crop simulation models with data from crop performance trials. *Crop Science* 41:40–51

McCauley, A., C. Jones y J. Jacobsen. 2003. Plant nutrient functions and deficiency and toxicity symptoms. Nutrient Management Module No. 9. Montana State University Extension Service. 16 p.

Meier, U. 2001. Estadios de las plantas mono-y dicotiledóneas. Centro Federal de Investigaciones Biológicas para Agricultura y Silvicultura, Alemania. 2^a. Edición. 149 p.

Miller, P., W. Lanier y S. Brandt. 2001. Using Growing Degree Days to Predict Plant Stages. Montana State University, USA. Extension Service.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y Corporación Colombia Internacional. 2002. Manual del exportador de frutas, hortalizas y tubérculos en Colombia. Bogotá.

Monsalve, O. 1983. Efecto de dos poblaciones y dos distancias de siembra de arveja (*Pisum*

sativum L.) asociada sobre el crecimiento de dos variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.). Tesis de grado, Programa de Estudios para Graduados Universidad Nacional - Instituto Colombiano Agropecuario, Bogotá. 114 p.

Monsi, M. y T. Saeki. 1953. Uber den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und sein bedeutung fur die stoffproduktion. Japan Journal of Botany 14:22-52

Monteith, J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. Philo. Trans. R. Soc. London, Ser. B 281. pp.277–294.

Morales, A. (ed). 1992. Fertilización en diversos cultivos, quinta aproximación. Manual de Asistencia Técnica No. 25. Instituto Colombiano Agropecuario ICA, Subgerencia de Investigación, Sección Recursos Naturales, Tibaitatá. 64 p.

Muehlbauer, F.J. 1993. Food and grain legumes. En: Janick, J. y J.E. Simon (eds.). New crops. Ed. Wiley, New York. pp.256-265.

Muehlbauer F.J. y A. Tullu. 1997. *Pisum sativum* L. NewCROP FactSHEET. Purdue University, Center for New Crops & Plant Products. En: <http://www.hort.purdue.edu/newcrop/cropfactsheets/pea.html>. Consultado en sept/2006.

Müller, I., B. Schmid y J. Weiner. 2000. The effect of nutrient availability on biomass allocation patterns in 27 species of herbaceous plants. Perspective in Plant Ecology, Evolution and Systematics 3: 115-127.

Munier-Jolain, N. y C. Salon. 2003. Can sucrose content in the phloem sap reaching field pea seed (*Pisum sativum* L.) be an accurate indicator of seed growth potential?. Journal of Experimental Botany 54: 2457-2465.

Muñoz I., J. 1987. Evaluación agronómica de doce variedades de arveja, *Pisum sativum* L. Tesis de grado, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia.

Muth, C.C. y F.A. Bazzaz. 2002. Tree seedling canopy responses to conflicting photosensory cues. Oecologia 132:197–204.

Naab, J.B., P. Singh, K.J. Boote, J.W. Jones y K.O. Marfo. 2004. Using the CROPGRO-peanut model to quantify yield gaps of peanut in the Guinean savanna zone of Ghana. Agronomy Journal 96:1231–1242.

Niklas, K.J. y E.D. Cobb. 2005. N, P, and C stoichiometry of *Eranthis hyemalis* (Ranunculaceae) and the allometry of plant growth. American Journal of Botany 92: 1256–1263.

Noode'n, L.D. y J.J. Guiame't. (1997). Senescence mechanisms. Physiologia Plantarum 101: 746–753.

Noreña, C.S. y H.A. Ortega. 1985. Efecto comparativo de genotipos en el rendimiento del sistema papa (*Solanum tuberosum*) intercalado con arveja (*Pisum sativum*). Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Bogotá. 95 p.

O'Connell, M.G., G.J. O'Leary, D.M. Whitfield y D.J. Connor. 2004. Interception of photosynthetically active radiation and radiation-use efficiency of wheat, field pea and mustard in a semi-arid environment. *Field Crops Research* 85: 111–124.

Oxley, T., B.S. McIntosh, N. Winder, M. Mulligan y G. Engelen. 2004. Integrated modelling and decision-support tools: a Mediterranean example. *Environmental Modelling & Software* 19: 999–1010.

Pacheco, C.A. y M.C. Vergara. 2005. Clasificación de 127 materiales de arveja (*Pisum sativum* L.) de acuerdo con el comportamiento agronómico y caracteres morfológicos. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Escuela de Posgrados.

Payne, W.A., P.E. Rasmussen, C. Chen, R. Goller y R.E. Ramig. 2000. Precipitation, temperature and tillage effects upon productivity of a winter wheat–dry pea rotation. *Agronomy Journal* 92:933–937

Payne W.A., P.E. Rasmussen, C. Chen y R.E. Ramig, 2001. Assessing Simple Wheat and Pea Models Using Data from a Long-Term Tillage Experiment. *Agronomy Journal*. 93:250–260.

Peksen, E., H. Bozoglu, A. Peksen y A. Gülümser. 2002. Determination of the different row spacings on yield an some other properties of pea (*Pisum sativum* L.) cultivars sown in sprint and autumn. *Acta Horticulture* 579:313-318.

Pekşen, E., A. Pekşen, H. Bozoğlu, A. Gülümser. 2004. Comparison of fresh pod yield and pod related characteristics in pea (*Pisum sativum* L.) cultivars sown in autumn and spring under samsun ecological conditions. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*: 363-370.

Petróczi, I.M. y J. Matuz. 2002. Seasonal study of tillering and phyllochron of winter wheat in field trials. *Acta Biologica Szegediensis* 46: 209-210.

Pic, E., B. Teyssendier, F. Tardieu y O. Turc. 2002. Leaf senescence induced by mild water deficit follows the same sequence of macroscopic, biochemical, and molecular events as monocarpic senescence in pea. *Plant Physiology* 128: 236–246.

Pinstrup-Andersen, P. 2002. Towards a sustainable global food system: what will it take?. En: Annual John Pesek Colloquium in Sustainable Agriculture, Iowa State University. Marzo 26-27.

Poggio, S.L., E.H. Satorre, S. Dethiou y G.M. Gonzalo. 2005. Pod and seed numbers as a function of photothermal quotient during the seed set period of field pea (*Pisum sativum*) crops. *European Journal of Agronomy* 22: 55–69.

Poluektov, R.A. y A.G. Topaj. 2001. Crop modeling: nostalgia about present or reminiscence about future. *Agronomy Journal* 93: 653–659.

Poorter, H., 1989. Plant growth analysis: towards a synthesis of the classical and the functional approach. *Physiologia Plantarum* 75:237-244.

Poorter H. y E. Garnier. 1996. Plant growth analysis: an evaluation of experimental design and computational methods. *Journal of Experimental Botany* 47:1343-1351.

Poorter, H. y O. Nagel. 2000. The role of biomass allocation in the growth response of plants to different levels of light, CO₂, nutrients and water: a quantitative review. *Australian Journal of Plant Physiology* 27: 595–607.

Purcell, L.C. 2000. Soybean canopy coverage and light interception measurements using digital imagery. *Crop Science* 40: 834-837.

Radford, P.J. 1967. Growth Analysis Formulae – their use and abuse. *Crop Science* 7: 171-175.

Reffye, P. de y P.H. Cournède, 2005. A Powerful Factorization Method to Compute Plant Growth and Architecture. Applications in Agronomy and Computer Graphics. Blaise Pascal University, France.

Rickman, R.W. y B.L. Klepper. 1995. The phyllochron: Where do we go in the future?. *Crop Science* 35:44-49

Ridao, E., C.F.Oliveira, J.R. Conde y M.I. Mínguez. 1996. Radiation interception and use, and spectral reflectance of contrasting canopies of autumn sown faba beans and semi-leafless peas. *Agricultural and Forest Meteorology* 79:183-203.

Ridge, P.E. y P.G. Cox. 1996. Models and decision support: bridging the model gap. *Memorias de la 8ª Conferencia Australiana de Agronomía, Toowoomba, Australia*. En <http://www.regional.org.au/au/asa/1996>. Consultado en septiembre de 2006.

Ritchie, J.T. 1991. Wheat phasic development. En: ASA-CSSA-SSSA. Modeling plant and soil systems. Agronomy monograph no. 31.

Ritchie, J.T. 1991. Genetic specific data for crop modeling. En: de Vries, F.P., P. Teng y K. Metselaar (eds.). Systems approaches for agricultural development. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. 77-93 p.

Rivington, M, K.B. Matthews y K. Buchan. 2002. A comparison of methods for providing solar radiation data to crop models and decision support systems. The International Environmental Modelling and Software Society. Lugano, Switzerland. 6 p.

- Rizalli, R.H., F.J. Villalobos y F. Orgaz. 2002. Radiation interception, radiation-use efficiency and dry matter partitioning in garlic (*Allium sativum* L.). *European Journal of Agronomy* (18): 33-43.
- Roche, R. y M.H. Jeuffroy. 2000. A Model to Calculate the Vertical Distribution of Grain Number in Pea. *Agronomy Journal* 92:663–671.
- Roche, R., M.H. Jeuffroy y B. Ney. 1999. Comparison of different models predicting the date of beginning of flowering in pea (*Pisum sativum* L.). *Ecological Modelling* 118:213–226.
- Röhrig M., H. Stützel y C. Alt. 1999. A Three-Dimensional Approach to Modeling Light Interception in Heterogeneous Canopies. *Agronomy Journal* 91: 1024-1032.
- Rosati, A. y T.M. Dejong. 2003. Estimating photosynthetic radiation use efficiency using incident light and photosynthesis of individual leaves. *Annals of Botany* 91: 869-877.
- Rossini, A.C., T.de J. Deléo, J.C. Barbosa y I.C. Leite. 2004. Leaf area prediction models for *Zinnia elegans* JACQ., *Zinnia haageana* REGEL and ‘Profusion cherry’. *Scientific Agriculture* (Piracicaba, Brazil) 61: 47-52.
- Rossiter, D.G. y S.J. Riha. 1999. Modeling Plant Competition with the GAPS Object-Oriented Dynamic Simulation Model. *Agronomy Journal* 91:773–783.
- Ruíz, J.G., N.E. Vanegas. 1997. Efecto del riego por goteo en la producción del cultivo de arveja (*Pisum sativum* L. var. Santa Isabel). Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Bogotá. 135 p.
- Sadras, V.O., J.P. Monzón. 2006. Modelled wheat phenology captures rising temperature trends: Shortened time to flowering and maturity in Australia and Argentina. *Field Crops Research* 99: 136–146.
- Salazar, M.R. 2006. Un modelo simple de producción potencial de uchuva (*Physalis peruviana* L.). Trabajo de grado, Facultad de Agronomía, Escuela de Posgrados, Universidad Nacional de Colombia. 108 p.
- Sánchez, F.J., E.F. de Andrés, J.L. Tenorio y L. Ayerbe. 2004. Growth of epicotyls, turgor maintenance and osmotic adjustment in pea plants (*Pisum sativum* L.) subjected to water stress. *Field Crops Research* 86: 81–90.
- Schwinning, S. 1996. Decomposition analysis of competitive symmetry and size structure dynamics. *Annals of Botany* 77:47-57
- Serdar, Ü. y H. Demirsoy. 2006. Non-destructive leaf area estimation in chestnut. *Scientia Horticulturae* 108: 227–230.

Sharpley, A.N. y J.R. William (eds.) 1990. EPIC – Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. U.S. Department of Agriculture. Technical Bulletin No. 1768. 235 pp.

Shiflet, A. 2006. The modelling process. Computational Science Scientific Programming. En: <http://wofford-ecs.org/ScientificProgramming/>. Consultado en septiembre/2006.

Shipley B. y D. Meziane. 2002. The balanced-growth hypothesis and the allometry of leaf and root biomass allocation. *Functional Ecology* 16:326-331.

Siddique A. B., D. Wright y S. M. Mahbub A. 2002. Effects of sowing dates on the phenology, Seed Yield and Yield Components of Peas. *OnLine Journal of Biological Sciences* 2: 300-303.

Siddique, K.H., K.L. Regan, D. Tennant y B.D. Thomson. 2001. Water use and water use efficiency of cool season grain legumes in low rainfall Mediterranean-type environments. *European Journal of Agronomy* 15: 267–280.

Sinoquet, H., S. Thanisawanyangkura, H. Mabrouk y P. Kasemsap. 1998. Characterization of the light environment in canopies using 3D digitising and image processing. *Annals of Botany* 82: 203-212.

Sirotenko, O.D. 2001. Crop modelling: advances and problems. *Agronomy Journal* 93:650-653.

Slinkard, A.E., R.S. Bhatta, B.N. Drew y R.A. Morrall. 1990. Dry pea and lentil as new crops in Saskatchewan: A case study. p. 159-163. En: Janick, J. y J.E. Simon (eds.), *Advances in new crops*. Timber Press, Portland, OR.

Soltani, A., M.J. Robertson, B. Torabi, M. Yousefi-Daz, R. Sarparast. 2006. Modelling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth. *Agricultural and Forest Meteorology* 138 : 156–167.

Song, C. y L.E. Band. 2004. MVP: a model to simulate the spatial patterns of photosynthetically active radiation under discrete forest canopies. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 1192-1203.

Soon, Y.K., K.N. Harker, y G.W. Clayton. 2004. Plant competition effects on the nitrogen economy of field pea and the subsequent crop. *Soil Science Society of America Journal* 68:552–557.

Steppuhn, H., K.M. Volkmar, y P.R. Miller. 2001. Comparing canola, field pea, dry bean, and durum wheat crops grown in saline media. *Crop Science* 41:1827–1833.

Stewart, D.W., C. Costa, L.M. Dwyer, D.L. Smith, R.I. Hamilton, y B.L. Ma. 2003. Canopy structure, light interception, and photosynthesis in maize. *Agronomy Journal* 95:1465–1474.

Stöckle, C.O., M. Donatelli y R.L. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18: 289-307.

Suárez, M.R. 2006. Un modelo simple de producción potencial de uchuva (*Physalis peruviana* L.). Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Bogotá. 108 p.

Sudduth, K.A., C.W. Fraisse, S.T. Drummond, N.R. Kitchen. 1998. Integrating spatial data collection, modelling and analysis for precision agriculture. En: First International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry, Lake Buena Vista, Florida, 1-3 Junio.

Thornton, P.K. y G. Hoogenboom. 1994. A computer program to analyze single-season crop model outputs. *Agronomy Journal* 86: 860-868.

Thornton, P.K., G. Hoogenboom, P.W. Wilkens, y W.T. Bowen. 1995. A computer program to analyze multiple-season crop model outputs. *Agronomy Journal* 87: 131-136.

Timmerman-Vaughan, G., T. Frew, A. Russell, T. Khan, R. Butler, M. Gilpin, S. Murray y K. Falloon. 2002. QTL mapping of partial resistance to field epidemics of ascochyta blight of pea. *Crop Science* 42: 2100 -2111.

Torres, F.A. 1983. Acción del ácido naftalenacético sobre el crecimiento y floración en arveja (*Pisum sativum* L.). Tesis de grado, Programa de Estudios para Graduados en Ciencias Agrarias Universidad Nacional de Colombia – Instituto Colombiano Agropecuario, Bogotá. 67 p.

Truong, H.H. y C. Duthion. 1993. Time of flowering in pea (*Pisum sativum* L.) as a function of leaf appearance rate and node of first flower. *Annals of Botany* 72:133–142.

Turner, D.P., S.V. Ollinger, y J.S. Kimball, 2004. Integrating Remote Sensing and Ecosystem Process Models for Landscape- to Regional-Scale Analysis of the Carbon Cycle. *BioScience* 54(6): 573-584.

Uehara, G. y G.Y. Tsuji. 1993. The IBSNAT project. En: Penning de Vries *et al.* (ed.). Systems approaches for agricultural development. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. 505-513 p.

Ustin, S.L., S. Jacquemoud, y Y. Govaerts. 2001. Simulation of photon transport in a three-dimensional leaf: implications for photosynthesis. *Plant, Cell and Environment* 24: 1095–1103.

Valentinuz, O.R. y M. Tollenaar. 2006. Effect of genotype, nitrogen, plant density, and row spacing on the area-per-leaf profile in maize. *Agronomy Journal* 98:94–99.

Vega, C.R., F.H. Andrade, V.O. Sadras, S.A. Uhart, y O.R. Valentinuz. 2001. Seed number as a function of growth. A comparative study in soybean, sunflower, and maize. *Crop Science* 41:748–754.

Verdoort, A., E. Van Ranst, y L. Ye. 2004. Daily simulation of potential dry matter production of annual field crops in tropical environments. *Agronomy Journal* 96:1739–1753.

Vile, D., E. Garnier, B. Shipley, G. Laurent, M.L. Navas, C. Roumeti, S. Lavorel, S. Díaz, J.G. Hodgson, F. Lloret, G.F. Midgley, H. Poorter, M.C. Rutherford, P.J. Wilson y I.J. Wright. 2005. Specific leaf area and dry matter content estimate thickness in laminar leaves. *Annals of Botany* 96: 1129–1136.

Wallach, D., B. Goffinet, J.E. Bergez, P. Debaeke, D. Leenhardt, y J.N. Aubertot. 2001. Parameter estimation for crop models: a new approach and application to a corn model. *Agronomy Journal* 93:757–766.

Wang, Y.P. 2001. Modelling radiation absorption by plant canopies. En: Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting. *Memorias del Net Ecosystem Exchange Workshop*, Australia, 18-20 abril.

West, G.B. y J.H. Brown. 2005. The origin of allometric scaling laws in biology from genomes to ecosystems: towards a quantitative unifying theory of biological structure and organization. *The Journal of Experimental Biology* 208: 1575-1592.

Whisler, F.D., B. Acock, D.N. Baker, R.E. Fye, H.F. Hodges, J.R. Lambert, H.E. Lemmon,, J.M. McKinion y V.R. Reddy. 1986. Crop simulation models in agronomic systems. *Advances in Agronomy* 40:141-208.

Whitehead, S.J., R.J. Summerfield, F.J. Muehlbauer, C.J. Coyne, R.H. Ellis y T.R. Wheeler. 2000. Crop improvement and the accumulation and partitioning of biomass and nitrogen in lentil. *Crop Science* 40:110–120.

Whitman, C.T. y B.W. Clymer, 1996. Using the OSP growth simulation model. *OSPlanning Memo Vol. II No. 2*. Department of the Treasury, New Jersey, USA.

Williams, J.R., C.A. Jones, J.R. Kiniry y D.A. Spanel. 1989. The EPIC crop growth model. *Transactions of the ASAE* 32: 497-511.

Williams III, L. y T.E. Martinson. 2003. Nondestructive leaf area estimation of ‘Niagara’ and ‘DeChaunac’ grapevines. *Scientia Horticulturae* 98:493–498.

Wilson D.R. y M. Robson. 2006. Pea phenology responses to temperature and photoperiod. 13th Australian Agronomy Conference 10-15 Septiembre 2006, Perth, WA. En: <http://www.regional.org.au/au/asa/1996/contributed/590wilson.htm>. Consultado en septiembre/2006

Yan, H.P., M.Z. Kang, P. De Reffye y M. Dingkuhn, 2004. A Dynamic, Architectural Plant Model Simulating Resource-dependent Growth. *Annals of Botany* 93: 591-602.

Yang, H.S., A. Dobermann, J.L. Lindquist, D.T. Walters, T.J. Arkebauer y K.G. Cassman. 2004. Hybrid-maize—a maize simulation model that combines two crop modeling approaches. *Field Crops Research* 87:131–154.

Yang, J. y M. Alley. 2005. A mechanistic model for describing corn plant leaf area distribution. *Agronomy Journal* 97:41–48.

Yin, X., J. Goudriaan, E.A. Lantinga, J. Vos y H.J. Spiertz. 2003. A flexible sigmoid function of determinate growth. *Annals of Botany* 91: 361-371.

Yu, M., Q. Gao y M.J. Shaffer. 2002. Simulating Interactive effects of symbiotic nitrogen fixation, carbon dioxide elevation, and climatic change on legume growth. *Journal of Environmental Quality* 31:634–641.

Yu, Q., S.A. Saseendran, L. Ma, G.N. Flerchinger, T.R. Green y L.R. Ahuja. 2006. Modeling a wheat–maize double cropping system in China using two plant growth modules in RZWQM. *Agricultural Systems* 89: 457–477.

Zand-Parsa, S., A.R. Sepaskhah y A. Ronaghi. 2005. Development and evaluation of integrated water and nitrogen model for maize. *Agricultural Water Management* 81: 227-256.