

**FACULTAD DE AGRONOMIA
ESCUELA DE POSGRADOS
PROGRAMA DE DOCTORADO
EN CIENCIAS AGROPECUARIAS –ÁREA AGRARIA
ENFASIS EN FISILOGIA DE CULTIVOS**

UN MODELO SIMPLE DE PRODUCCION POTENCIAL DE UCHUVA
(Physalis peruviana L.)

MELBA RUTH SALAZAR GUTIERREZ

**BOGOTA, D.C.
2006**

**FACULTAD DE AGRONOMIA
ESCUELA DE POSGRADOS
PROGRAMA DE DOCTORADO
EN CIENCIAS AGROPECUARIAS –ÁREA AGRARIA
ENFASIS EN FISILOGIA DE CULTIVOS**

**UN MODELO SIMPLE DE PRODUCCION POTENCIAL DE UCHUVA
(*Physalis peruviana* L.)**

Director

**ALEXANDER COOMAN
Ingeniero Agrícola Ph.D
Director Centro de Investigaciones y
Asesorías Agroindustriales
Universidad Jorge Tadeo Lozano**

Codirector

**GERHARD FISCHER
Ingeniero Hortícola Ph.D
Profesor Asociado Universidad Nacional
de Colombia**

Consejero Internacional

**JAMES W. JONES
Ingeniero Agrícola Ph.D
Distinguished Professor
Agricultural and Biological Engineering
Department University of Florida**

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

Por:

MELBA RUTH SALAZAR GUTIERREZ

Asesor:

**BERNARDO CHAVES
Estadístico MSc.
Profesor Asociado Universidad Nacional
de Colombia**

**BOGOTA, D.C.
2006**

“El presidente de tesis y el consejo examinador, no serán responsables de las ideas emitidas por el autor”.

(Art. 217 de los Estatutos de la Universidad Nacional de Colombia)

Nota de Aceptación

Director de Tesis

Jurado

Jurado

Jurado

A Bernardo y Junior
Por su amor y apoyo incondicional
Gracias por entender los momentos de soledad causados por el intenso trabajo
Gracias Dios por permitirme compartir este logro con mi esposo y mi hijo

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a las siguientes personas y entidades por su colaboración prestada sin la cual no hubiera sido posible la realización de este trabajo

Dr. Alexander Cooman, por la dirección de la tesis

Profesor Gerhard Fischer por la codirección de la tesis

Dr. James W. Jones por su asesoría.

Profesor Bernardo Chaves por su asesoría.

COLCIENCIAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ASESORIAS AGROINDUSTRIALES (CIAA)
DE LA UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO

AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERING DEPARTMENT-
UNIVERSITY OF FLORIDA

A todas las demás personas que de una u otra forma contribuyeron en la ejecución de este trabajo

RESUMEN

UN MODELO SIMPLE DE PRODUCCION POTENCIAL DE UCHUVA (*Physalis peruviana* L.)

La uchuva (*Physalis peruviana* L) se desarrolla en Colombia en zonas altas, ocupa el segundo renglón en las exportaciones Colombianas de frutales después del banano y su área cultivada ha aumentado durante los últimos años. Aunque se han realizado varios estudios en uchuva, hay una carencia importante del conocimiento para apoyar el desarrollo tecnológico de esta especie. El objetivo de este estudio fue construir un modelo simple de producción potencial de crecimiento, desarrollo y producción. Los modelos de simulación pueden ser una herramienta útil para optimizar la selección de zonas productoras y el manejo de los cultivos. El modelo se basa en la temperatura y la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y asume que el cultivo tiene condiciones óptimas de agua y nutrientes y que no está limitado por plagas, enfermedades o arvenses. Para un modelo potencial de la producción, el índice de crecimiento diario es calculado por un modelo explicativo mecánico; el incremento diario en materia seca depende de la fracción de luz interceptada por el follaje, la radiación y el uso eficiente de la luz para convertirse en biomasa. La masa seca total se distribuye entre los órganos de la planta de acuerdo con su estado fenológico. El uso eficiente de la luz y el coeficiente de extinción son los parámetros del modelo, así como los coeficientes de distribución (alfas). El desarrollo fenológico de la planta está determinado por el tiempo térmico, para lo cual se estimó la temperatura base (T_b) para uchuva. Los datos usados para la construcción del modelo provienen de experimentos desarrollados en dos localidades diferentes (Cundinamarca y Boyacá, Colombia), bajo condiciones de invernadero y a campo abierto, donde se llevaron a cabo mediciones de diferentes variables fisiológicas. Con el propósito de estimar T_b , tiempo en días y temperatura media acumulada desde el trasplante hasta la aparición del primer botón, de primer botón a primera flor, de primera flor a primer fruto (cuajado), de primer fruto a primer fruto maduro, así mismo se determinó la duración de estas fases en términos de tiempo térmico (TT). Para estimar el T_b de nudos se ajustó un modelo no lineal segmentado. La temperatura base también se estimó, usando diferentes valores de temperatura y minimizando el error de la varianza de esos eventos. La temperatura base (T_b) para aparición de nudos fue de $6,29^{\circ}\text{C}$, así mismo se encontró que para la aparición del primer botón floral T_b fue de $10,83^{\circ}\text{C}$, de botón a flor $5,61^{\circ}\text{C}$ de flor a fruto $10,20^{\circ}\text{C}$ y para la fase entre la aparición del primer fruto a maduro la temperatura base fue $1,89^{\circ}\text{C}$, se presenta el tiempo térmico requerido para alcanzar cada una de las fases anteriormente mencionadas. La simulación de los nudos se hizo con el método de Euler y el modelo ajusta relativamente bien para cada localidad. La distribución entre la etapa vegetativa y reproductiva se simuló basada en la hipótesis de que esta es regulada por la relación fuente vertedero. La masa seca total y su distribución se simuló con el método de Euler y el modelo ajustó relativamente bien para las localidades. El coeficiente de distribución estimado para la etapa vegetativa para hojas fue de 0,72 y tallos 0,28. Y los coeficientes de distribución en la etapa reproductiva fueron para hojas 0,09, tallos 0,23 y frutos 0,69.

ABSTRACT

A Simple Potential Production Model for Cape Gooseberry (*Physalis peruviana* L)

Keywords: Model, growth, development, cape gooseberry.

Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) is grown in the high altitude tropics of Colombia. It is the second most important fruit for export and the cultivated area has increased significantly during the last years. Several aspects of cape gooseberry have been studied so far, but there is an important lack of knowledge for supporting the technological development of this specie. The aim of this study was to construct a simple potential production model for crop growth, development and yield of cape gooseberry, as a tool for the selection of production zones and for optimizing production techniques. The model is based on temperature and photosynthetically active radiation (PAR) as exogenous variables and assumes that soil water and nutrients are unlimited and there is no damage by either pests or diseases. For a potential production model, the daily rate of growth is calculated by a mechanistic explanatory model; the daily increment in dry matter depends on incoming PAR, the fraction of light intercepted by foliage and the efficiency with which it is converted into dry matter. Total daily dry matter growth rate is then partitioned among the plant organs according to plant phenological stage. Light use efficiency and extinction coefficient were the parameters in the dry matter growth model as well as the alpha partitioning coefficients. Phenological development of the plant is determined by thermal time using a base temperature (T_b) for cape gooseberry. The data used to develop the model came from an experiment conducted in two different locations (Cundinamarca and Boyacá, Colombia), under greenhouse and open field conditions, where several physiological variables were measured. In order to estimate T_b , time in days and accumulated average temperature from transplanting until the first appearance of nodes, bud, flower, fruit and mature fruit were determined. To estimate the T_b for nodes, a nonlinear segmented model was fit to the data of nodes vs. thermal time. Base temperatures for the others stages were estimated by selecting T_b to minimize the error variances for prediction of these events. Base temperature for nodes appearance was 6.29°C, for first bud 10.83 °C, first bud to flower 5.61 °C, first flower to fruit 10.5 °C and first fruit to mature fruit 1.89 °C. Simulated number of nodes using Euler's method fitted reasonably well for each locality. The partitioning between vegetative and reproductive plant parts was simulated based on the hypothesis that it is regulated by sink strengths. Total dry matter production and partitioning were simulated reasonably well using Euler's method. The partitioning coefficients estimated for vegetative stage for leaves was 0.72 and for stem was 0.28, and the alpha partitioning coefficients estimated during reproductive stages for leaves were 0.09, stem 0.23 and fruit 0.69.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
TABLA DE CONTENIDO	iv
SIMBOLOS Y ABREVIACIONES	ix
CAPITULO 1 INTRODUCCION GENERAL	10
1.1 Introducción general	11
1.2 Estado del problema.....	12
1.3 Objetivos.....	12
1.3.1 Objetivo general.....	12
1.3.2 Objetivos específicos	13
2 CAPITULO 2 CARACTERISTICAS DEL CULTIVO	14
2.1 Introducción	15
2.2 Importancia ecológica.....	15
2.3 Variedades y ecotipos	16
2.4 Ecofisiología	16
2.5 Suelo	17
2.6 Crecimiento y desarrollo de la planta	17
2.6.1 Raíz	17
2.6.2 Tallo	18
2.6.3 Hojas	18
2.6.4 Flores.....	18
2.6.5 Cáliz.....	19
2.6.6 Fruto.....	19
2.7 Propagación.....	19
2.8 Producción	20
2.9 Productos derivados.....	20
2.10 Estacionalidad de la oferta - demanda	21
2.11 Índice de madurez (cosecha para exportación).....	21
3 CAPITULO 3 MODELACION Y SIMULACION	22
3.1 Introducción	23
3.2 Dinámica y análisis de sistemas.....	24
3.3 Modelos de simulación	25
3.4 Aplicación de modelos de simulación	26
3.5 Modelación en horticultura	26
3.6 Modelación del crecimiento y arquitectura de la planta	27
3.7 Modelos de producción potencial	28
3.8 Algunos modelos de producción de cultivos.....	29
4 CAPITULO 4 MODELO FENOLOGICO	34

4.1	FENOLOGÍA DE UCHUVA (<i>Physalis peruviana</i> L.): I. FUNCIÓN NO LINEAL PARA EL CÁLCULO DE TEMPERATURA BASE Y LA APARICIÓN DE NUDOS.....	35
4.1.1	Resumen.....	35
4.1.2	Introducción.....	35
4.1.3	Materiales y métodos.....	36
4.1.4	Resultados y discusión.....	41
4.1.5	Conclusiones.....	46
4.2	FENOLOGÍA DE UCHUVA (<i>Physalis peruviana</i> L.): II. FASES FENOLOGICAS DE DESARROLLO.....	47
4.2.1	Resumen.....	47
4.2.2	Introducción.....	47
4.2.3	Materiales y métodos.....	48
4.2.4	Resultados y discusión.....	50
4.2.5	Conclusiones.....	56
5	CAPITULO 5 . MODELO DE MASA SECA Y SU DISTRIBUCION.....	57
5.1	MODELO DE PRODUCCION DE MASA SECA DE LA PLANTA DE UCHUVA (<i>Physalis peruviana</i> L.) Y SU DISTRIBUCION.....	58
5.1.1	Resumen.....	58
5.1.2	Introducción.....	58
5.1.3	Materiales y métodos.....	59
5.1.4	Resultados y discusión.....	64
5.1.5	CONCLUSIONES.....	74
6	CAPITULO 6 ANALISIS DE SENSIBILIDAD.....	75
6.1	ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO FENOLOGICO Y DE MASA SECA Y SU DISTRIBUCION EN UCHUVA (<i>Physalis peruviana</i> L.).....	76
6.1.1	Resumen.....	76
6.1.2	Introducción.....	76
6.1.3	Materiales y métodos.....	77
6.1.4	Resultados y discusión.....	80
6.1.5	Conclusiones.....	92
7	CONCLUSIONES GENERALES.....	94
8	RECOMENDACIONES.....	96
9	REFERENCIAS.....	97

LISTA DE FIGURAS

- Figura 4.1 Diagrama de Forrester para el modelo de la aparición de nudos de uchuva. T es temperatura, T_b es el parámetro temperatura base (umbral mínimo de crecimiento) calculada para la aparición de nudos. a_1 , a_2 , b_1 y b_2 son parámetros del modelo..... 37
- Figura 4.2 Disposición del cultivo sembrado bajo invernadero (a) y su sistema de soporte en “V” respectivamente (b)..... 41
- Figura 4.3 Disposición del cultivo sembrado a campo abierto (a) y su sistema de soporte en “V” respectivamente (b)..... 41
- Figura 4.4 Aparición de nudos en función de días después del transplante (DDTR-días) $oNCex$, $oNMext$, $oNCi$ y $oNMi$ son los nudos observados y $pNCex$, $pNMex$, $pNCi$, $pNMi$ son los nudos estimados para Chía y Miraflores a campo abierto y dentro del invernadero respectivamente. 45
- Figura 4.5 Aparición de nudos en función de tiempo térmico ($TT-^{\circ}C$). $oNCex$, $oNMex$, $oNCi$ y $oNMi$ son los nudos observados y $pNCex$, $pNMex$, $pNCi$, $pNMi$ son los nudos estimados para Chía y Miraflores a campo abierto y dentro del invernadero respectivamente..... 45
- Figura 4.7 Cálculo de la temperatura base (T_b) para la aparición de primer botón floral (a), de primer botón floral a primera flor (b), primera flor a primer fruto cuajado (c), de primer fruto cuajado a primer fruto maduro (d), respectivamente..... 51
- Figure 4.8 Aparición del primer botón (a), primer botón primera flor (b), flor a fruto (c), fruto a fruto maduro (d) 54
- Figura 5.1 Diagrama de producción de masa seca y distribución. La masa seca y su distribución en hojas, tallo y frutos son variables estado del modelo. La radiación fotosintéticamente activa ($PAR MJ.m^{-2}.d^{-1}$) y la temperatura ($T^{\circ}C$) son variables de entrada del modelo La temperatura es una variable auxiliar con la cual se determina el SLA (área específica de la hoja), usando una función en términos del tiempo térmico. LUE, (uso eficiente de la luz $g.MJ^{-1}$), LAI (índice de área foliar $m^2 \cdot m^{-2}$), F_{LINT} fracción de luz interceptada, k (involucrado en F_{LINT}), coeficiente de extinción, δW_t : tasa de crecimiento diario de masa seca total, δW_{1t} , δW_{2t} , δW_{s1t} , δW_{s2t} , δW_f : tasas de crecimiento cada órgano en las etapas vegetativa y reproductiva. LUE, k , y los coeficientes de distribución de masa seca para hojas vegetativa y reproductiva (α_{11} , α_{12} , respectivamente) tallos vegetativa y reproductiva (α_{s1} , α_{s2} , respectivamente) y frutos (α_f) son los parámetros del modelo de masa seca. 63
- Figura 5.2. Tasa de crecimiento de masa seca total en $g.m^{-2}.d^{-1}$, y días después del transplante (Ddtr)..... 65
- Figura 5.3. Relación SLA (área específica de la hoja) vs. tiempo térmico, para estimación de LAI_{t+1} 66
- Figura 5.4. Valores observados y estimados de LAI vs días después del transplante (Ddtr). LAI valores observados y LAIe valores estimados de LAI. Para Chía. y Miraflores exterior e invernadero, respectivamente Cex, Mex, Cin, Min. 67

Figura 5.5 Valores observados y simulados de la masa seca total (W_t) vs días después del transplante (Ddtr); oCiout, oCin, oMout y oMin son los valores observados de masa seca para Chía (CIAA) a campo abierto e invernadero y Miraflores a campo abierto e invernadero respectivamente; eCout, eCin, eMout, eMin son los valores obtenidos con la calibración del modelo de masa seca total para Chía (CIAA) a campo abierto e invernadero y Miraflores a campo abierto e invernadero respectivamente	69
Figura 5.6 (a). Valores observados y simulados de la masa seca total de hojas (W_l), (b) tallos (W_s) (c) frutos (W_f) vs días después del transplante (DDTR); oCex, oMex, oCi, oMi eCex, eMex, eCi, eMi son los valores observados y estimados de masa seca total para Chía (CIAA) y Miraflores a campo abierto e invernadero respectivamente.....	71
Figura 5.7. (a). Valores observados y simulados de la masa seca total (W_t), (b) de hojas (W_l), (c) tallos (W_s) y (d) frutos (W_f) vs. días después del transplante (Ddtr); oCex, oMex, oCi, oMi eCex, eMex, eCi y eMi son los valores observados y estimados de masa seca para Chía (CIAA) y Miraflores a campo abierto e invernadero respectivamente.....	73
Figura 6.1. Sensibilidad de los parámetros del modelo de nudos. a. Todas las localidades, b. CIAA invernadero, c. CIAA exterior, d. Miraflores invernadero y e. Miraflores exterior.	81
Figura 6.2. Sensibilidad de los parámetros modelo de masa seca total a. Todas las localidades, b. CIAA invernadero, c. CIAA exterior, d. Miraflores invernadero y e. Miraflores exterior.	83
Figura 6.3. Relación masa seca total y parámetros a. coeficiente de extinción y b. uso eficiente de la luz.	84
Figura 6.4. Sensibilidad de los parámetros del modelo de masa seca foliar a. Todas las localidades, b. CIAA invernadero, c. CIAA exterior, d. Miraflores invernadero y e. Miraflores exterior.	85
Figura 6.5. Relación masa seca de hojas y parámetros a. coeficiente de extinción, b. uso eficiente de la luz y c. partición en hojas.	86
Figura 6.6. Sensibilidad de los parámetros del modelo de frutos de todas las localidades (a); CIAA invernadero (b), CIAA exterior (c), Miraflores invernadero (d) y Miraflores exterior (e).....	87
Figura 6.7. Relación masa seca de frutos y parámetros a. coeficiente de extinción, b. uso eficiente de la luz y c. partición en frutos.	88
Figura 6.8. Sensibilidad del número de nudos a cambios en temperatura en CIAA exterior.	89
Figura 6.9. Sensibilidad de la masa seca total a cambios en temperatura y radiación en CIAA exterior.	89
Figura 6.10. Sensibilidad de la masa seca total a la temperatura (T) y la radiación (R). .	90
Figura 6.11. Sensibilidad de la masa seca de hojas a cambios en temperatura y radiación en CIAA exterior.....	90
Figura 6.12. Sensibilidad de la masa seca de hojas a la temperatura y la radiación.	91
Figura 6.13. Sensibilidad de la masa seca de frutos a cambios en temperatura y radiación en CIAA exterior.....	91
Figura 6.14. Sensibilidad de la masa seca de frutos a la temperatura y la radiación.	92

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Valores en miles de US \$ correspondiente a los últimos 10 años de producción y área cultivada en Colombia.....	20
Tabla 4.1 Temperatura y humedad de las localidades	39
Tabla 4.2. Parámetros estimados para el modelo de aparición de nudos.....	42
Tabla 4.3 Tasa mínima ¹ y máxima ² de aparición de nudos, para las cuatro localidades..	42
Tabla 4.4. Temperatura y humedad de las localidades.	48
En la tabla 4.5 se presentan los valores calculados de Tb para cada etapa de desarrollo, con ambos métodos trabajados (analítico y no lineal) se encontró el mismo valor para Tb.	50
Tabla 4.6. Valores de la prueba de F de varianzas entre diferentes estados fenológicos .	52
Tabla 4.7 Tiempo térmico acumulado para cada etapa y para cada localidad (Ddtr: días después del transplante, TT: tiempo térmico (°C)).	55
Tabla 5.1. Características climáticas (temperatura y humedad relativa) de las localidades Chía, Cundinamarca y Miraflores, Boyacá.	59
Tabla 5.2. Días después del transplante (Ddtr) y tiempo térmico (TT) acumulado para la aparición de frutos en cada localidad.....	68
Tabla 5.3. Parámetros estimados para cada una de las localidades estudiadas, k coeficiente de extinción de luz, LUE ₁ , LUE ₂ , uso eficiente de PAR para las etapas vegetativa y reproductiva. α_1 , α_2 , α_1 y α_2 , parámetros de distribución de hojas y tallos para etapas vegetativa y reproductiva respectivamente, α_f parámetro de distribución de frutos.	72
Tabla 6.1. Valores de los parámetros usados en el análisis de sensibilidad del modelo de nudos.	77
Tabla 6.2. Valores de los parámetros usados en el análisis de sensibilidad del modelo de masa seca total.	78
Tabla 6.3. Valores de los parámetros usados en el análisis de sensibilidad del modelo de masa seca de hojas.	78
Tabla 6.4 Valores de los parámetros usados en el análisis de sensibilidad del modelo de masa seca de frutos.	78
Tabla 6.5. Variaciones en las series de temperatura y radiación.	79
Tabla 6.6. Valores de # de nudos, TTC, TTFN, TTM presentados con los cambios de temperatura base.	82

SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES

δW_t	:	tasa de crecimiento diario de masa seca total $\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$
δW_l	:	tasa de crecimiento diario de masa seca de hojas $\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$
δW_s	:	tasa de crecimiento diario de masa seca de tallos $\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$
δW_f	:	tasa de crecimiento diario de masa seca de frutos $\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$
F_{LINT}	:	fracción de intercepción de radiación fotosintéticamente activa
LUE	:	uso eficiente de la luz g.MJ^{-1}
PAR	:	radiación fotosintéticamente activa $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$
δLAI	:	incremento en índice de área foliar $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$
SLA	:	área específica de la hoja $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$
LAI	:	índice de área foliar $\text{m}^2.\text{m}^{-2}$
W_t	:	masa seca total $\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$
W_l	:	masa seca de hojas $\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$
W_s	:	masa seca de tallos $\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$
W_f	:	masa seca de frutos $\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$
α_l	:	coeficiente de distribución de masa seca de hojas
α_s	:	coeficiente de distribución de masa seca de tallos
α_f	:	coeficiente de distribución de masa seca de frutos
k	:	coeficiente de extinción de la luz
T_b	:	temperatura base ($^{\circ}\text{C}$)
T_{b_b}	:	T_b para aparición del primer botón floral ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{b_{bf}}$:	T_b para el tiempo de aparición de primer botón a primera flor ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{b_{ff}}$:	T_b para tiempo entre la primera flor y el primer fruto (cuajado) ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{b_{fm}}$:	T_b para el tiempo entre el primer fruto a primer fruto maduro ($^{\circ}\text{C}$)
T	:	temperatura media diaria ($^{\circ}\text{C}$)
TT	:	tiempo térmico ($^{\circ}\text{C}$)
δN_1	:	tasa de aparición de nudos primer segmento n.d^{-1}
δN_2	:	tasa de aparición de nudos segundo segmento n.d^{-1}
a_1	:	parámetro del modelo de nudos pendiente fase I
a_2	:	parámetro del modelo de nudos pendiente fase II
b_1	:	parámetro del modelo de nudos intercepto fase I
b_2	:	parámetro del modelo de nudos intercepto fase II
N_{udo_t}	:	número de nudos simulado en el tiempo t
$N_{\text{udo}_{t-1}}$:	número de nudos simulado en el tiempo inmediatamente anterior al t
$\Delta t = 1$:	período de tiempo (un día) de integración del modelo
Ddtr	:	días después del transplante

CAPITULO 1 INTRODUCCION GENERAL

1.1 Introducción general

La uchuva (*Physalis peruviana* L) ocupa el segundo lugar en las exportaciones en fruta fresca en Colombia, por sus atributos nutricionales y medicinales es muy apetecida en los mercados internacionales. Colombia es el primer productor de uchuva a nivel mundial seguido por Sudáfrica. Originaria de los andes suramericanos, en Colombia crece como planta silvestre y semisilvestre en zonas altas entre los 1,500 y 3,000 m.s.n.m. (FAO, 1982). Sus frutos (son la parte de la planta que se comercializa) están encerrados por un cáliz o capacho y se caracterizan por que poseen altos contenidos de vitaminas A y C, hierro, fósforo y un apreciable contenido de pectinaza que se utiliza en la elaboración de mermeladas.

La uchuva se cultiva en regiones de clima frío moderado y frío (1,800 a 2,800 m.s.n.m.), en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Antioquia. La producción se lleva a cabo por pequeños agricultores, la tecnología es diversa, se desarrolla en pequeñas extensiones, con alta participación de mano de obra familiar (Angulo, 2003a;).

Los costos son variables debido a las diferentes tecnologías que se aplican; generalmente no se utiliza asistencia técnica, análisis de suelos u otras ayudas; los agricultores de manera espontánea adoptan prácticas recomendadas por sus vecinos o por los vendedores de insumos. (Agrocadenas 2004).

Una de las principales metas es mejorar el nivel tecnológico de los cultivos y optimizar la productividad, con el objetivo de garantizar la calidad y el cumplimiento con los estándares internacionales. Debido a su demanda en los mercados internacionales, es importante desarrollar investigación para incrementar la producción y calidad con el fin de alcanzar un producto más competitivo.

Los modelos de simulación han cobrado importancia en los últimos años debido a su utilidad como herramienta de investigación y de análisis para la toma de decisiones sobre el manejo de los cultivos, estos constituyen una herramienta útil para seleccionar zonas productoras óptimas y además permiten establecer pautas para el manejo adecuado de los cultivos.

El interés de este trabajo es construir un modelo potencial de producción de uchuva, que permita establecer parámetros para diferentes estados de desarrollo fenológico y producción de masa seca del cultivo bajo condiciones óptimas. Los únicos limitantes en este modelo son la radiación y la temperatura, no hay limitantes de suelo, nutrientes ni de plagas y enfermedades. El modelo permite establecer la duración de diferentes estados fisiológicos con relación a la acumulación de grados día, el desarrollo de nudos y la simulación de biomasa del cultivo. No hay en este momento información acerca de un modelo que establezca estos parámetros para uchuva (*Physalis peruviana* L.) en Colombia.

Técnicas de modelación y simulación del crecimiento de los cultivos y sus respuestas al manejo se han utilizado en otros países con gran variedad de cultivos, sin embargo estas no han sido utilizadas ampliamente en Colombia, por lo cual es de gran interés su desarrollo con el objeto de generar nuevas investigaciones como el de mejorar el proceso de toma de decisiones en todos los niveles del sector agropecuario (Cantor *et al.*, 1995).

1.2 Estado del problema

La uchuva es una de las frutas promisorias para el desarrollo de ciertas regiones del país como Cundinamarca, Boyacá, Antioquia y Cauca, entre otros departamentos. Además es un cultivo con una gran ventaja para Colombia que es un país tropical y puede garantizar una constante provisión a mercados internacionales. Colombia ocupa el primer lugar en exportaciones en el mundo, y con la reciente apertura del mercado estadounidense, incrementó la demanda de la fruta, y con ello la exigencia de mayor productividad e incremento en las extensiones cultivadas de este producto en Colombia.

En Colombia se han desarrollado avances en investigación y generación de nuevas tecnologías en cuanto al cultivo, poscosecha y exportación de este fruto; sin embargo es necesario ampliar conocimientos referentes a su fisiología y manejo de tal forma que se pueda dar mejores y más acertadas recomendaciones en cuanto a su manejo y así explorar al máximo su potencial. Hasta la fecha no se encuentra en la literatura consultada modelos de simulación y predicción en Colombia que permitan simular y describir el comportamiento fisiológico de la uchuva (*Physalis peruviana* L.)

Las técnicas de modelación y simulación para el crecimiento de cultivos son una herramienta que permiten aprovechar información y generar respuestas al manejo de cultivos, estas herramientas no han sido exploradas ampliamente en Colombia, por lo que es de gran interés iniciar proyectos de modelación con el objeto de aportar a la investigación y al proceso de toma de decisiones en todos los niveles del sector agropecuario. Este tipo de estudios contribuye a adquirir un conocimiento integral del cultivo y al planteamiento y desarrollo de proyectos de investigación encaminados al mejoramiento genético y a mejorar las prácticas culturales.

La información generada a partir de modelos de simulación proporciona a los investigadores y agricultores herramientas para el mejoramiento del cultivo y permite proponer proyectos productivos a gran escala en zonas apropiadas con el fin de obtener una buena productividad y calidad (Salazar *et al.*, 2005).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

El objetivo de este estudio es construir un modelo simple de producción potencial para uchuva (*Physalis peruviana* L.), que describa el desarrollo fenológico y producción de

masa seca desde el trasplante hasta el final del primer ciclo de producción del cultivo en función de variables de clima.

1.3.2 Objetivos específicos

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

- Construir un modelo de aparición de nudos en función del tiempo térmico.
- Determinar temperaturas base para etapas como aparición de nudos; aparición del primer botón; para el tiempo entre la aparición del primer botón a primera flor; tiempo entre apertura de la primera flor a fruto y aparición del primer fruto maduro.
- Establecer la duración de estas etapas en términos de tiempo térmico.
- Construir un modelo de masa seca y su partición en hojas, tallos y frutos.
- Analizar la sensibilidad del modelo a variaciones en valores de los parámetros y variaciones en variables climáticas.

Los contenidos de esta tesis son:

El capítulo 2, presenta una revisión breve de las principales características del cultivo, donde se incluye importancia ecológica de la planta, variedades y ecotipos, eco fisiología, entre otros aspectos de crecimiento y desarrollo de la planta.

Diferentes modelos de crecimiento para simulación, bajo diferentes condiciones climáticas se revisan en el Capítulo 3.

El modelo fenológico se desarrolla en el capítulo 4, y el modelo de masa seca y su distribución se presenta en el capítulo 5.

El capítulo 6 presenta el análisis de sensibilidad del modelo y finalmente se presentan unas conclusiones generales y recomendaciones

CAPITULO 2 CARACTERISTICAS DEL CULTIVO

2.1 Introducción

La uchuva (*Physalis peruviana* L.), pertenece al orden Tubiflorales (Angulo *et al.*, 2005), a la familia de las solanáceas, género *Physalis*, especie *peruviana* que incluye cerca de 100 especies de hierbas anuales y perennes que forman sus frutos en un cáliz (Legge, 1974; Morton, 1987); su origen se atribuye a los valles bajos andinos de Perú y Chile. Se cultiva desde Venezuela hasta Chile, a todo lo largo y ancho de la cordillera andina. Fue introducida por los españoles en Sudáfrica hace más de 200 años y de allí la uchuva se distribuyó a Kenia, Zimbabwe, Australia, Nueva Zelanda, Hawai y la India, donde se cultiva comercialmente. Sin embargo, hoy la uchuva se encuentra en casi todos los altiplanos de los trópicos (Verheij, 1991), y en varias partes de los subtropicos, incluyendo Malasia.

Conocida por los incas como uvilla, la uchuva recibe varios nombres en diferentes países de América y Europa, sin embargo, en el mercado internacional *Physalis*, es el nombre más común. En el Perú se llama también capulí, aguaymanto, tomate sylvestre, uchuba, motojobobo; en Bolivia embolsado; topotopo o chuchuva en Venezuela; capulí, amor en bolsa, bolsa de amor en Chile; cereza del Perú en México; poha en Hawai; en Estados Unidos se le han asignado varios nombres, como ground / andean cherry, golden berry, cape gooseberry; en España la llaman alquequenje, en Alemania Judaskirsche y en Francia coqueret du Perou; uvilla en Ecuador; uvilla, uchuva, vejigón o guchavo en Colombia; cape gooseberry, golden berry, pompelmoes o apelliefie en South Africa; alkekengi o coqueret en Gabon; lobolobohan en Filipinas; teparee, tiparee, makowi; en la India cape gooseberry, entre otros.

2.2 Importancia ecológica

La uchuva se adapta fácilmente a diversas condiciones agroecológicas, es una planta que perdura por mucho tiempo en un mismo lugar (Fischer, 2000).

La FAO (1982) la considera una especie tolerante, ya que se adapta fácilmente al clima mediterráneo, siendo su origen tropical, y a cualquier tipo de suelo. Pérez (1986) indica que la uchuva es clasificada como maleza común en tierras frías de Colombia, sin embargo Romero (1991) destaca su ventaja de ser rústica y crecer en toda clase de suelos, prefiriendo los rastrojos y lugares más o menos sombreados.

La uchuva por su rápido y expandido crecimiento se convierte fácilmente en maleza, si se la deja propagar sin manejo, en especial campos nuevos sin vegetación; se destaca por su adaptabilidad y asociación con otros cultivos como frutales, hortalizas, tubérculos y algunos cereales. Se considera un riesgo para animales de pastoreo el consumo de la uchuva, ya que posiblemente sus hojas y tallos causan Diphtheresis, una enfermedad de las membranas intestinales del ganado (National Research Council, 1989).

2.3 Variedades y ecotipos.

El género *Physalis* incluye unas 100 especies herbáceas, perennes y anuales, en las cuales se forman y desarrollan los frutos encerrados en un cáliz, se encuentran en su gran mayoría en estado silvestre. Los frutos de las especies *angulata*, *minima*, *ixocarpa* y *pruinosa*, son comestibles y también crecen de forma silvestre en el sureste de Asia (Verheij y Coronel, 1991; Fischer 2000). La especie *peruviana* es actualmente la especie más comercializada por las características organolépticas y medicinales de su fruto que la hace muy apetecida en el mercado internacional (Fischer *et al.*, 2000; Angulo, 2005).

En Colombia no se ha hecho una extensa selección de variedades y solamente se conocen ecotipos o plantas procedentes de diferentes regiones o países, que se diferencian por el tamaño, el color y el sabor del fruto, la forma del cáliz y el porte de la planta. Actualmente en el país se cultiva el ecotipo Colombia. En Colombia se introdujeron a finales de 1980 al departamento de Boyacá, dos ecotipos procedentes de Kenia y Sudáfrica. Almanza y Fischer (1993) compararon estos ecotipos con el originario de Colombia y encontraron diferencias en el fruto en cuanto al color, tamaño y forma del cáliz. Los frutos de Kenia y Sudáfrica tienen un peso promedio de 6 a 10 g, mientras que los de Colombia pesan entre 4 y 5 g, son de mejor coloración y mayor contenido de azúcares, característica que lo hace de mayor aceptabilidad en el mercado internacional. El ecotipo Sudáfrica tiene porte bajo con hojas grandes contrario al de Colombia que es de porte alto y hojas delgadas.

En Australia Verheij y Coronel (1991) encontraron frutos grandes pero insípidos, conocidos como Golden nugget o New Sugar Giant. Comercialmente en Estados Unidos se conocen tres variedades: 'Peace', 'Giant Groundcherry' y 'Goldenberry' (Wolff 1991). CRFG (1997) describe otras variedades así: 'Giallo Grosso', 'Giant Poha Berry', 'Golden berry' y 'Golden berry-Long Ashton'.

En Colombia existen colecciones de uchuva en la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, con 220 accesiones, y en Corpoica (Rio Negro, Antioquia y Mosquera) con 98 accesiones (Ligarreto *et al.*, 2005).

2.4 Ecofisiología

La uchuva en Colombia se cultiva con fines comerciales en regiones de clima frío moderado y frío, principalmente en Cundinamarca, Boyacá, Antioquia y Cauca. La uchuva crece como planta silvestre o semisilvestre en zonas altas de 1.500 a 3.000 m.s.n.m. y en Colombia entre 1.800 y 2.800 m.s.n.m (Fischer y Angulo, 1999). A mayor altura sobre el nivel del mar, disminuye el contenido de sólidos solubles, azúcares y provitamina A, mientras que la concentración de vitamina C no se ve afectada por la altura (Fischer 1,995). La temperatura y la luz juegan un papel importante en el tamaño, color, contenido nutricional, sabor y tiempo de maduración del fruto. Para obtener un fruto de óptima calidad se requiere una intensidad lumínica equivalente entre 2.500 a 3.000 horas luz / año. Los días cortos fomentan la inducción floral (Heinze y Midasch,

1991). El promedio de temperatura óptimo está entre 13 y 18 °C. Temperaturas muy altas pueden perjudicar la floración y fructificación (Wolff, 1991) mientras que a temperaturas muy bajas (menores a 10°C), condiciones de sequía, encharcamiento y vientos fuertes la planta no progresa (Fischer, 2000).

Las precipitaciones deben oscilar entre 1.000 y 2.000 mm distribuidos a lo largo del año, con una humedad relativa entre 70% y 80% (Fischer y Angulo, 1999). Es importante el suministro de agua de manera constante, en conjunto con buen suministro de Ca y B para evitar que se rajen los frutos (Fischer, 2000).

2.5 Suelo

Para su cultivo se recomiendan suelos con estructura granular y textura areno - arcillosa, con buen drenaje y preferiblemente, que contengan buenos contenidos de materia orgánica y un pH entre 5,5 y 6,5. Tierras con alta fertilidad favorecen el crecimiento de las plantas, mientras que en las de fertilidad baja se registra fructificación temprana y baja calidad de los frutos (Angulo, 2005).

2.6 Crecimiento y desarrollo de la planta

La uchuva es un arbusto semiperenne de 1,5 m de altura aproximadamente, posee abundante ramificación rastrera cuando se propaga vegetativamente. Presenta un crecimiento indeterminado, el meristemo terminal permanece vegetativo hasta la aparición de la flor que marca el inicio del ciclo reproductivo, comportamiento similar a lo que ocurre en algunas variedades de tomate. Cuando inicia la floración, el crecimiento de raíces, hojas, tallos, ramas y frutos se presenta simultáneamente, la planta no entra en receso, siempre desarrolla órganos, aunque la cosecha haya pasado, aún después de un pico de producción continúa su desarrollo aunque disminuye el crecimiento vegetativo (Fischer, 2000)

2.6.1 Raíz

La mayoría de las raíces son fibrosas y se encuentran entre 10 a 15 cm de profundidad, el sistema radical es ramificado y profundiza con sus raíces principales hasta unos 50 a 80 cm (Fischer, 1989). La raíz es poco profunda, si la planta proviene de semilla, la raíz es abundante y le da mayor estabilidad a la planta y ésta se puede nutrir mejor, pero si proviene de la forma vegetativa, la raíz es débil y escasa, lo que la hace más susceptible al volcamiento (Angulo, 2005).

Las raíces que se forman en estacas no son pivotantes y crecen más superficiales causando un sistema radical débil, y una mayor precocidad de la producción, y un ciclo de vida más corto de la planta (Angulo, 1988).

El desarrollo de las raíces depende del tipo y textura del suelo y especialmente de la aireación, la temperatura y la humedad del mismo. Con bajas temperaturas en la rizósfera (14°C), la planta forma una mayor biomasa de raíces finas, probablemente para aumentar su volumen radical y ser capaz de absorber una mayor cantidad de agua, pues la absorción es reducida en suelos fríos (Fischer, 2000). En zonas muy altas la uchuva desarrolla un sistema de raíces más superficial con el fin de aprovechar mejor el calor del mediodía.

2.6.2 Tallo

La uchuva posee un tallo algo quebradizo de color verde, con vellosidades de textura muy suave al tacto. Es herbáceo y se ramifica desde la parte basal, cuando la planta proviene de propagación vegetativa. Si proviene de semilla la ramificación se hace sobre un solo eje que se bifurca en forma natural entre los nudos 8 y 12. En cada nudo de las ramas productivas se desarrollan dos hojas, una yema vegetativa y una reproductiva o flor (Angulo, 2005).

La planta crece desde la base normalmente sin tutorado, hasta una altura de 1,0 a 1,5 m con poda y espaldera puede llegar a 2,5 m o más. Si se deja crecer un solo eje central, este termina su desarrollo vegetativo después del 8 a 12 nudo con la formación de una inflorescencia de donde parten dos ramas productivas que desarrollan en su primer nudo una nueva flor con igual número de ramificaciones (ramificación policasial) y así sucesivamente. Existen varios sistemas de manejo que influyen en el crecimiento y desarrollo del tallo, esto se hace con el fin de cosechar frutos de mayor tamaño y calidad y/o facilitar el manejo de la plantación. El sistema depende especialmente de la poda, y de la distancia entre plantas (Fischer, 2000).

2.6.3 Hojas

Las hojas son enteras, similares a un corazón, pubescentes y de disposición alterna. Tienen un tamaño entre 5 a 15 cm de largo y 4 a 10 cm de ancho. En la parte basal del tallo principal, antes de la primera bifurcación se desarrolla solamente una hoja por nudo, mientras que las ramas laterales y en la productivas, cada nudo normalmente lleva dos hojas. Una planta en condiciones de crecimiento muy favorables puede formar hasta mil hojas o más y este número depende del desarrollo del tallo y su cantidad de nudos. Igualmente su área foliar puede llegar a 150 dm²/planta o más y el tamaño de una hoja hasta 25 a 30 cm² (Fischer, 1995). Después de la maduración del fruto, las hojas se amarillan y caen.

2.6.4 Flores

Las flores son solitarias, pedunculadas y hermafroditas de cinco pétalos, con una corola amarilla de forma tubular y con cinco puntos morados en su base. Las flores son

fácilmente polinizadas por insectos o el viento, es común también la autopolinización (National Research Council, 1989).

2.6.5 Cáliz

El cáliz es gamosépalo formado por cinco sépalos, veloso con venas salientes y con una longitud entre 4 a 5 cm. Cuando la flor cae el cáliz se expande, formando una especie de capuchón o vejiga muy fina que recubre al fruto durante su desarrollo. Durante los primeros 40 a 45 días es verde, pero con la maduración del fruto va perdiendo clorofila y se vuelve pergamino al final. Protege al fruto contra insectos, pájaros, enfermedades y situaciones climáticas extremas, además de servir como una fuente indispensable de carbohidratos durante los primeros 20 días del crecimiento del fruto (Fischer y Lüdders, 1997; Fischer *et al.*, 1997).

2.6.6 Fruto

El fruto es redondo - ovoide, del tamaño de una uva grande, con piel lisa, cerácea, brillante y de color amarillo – dorado – naranja; o verde según la variedad, es una baya carnosa en forma de globo, con un peso entre 4 y 10 g y un diámetro de 1,25 a 2,5 cm, cubierto por un cáliz. Su pulpa es jugosa con semillas de forma lenticular y puede contener entre 200 a 400 semillas, de color amarillo pequeñas, desprovistas de hilos placentarios. La pulpa del fruto esta formada por tejido procedente tanto del pericarpio como de la placenta, el parénquima del fruto no es compacto y presenta vacíos que aumentan con la maduración del fruto (Valencia, 1985).

La inserción del nuevo fruto en el nudo siguiente de la misma rama demora unos 5 a 7 días (Fischer, 2000). El fruto tiene pocos estomas hacia la zona peduncular y aumenta la cantidad de estomas hacia la zona distal. Los frutos mas grandes se producen en la primera cosecha (Angulo, 2005). Del comportamiento respiratorio de la uchuva se puede decir que es un fruto climatérico, alcanza su pico en el día 64 a una temperatura promedio de 16,2 °C y con una intensidad de 13,53 mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹ (Castañeda y Paredes, 2003). Según los mismos autores el fruto de uchuva presenta un modelo de crecimiento sigmoideal con 3 etapas bien definidas: Etapa 1 desde el cuajamiento hasta el día 35, etapa 2 desde el día 36 al 49 y etapa 3 desde el 50 hasta el 84.

2.7 Propagación

El cultivo se propaga por semillas ya que estas presentan un alto porcentaje de germinación (85 a 90%), para lo cual se requiere desarrollar semilleros que permitan su germinación para su posterior trasplante a campo. El tiempo entre la iniciación del semillero y la primera cosecha es de aproximadamente nueve meses y medio en la zona de clima frío de Colombia. La uchuva también puede propagarse vegetativamente por estaca, in vitro o injerto.

Para hacer un mejor manejo del cultivo y un mejor aprovechamiento de la radiación solar por las hojas y obtener fruta de mayor calidad en cultivos comerciales, se recomienda el tutorado de las plantas (Angulo, 2005).

2.8 Producción

El período útil de producción de la planta es de nueve a once meses desde el momento de la primera cosecha, ya que a partir de entonces disminuye tanto la productividad como la calidad de la fruta. La producción de uchuva en Colombia es continua a lo largo del año y, además, cuenta con algunos cultivos programados de acuerdo con las ventanas de exportación en los mercados europeos (de octubre a mayo). Según las estadísticas del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2005) el cultivo de uchuva ha crecido aceleradamente en los últimos años. La exportación a diciembre de 2005 ascendió a los 17,8 millones de US\$ (FOB). La tabla 2.1 presenta el total de la superficie (ha) cultivada en uchuva, la producción en toneladas y los valores en miles de US \$ correspondiente a los últimos 10 años de producción y área cultivada en Colombia.

Tabla 2.1 Valores en miles de US \$ correspondiente a los últimos 10 años de producción y área cultivada en Colombia.

Año	Total nacional superficie cultivada (ha)	Producción (t)	Valor total anual (miles de US\$)
1995	34,5	936,0	4.389
1996	54,0	1.488,0	4.415
1997	36,0	948,0	4.496
1998	58,0	1.608,0	5.050
1999	221,0	4.343,0	4.568
2000	316,0	6.335,5	7.497
2001	431,5	8.453,5	8.713
2002	415,5	6.518,0	8.371
2003	534,0	9.872,9	8.929
2004	792,0	11.327,6	14.116
01-12-2005			17.895

2.9 Productos derivados

En la actualidad se encuentran diferentes productos procesados a partir de la uchuva como la mermelada, la uchuva pasa y los confites de uchuva cubiertos de chocolate. Por sus características puede ser procesada para jugo, néctar, pulpa y otros productos con azúcar como el bocadillo (SIM 2001, 2005)

2.10 Estacionalidad de la oferta - demanda

En Sudáfrica se produce y comercializa uchuva en el mercado mundial durante el verano y principios de otoño, mientras que Inglaterra se provee de la cosecha doméstica en el otoño. Nueva Zelanda dispone de producción exportable, principalmente a Europa, entre abril y junio. (SIM 2001, 2005)

Colombia comercializa su fruta a lo largo del año, colocándola mayoritariamente en Europa, Canadá y Estados Unidos. Zimbabwe ubica su producción en Europa durante todo el año, mientras que Kenya la exporta durante los meses de otoño. La demanda en estos mercados de frutas exóticas importadas tiende a la baja durante el verano, cuando se dispone de altos volúmenes de producción local de una amplia variedad de otras frutas. (SIM 2001, 2005, 2006)

2.11 Índice de madurez (cosecha para exportación)

No se recomienda cosechar uchuva durante o luego de la lluvia; en caso de ocurrir, se debe dejar secar al sol en la mata. Al inicio de su etapa de madurez las frutas caen naturalmente al suelo, sin embargo, el proceso de maduración continúa hasta que el color cambia de verde a amarillo – dorado. Debe realizarse cosechas periódicas cuando ha iniciado el amarillamiento para evitar que caigan los frutos. Para exportación es recomendable empacar las uchuvas cuando están amarillas (variedad Golden) y color verde claro (variedad keniana) (Fischer, 2000).

CAPITULO 3 MODELACION Y SIMULACION

3.1 Introducción

La estructuración, formulación y aplicación de modelos de simulación de cultivos ha sido usada considerablemente en los últimos años, debido a su utilidad como herramienta en la toma de decisiones sobre el manejo apropiado del cultivo, tanto en horticultura como en otras áreas de producción de plantas. La principal razón de este auge ha sido la versatilidad de la técnica de modelación y simulación (Gary *et al.*, 1998). La mayoría de desarrollos realizados en modelación han sido encaminados a la validación de modelos que simulen adecuadamente los procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas.

La modelación consiste en simplificar al máximo posible la situación bajo estudio, ningún modelo resuelve todas las situaciones, y el diseño y grado de detalle depende de la aplicación que se le quiera dar y de la información con la que se cuente (Monteith, 1996; Passioura, 1996).

Un modelo es una representación (matemática) de un sistema y la modelación es el proceso para desarrollar dicha representación; para que un modelo opere y produzca una imitación del mundo real es necesario que se de el proceso de simulación (Goudriaan y van Laar, 1994).

Los modelos son herramientas para probar hipótesis, sintetizar el conocimiento, describir, entender sistemas complejos y comparar diferentes escenarios; se usan como soporte de decisiones en sistemas, control climático de invernaderos, predicción y planeación de producción (Lentz, 1988; Marcelis *et al.*, 1998)

Autores como Jones *et al.* (1997) y Penning de Vries y Spitters (1991), consideran que la simulación de la producción de un cultivo puede definirse como el desarrollo y la utilización de modelos del cultivo para calcular su crecimiento, desarrollo y producción.

Muchos autores han clasificado los modelos; Penning de Vries *et al.* (1989), clasifican los modelos en descriptivos o explicativos. Aquellos que usan regresiones y reflejan poco o nada los mecanismos que causan el comportamiento del sistema son modelos descriptivos, estadísticos o empíricos, mientras que los explicativos consisten en una descripción cuantitativa de esos mecanismos y procesos. Así mismo, France y Torney (1984), hacen una clasificación de los modelos en empíricos cuando sirven para describir, mecanísticos si se describen con cierto grado de comprensión, estáticos aquellos que no tienen en cuenta el tiempo y dinámicos aquellos en los cuales esta variable es explícita. Los modelos determinísticos predicen cantidades sin asociarle ninguna distribución probabilística, en cambio, los modelos estocásticos, que contienen elementos de azar, contemplan una distribución de probabilidad al hacer la estimación.

La modelación de producción y rendimiento de biomasa ha sido aplicada por varios autores. Modelos descriptivos y explicativos de producción de biomasa en cultivos hortícolas, fueron revisados por Marcelis *et al.* (1998), donde concluyen que el enfoque

más apropiado para modelar y simular cultivos depende del tipo de cultivo y del objetivo del modelo.

Los modelos suelen presentarse en la literatura como científicos, así mismo como herramientas, esto no quiere decir que ambos enfoques puedan usarse de igual forma para ambos propósitos, el objetivo del modelo debe ser explícito. Los modelos ofrecen un marco conceptual para la organización de la investigación.

El proceso de construcción de un modelo es análogo a trabajar con un rompecabezas, las piezas faltantes se pueden identificar, varias personas o grupos pueden unir sus diferentes conocimientos y capacidades en un proyecto cooperativo, y diferentes niveles de organización se pueden considerar (Gary *et al.*, 1998).

El objetivo de este capítulo, es presentar una revisión breve de aplicación y avances de modelos y simulación desarrollados en el campo agrícola.

3.2 Dinámica y análisis de sistemas

Un sistema puede ser definido como un conjunto limitado de objetos y las interacciones que se presentan entre ellos. Un modelo no es más que la descripción de un sistema y generalmente se emplea modelos conceptuales para construcción. Un modelo matemático, con fines científicos o de administración tiene como objetivo cuantificar las relaciones e interacciones que se presentan al interior de un sistema, este tipo de modelos usualmente se presentan como un conjunto de ecuaciones en la forma de un programa de computador (Keen y Spain, 1992).

La dinámica de sistemas es una metodología para la construcción de modelos, con la cual se establecen técnicas que permiten expresar las interacciones elementales que se producen al interior de los modelos (Thorney y Johnson, 1990). Su desarrollo, establece técnicas que permiten expresar modelos de sistemas, en los cuales se desconoce, en gran medida las leyes que rigen las interacciones elementales que se producen; sin embargo, hay que constatar que toda organización presente un comportamiento dinámico y una fuerte interacción entre sus partes (Aracil, 1978; Kunsch, P.L 2003 y Tinker 1998).

El análisis de sistemas es uno de los métodos que contribuye considerablemente a la comprensión de los conceptos básicos, al mismo tiempo organiza este conocimiento dentro de un marco dinámico y cuantitativo. Esta metodología constituye la herramienta de apoyo para la integración del conocimiento adquirido. Esta herramienta incluye los modelos de simulación del crecimiento de las plantas y de los procesos del suelo, los modelos de sistemas sociales y económicos, los sistemas de información geográfica (SIG), y los sistemas de manejo de bases de datos

3.3 Modelos de simulación

En un modelo de simulación de un cultivo, bien fundamentado, es posible conocer el comportamiento del cultivo ante variaciones ambientales y prácticas culturales, como respuesta a valores totales diarios u horarios de radiación solar, temperatura, lluvia o riego, también como reacciona a los manejos culturales como fertilización y densidad de siembra, entre otros.

Dependiendo del objetivo, la estructura y complejidad del modelo, se obtienen diferentes tipos de salidas y usos. Acerca del cultivo se puede obtener información sobre fenología, peso seco de diferentes órganos de la planta, contenidos de nitrógeno en cada órgano, entre otros (Jones y Ritchie, 1990).

Para simular un sistema de producción agrícola Jones *et al.* (1987) sugieren el siguiente procedimiento:

- Establecer un objetivo claro, definiendo el problema y la información que se pretende obtener con la simulación.
- Definir las componentes del sistema, sus límites, las entradas y salidas.
- Efectuar una revisión amplia de la información disponible.
- Desarrollo del modelo utilizando diagramas que represente las componentes del sistema y sus interrelaciones.
- Implantación en computador.
- Verificación, calibración y validación del modelo, verificación consiste en evaluar la precisión con que los códigos del computo representan el modelo; calibración se refiere a la estimación de parámetros y la validación es el proceso de comparar los resultados de la simulación con datos del sistema real que no han sido utilizados previamente en la calibración o en cualquier proceso incluido en el modelo.
- Análisis de sensibilidad, identifica los parámetros que mayor peso tienen en el modelo y verifica que tanto cambia una salida al variar el parámetro.
- Aplicación del modelo.

La simulación no es más que una realización de un modelo, en donde los parámetros se han estimado adecuadamente y se ha usado un método de integración, de tal forma que se puedan predecir las variables de interés óptimamente en función de variables exógenas.

La simulación se ha usado para determinar la sensibilidad de los parámetros del mismo modelo y para predecir respuestas a cambios en las condiciones ambientales de entrada o diferentes escenarios. Para llevar a cabo la modelación y la simulación es indispensable el uso del computador y de cualquier software susceptible de programar sencillamente y al alcance de los potenciales usuarios del modelo.

3.4 Aplicación de modelos de simulación

La aplicación de modelos de simulación en problemas ambientales y agrícolas, ha ido aumentando en las últimas décadas. Modelos para simulación del desarrollo (fenología) y crecimiento de los cultivos, se han desarrollado desde la década de los 70. Su complejidad depende del grado de detalle que se desea al desarrollar el modelo y la calidad del modelo esta básicamente determinada por la cantidad y calidad de los datos de entrada. Un modelo simple (con pocas variables) puede aportar mayor y mejor calidad de información que uno complejo (con muchas variables).

Los modelos además de simular el comportamiento del cultivo (con poco error entre los valores estimados y observados) bajo diversos ambientes y condiciones (genotipos, variaciones de clima, disponibilidad de agua, nutrientes, entre otros), tienen varias aplicaciones actuales y potenciales en respuesta a temas relacionados con investigación (predicción de eventos fenológicos, interacciones genético-fisiológico-ambientales y de rendimiento), manejo de cultivos, educación, y planificación de prácticas culturales (época y distancia de siembra, variedades, fertilización, uso del agua, nutrientes entre otros) durante el cultivo, como en cultivos futuros (Boote *et al.*, 1994,1996; Boote *et al.*, 2001; Gary *et al.*, 1998; Forjan, 2002).

Otros modelos computacionales del sistema suelo-cultivo-atmósfera contribuyen en la profundización del entendimiento de los procesos que determinan la respuesta de un cultivo y mejoran la habilidad para predecir el desempeño de un cultivo en diferentes áreas, bajo diferentes situaciones de manejo o de clima (Bowen y Jaramillo, 1998).

La ventaja de los modelos, es que reducen el tiempo y los recursos humanos requeridos para los análisis complejos, como los que involucran los recursos naturales, el ambiente y la producción de cultivos.

3.5 Modelación en horticultura

Durante los últimos años la horticultura también ha tenido su desarrollo en el campo de la modelación. El progreso de la modelación de cultivos en este campo probablemente tiene menos desarrollo en sistemas de producción hortícolas, que en otros sistemas; sin embargo, la mayoría de los enfoques, herramientas y problemas son comunes en todos los campos de la producción de plantas.

La producción de frutas, vegetales y plantas ornamentales requiere un enfoque y uso específicos en modelación de cultivos (Gary *et al.*, 1998).

En horticultura se han desarrollado modelos en cultivos anuales, en vegetales (en diferentes tipo de fríjol, zanahoria, pepino, algunos granos, lechuga, tomate cebolla, arveja, entre otros), ornamentales (flores como rosa, tulipán, crisantemo, entre otros.), frutales (manzana, uva, cítricos, kiwi, durazno, entre otros); a pesar que existe una gran cantidad de modelos de simulación de la producción de biomasa y rendimiento, solo

pocos han sido validados y simulan parte del sistema de producción como: fotosíntesis, desarrollo, partición, no están integrados a un modelo de crecimiento.

Aunque se ha avanzado en modelación de cultivos hortícolas, es necesaria la investigación en modelos, el manejo del cultivo es diverso y existe gran cantidad de especies por modelar es necesario explorar un amplio rango de aplicaciones, que incluya pronóstico del cultivo, análisis, manejo y validación en un amplio rango de condiciones que use datos independientes.

Durante muchos años se han desarrollado y probado modelos en especies de mayor importancia económica (de acuerdo al país), pero aun hay muchas especies por modelar, esto es posible ya que una ventaja es que las características básicas de la producción de biomasa son las mismas para todas las especies y esto permite construir modelos generales.

Los grandes equipos de investigación en este campo, pertenecen a regiones en el mundo donde la industria en invernadero es económicamente importante y/o donde se han desarrollado modelos también para otros sistemas de cultivo como en Holanda, Inglaterra, Francia, Israel, Estados Unidos, Alemania, Suiza y Canadá, mas recientemente en el Sur de Europa (Portugal, España, Grecia) y en países como Brasil y Colombia.

3.6 Modelación del crecimiento y arquitectura de la planta

La modelación de la estructura de la planta y su crecimiento ha tenido cambios mayores en las últimas décadas en dos aspectos: el primero, es la investigación y conocimiento de los procesos eco fisiológicos basados en modelos en los que frecuentemente adolecen de una descripción de la topología y geometría de la planta y el segundo, la generación de plantas virtuales en 3D usando modelos morfogenéticos que simulen el desarrollo arquitectural en ambientes estables y homogéneos. Existe una tendencia a combinar estas dos propuestas, es decir, a unir la arquitectura de la planta y su funcionamiento, esta tendencia está basada sobre el reconocimiento de la estructura de la planta de modo que:

- Es el resultado conjunto de procesos fisiológicos (agua y balance de carbón, etc.) y la programación morfogenética de la planta.
- Determina el ambiente externo de los árboles los cuales regulan su funcionamiento (competencia por espacio, luz, etc.)
- Condiciones directas de procesos fisiológicos dentro de la planta (estructura hidráulica, auto sombreadamiento, localización o traslocación de fotoasimilados, etc.).

Tales modelos se pueden usar en agronomía y agroforestería para investigar los efectos local y global inmediatos o tardíos del ambiente biofísico sobre la morfogénesis y producción de la planta; para estudiar la atenuación de la luz a través del dosel y para analizar el transporte de agua y traslocación de fotoasimilados dentro de la planta; adicionalmente, se pueden usar para analizar interacciones competitivas dentro de

diferentes plantas en el mismo sitio, para calibrar técnicas de sensores remotos y visualizar grandes paisajes (Reffye *et al.*, 1998).

Otra herramienta para la construcción de modelos de arquitectura de la planta son los modelos de plantas virtuales, son modelos de computador que recrean la estructura y simulan el desarrollo de las plantas. La modelación virtual es una área interdisciplinaria que combina matemáticas, biología y técnicas graficas de computación, estos modelos se consideran cada vez más útiles para comprender relaciones complejas entre la genética, la fisiología, el desarrollo y la forma de la planta. Estos modelos permiten (a) reproducir con precisión la estructura y desarrollo de las plantas, muestra que parámetros de arquitectura (ángulos de las ramas, tasas de elongación, vigor de las ramas) afectan la apariencia de las plantas (b) simulan la fisiología e investigan el efecto de manejo (podas, técnicas de bonsái) o de diferentes condiciones externas(microclima, disponibilidad de agua, etc.) en el desarrollo de la planta (c) simulan el desarrollo de las plantas no solo aisladamente sino en su contexto ecológico. Actualmente estos modelos incluyen la genética como base en la forma de la planta. En horticultura estos modelos son potencialmente útiles, como herramienta de exploración, como indicadores para manejo de plantas ornamentales por su impacto visual, en frutales para máximo rendimiento, y educación de estudiantes que se inician en el campo hortícola. Esta metodología se basa en la teoría de sistemas de Lindemayer, que fue establecida para simular la arquitectura de plantas (Prusinkiewicz, 2004 a, b)

3.7 Modelos de producción potencial

La producción de un cultivo está determinada por el crecimiento y desarrollo, el crecimiento indica el incremento en peso, longitud o diámetro (tasa de crecimiento), mientras que el desarrollo representa el orden, la tasa de aparición y senescencia de varios órganos de la planta. El desarrollo determina la duración del periodo disponible del crecimiento (Periodo de crecimiento).

Goudrian y Van Laar (1994), clasifican la producción de acuerdo a tres categorías de los factores que influyen el crecimiento:

- Factores que determinan los rendimientos potenciales como la radiación solar, la temperatura y principalmente las propiedades fisiológicas del cultivo.
- Factores que limitan los rendimientos como el suministro o disponibilidad de agua y nutrientes.
- Factores que reducen los rendimientos como arvenses, plagas y enfermedades.

Sobre esta base se definen niveles o situaciones de producción, para estudiar los efectos de los factores determinantes y limitantes, como los de superposición con los factores que reducen los rendimientos.

El nivel de producción potencial es aquel que se logra en condiciones con suficientes nutrientes y adecuada cantidad de agua en el suelo durante todo el periodo de crecimiento

y desarrollo del cultivo, sin limitantes por arvenses y enfermedades o plagas. La tasa de crecimiento bajo estas condiciones esta determinada solamente por el estado actual del cultivo y principalmente por la radiación solar y la temperatura. La producción potencial puede modelarse basada en el crecimiento bajo condiciones óptimas y donde solamente el clima y las características del cultivo puedan ser sus limitantes. Gary (1988). Los otros niveles se caracterizan por los factores específicos limitantes.

Varias regiones del mundo o dentro del mismo país compiten por la producción de productos hortícolas. Hay una demanda de conocimiento para su producción potencial en diferentes regiones. Aunque en algunos países se han desarrollado avances en este sentido es necesario explorar mas el campo de las frutas, verduras y ornamentales. Challa y Bakker (1998) estimaron en las varias áreas del mundo la producción potencial de cosechas de tomate bajo condiciones de invernadero, donde la única limitante permitida es la radiación solar.

3.8 Algunos modelos de producción de cultivos.

Originalmente, los modelos de crecimiento se han usado como herramientas en investigación científica, enfocada y resumida dentro de la interacción de diferentes procesos fisiológicos con el ambiente. Desde los años 60's, los modelos describen varios aspectos de sistemas de producción (Verdoodt *et al.*, 2004).

Cinco de los mas grandes sistemas del mundo para modeladas de sistemas agrícolas, ordenados mas o menos por su antigüedad son: los modelos de Wageningen (Van Ittersum *et al.*, 2003), DSSAT (Jones *et al.*, 2003), APSIM (Keating *et al.*, 2003), CropSyst (Stockle *et al.*, 2003) y STICS (Brisson *et al.*, 2003) (Verdoodt *et al.*, 2004).

Dentro de los mas grandes sistemas de modelación y sistemas de cultivos se encuentran: Los modelos desarrollados en Wageningen como LINTUL, SUCROS, ORYZA, WOFOST y el INTERCOM (Van Ittersum *et al.*, 2003); El DSSAT (The Decision Support System for Agrotechnology Transfer) que es el mayor producto del IBSNAT (Internacional Benchmark Site Network for Agrotechnology Transfer), desarrollado a principios de los 80's con la colaboración de científicos de Universidad de Florida, Universidad de Georgia, Universidad de Guelph, Universidad de Hawaii, The International Center for Soil Fertility and Agricultural Development, Universidad del Estado de Iowa y otros científicos asociados a ICASA (Jones *et al.*, 2003); El APSIM (The Agricultural Production Systems Simulator) desarrollado en Australia por la Unidad de Investigación de Sistemas de Producción Agrícola (Keating *et al.*, 2003), y el CropSyst (Cropping Systems simulation model), el desarrollo de este modelo empezó en los 90's, incluye ClimGen, GIS-CropSyst, ArcCS, CropSyst Watershed (Stockle *et al.*, 2003).

El mayor logro en los modelos desarrollados en Wageningen según Van Ittersum *et al.* (2003), incluye (1) la amplia variedad de enfoques en sistemas de modelación en diferentes escalas y propósitos (2) la contribución a los sistemas cuantitativos en general y las aplicaciones en niveles jerárquicos (3) la contribución al entendimiento de los

cultivos y sistemas de producción como soporte a la formación de profesionales. El SUCROS fue desarrollado como un sistema simple y universal para modelar crecimiento de cultivos cuando hay limitación de agua (SUCROS2) Spitters *et al.*(1989). El modelo se aplica a trigo, con suficientes nutrientes y sin limitaciones de plagas, enfermedades o arvenses. Radiación y temperatura (y precipitación en SUCROS2), son los factores medioambientales más importantes y que determinan las características de crecimiento y desarrollo. El crecimiento y desarrollo del cultivo se simula basado en procesos químicos, físicos y fisiológicos (Laar, 1997) y es uno de los desarrollos más importantes de este grupo

Desde principios de los 80's, un grupo de científicos cooperantes viene desarrollando modelos de simulación de cultivos enfocados a proporcionar estimaciones realistas del comportamiento de los cultivos bajo diferentes estrategias de manejo y condiciones ambientales. Estos modelos utilizan un juego estándar de datos de acceso (inputs) y producen un juego estándar de datos de salida (outputs), aún cuando ellos describen los procesos de crecimiento de diferentes maneras; todos utilizan los mismos procedimientos para simular los procesos de suelo, agua y nitrógeno (Jones *et al.*, 1994, 1998; Bowen *et al.*, 1998; Tsuji,1998;). El DSSAT permite que los usuarios puedan: 1) acceder, organizar y almacenar datos sobre cultivos, suelos, clima y precios; 2) retraer, analizar y desplegar datos; 3) validar y calibrar modelos de crecimiento de cultivos; 4) evaluar diferentes estrategias de producción en un lugar dado o dentro de una región; y 5) analizar el riesgo asociado a la variabilidad del clima (Jones *et al.*, 1998).

El DSSAT (The Decision Support System for Agrotechnology Transfer), se ha usado en los últimos 15 años por investigadores en todo el mundo. Incorpora modelos de 16 cultivos diferentes, con software que facilita la evaluación y aplicación de los modelos en cultivos para diferentes propósitos. Durante los últimos años, la dificultad de mantener la modelación de los cultivos ha incrementado en parte debido a diferentes sistemas de computación para los diferentes cultivos, así DSSAT ha sido rediseñado y programado para facilitar la incorporación de nuevos avances científicos, aplicaciones, documentación y su mantenimiento. La base para el nuevo sistema de modelación de DSSAT (CSM), es una estructura modular en la cual componentes separados a lo largo de disciplinas científicas son estructurados para permitir un fácil reemplazo o adición de módulos, este nuevo sistema proporciona oportunidades tanto para sus creadores como para la comunidad científica, como una colaboración en investigación interdisciplinaria y aplicación del conocimiento para la resolución de problemas en diferentes campos y niveles agrícolas (Jones *et al.*, 2003).

El APSIM (The Agricultural Production Systems Simulator), es un modelo de estructura modular, desarrollado para simular procesos biofísicos en sistemas agrícolas. Los módulos incluyen un amplio rango de cultivos, pastos y árboles, procesos del suelo incluyendo balance de agua, N, P, pH del suelo, erosión entre otros. ASIMP ha sido probado en diferentes sistemas y ambientes y puede usarse en un amplio campo de aplicaciones que incluyen soporte, toma de decisiones, diseño para producción o manejo de recursos (Keating *et al.*, 2003).

CropSyst (Cropping Systems simulation model), es un modelo desarrollado para ser usado como una herramienta de estudio del efecto del clima, suelo y manejo de sistemas de producción de cultivo y su entorno. CropSyst simula el agua en el suelo y la cantidad de nitrógeno, el crecimiento y desarrollo, el rendimiento del cultivo y la producción residual y descomposición, la erosión por agua y salinidad. El desarrollo de CropSyst, comenzó en los 90's y ha evolucionado en una serie de programas que incluye simulador de cultivos (CropSyst), generador de clima (ClimGen), programas auxiliares GIS-CropSyst, ArcCS y CropSyst Watershed, y otras utilidades. Una característica del modelo es la implementación de un modelo de simulación de cultivos genérico que permite la simulación anual y multianual de cultivos y rotación de cultivos con un simple grupo de parámetros. Las simulaciones, pueden hacerse para una fracción del año o para muchos años. El modelo ha sido evaluado en muchos sitios en el mundo con información proveniente de experimentos en campo (Stockle *et al.*, 2003).

Los modelos mencionados anteriormente representan el desarrollo de esta disciplina en el campo agrícola, así mismo se encuentran modelos para un numeroso grupo de cultivos: ALSIM (alfalfa), CERES (cebada, maíz, trigo, arroz, sorgo, mijo), AUSCANE (caña de azúcar), SUN 51 (girasol), POTATOE (papa), SUBSTOR (yuca, ñame, piña) PNUTGRO (maní), BEANGRO (fríjol), WINSORG, para sorgo, GOSSYM (algodón) entre muchos otros (Whisler, 1986; Richie 1991). Algunos modelos han sido conectados con sistemas expertos y de soportes para toma de decisiones, es el caso entre otros de modelos como el GOSSYM de algodón que ha sido conectado con sistemas expertos como el COMAX (Reddy *et al.*, 1997)

La mayoría de estos sistemas son una combinación de modelos empíricos y mecanísticos Boote (1996). Dourado *et al.* (1998) en su revisión sobre los principios de modelación y simulación menciona algunos modelos desarrollados para simular el crecimiento y desarrollo de la soya hace énfasis en los parámetros de entrada y salida de algunos modelos entre los que se encuentran: (i) GLYCIM (Acock *et al.*, 1985); (ii) SOYMOD (Meyer *et al.*, 1979; 1981); (iii) SOYGRO (Jones *et al.*, 1988). El "SUR 98, es un Sistema de Análisis para la toma de decisiones" (Meira *et al.*, 1999), desarrollado en INTA Pergamino como aplicación de la rutina de estrategias productivas contenida en el modelo SOYGRO.

Como ejemplo de aplicación de modelos de simulación en países desarrollados está el SARP (Simulation and Systems Análisis for Rice Production). SARP promovió el modelo ORIZA para arroz paddy en el sur oeste de Asia. Los modelos simularon exitosamente el crecimiento del cultivo afectado por fotosíntesis del dosel, capacidad de almacenamiento y nutrición de nitrógeno. La fisiología de la planta en este y en otros modelos similares, limita su uso para simular el efecto de modificaciones morfológicas y la respuesta a varios factores de estrés. Se requiere información básica de la morfogénesis de la planta y mecanismos de retroalimentación para una simulación efectiva de la adaptación de la planta a ambientes complejos de crecimiento incluyendo cultivos intercalados como los que se encuentran en muchos países en desarrollo (Mutsaers *et al.*, 1999).

El campo hortícola con la simulación del crecimiento y desarrollo del tomate ha tenido un amplio desarrollo, entre los modelos de tomate se encuentran TOMGRO, TOMSIM, TOMSMP y TOMPOUSSE, dentro de los principales objetivos de estos modelos se encuentra su uso como una herramienta para optimizar el control de clima en invernadero (Cooman, 2002).

El TOMGRO es uno de los modelos ampliamente desarrollado (Jones *et al.*, 1989, 1991; Dayan *et al.*, 1993a; Gary *et al.*, 1996), este modelo describe el desarrollo fenológico y el incremento en materia seca de diferentes órganos de la planta desde la fecha de transplante hasta la maduración, bajo condiciones variables de temperatura, radiación solar y concentración de CO₂ en el aire. El desarrollo fenológico está determinado por propiedades genéticas y condiciones medioambientales como la temperatura del aire; la acumulación total de materia seca se basa en una descripción cuantitativa de balance de carbono incluyendo asimilación de CO₂, respiración de mantenimiento y respiración de crecimiento (Jones *et al.*, 1991). El incremento y la partición de varios órganos de la planta está regida por la fuerza vertedero, definida como la tasa de crecimiento potencial, que se logra sin limitantes de carbohidratos. El modelo es esquemático y modular, esto indica que puede adaptarse fácilmente y muchas de estas subrutinas pueden ser reemplazadas fácilmente por otras, con mejores descripciones disponibles (Dayan *et al.*, 1993b). El modelo ha sido calibrado y validado bajo diferentes condiciones de invernadero en Florida, Sur de Francia y Holanda (Cooman, 2002).

TOMSIM es otro modelo dinámico que simula en invernadero la distribución de materia seca entre las partes vegetativa y reproductiva del tomate y su distribución entre frutos individuales. Al igual que el TOMGRO, es un modelo basado en el supuesto que la distribución de materia seca es regulada por la fuerza de vertedero de órganos de la planta cuantificada por su tasa de crecimiento potencial. Existe una versión general del TOMGRO y otra más detallada, ambas versiones se han validado. Modelar la partición de materia seca basada en fuerza de vertedero es una buena opción, ya que para este trabajo mostró buen comportamiento entre los valores medidos y simulados, para las condiciones dadas; la aplicabilidad de este modelo sin embargo está limitada por el número de frutos por racimo, ya que se presentan problemas de abortos de fruto y esta parte no fue simulada (Heuvelink, 1996).

Para la aplicación de estos modelos además de un buen diseño es necesario un complemento eficiente de programas de computador que permitan su integración con un sistema de soporte de decisiones para que pueda usarse fácilmente.

De acuerdo con la revisión realizada son muchos los modelos desarrollados en el campo agrícola, a continuación se mencionan dos de los más relevantes en cuanto a desarrollo de producción potencial y en los que se basó el modelo de producción potencial de uchuva.

Kooman y Spitters (1995) presentan un modelo general de producción potencial de papa, donde se compara y analiza el comportamiento y desempeño de una serie de modelos definidos a diferente nivel de detalle, describen como se puede aprovechar la simulación a diferentes niveles de complejidad usando dos ejemplos, el primer ejemplo corresponde

a la producción potencial de papa y la acumulación de materia seca con condiciones óptimas de agua y nutrientes donde asume ausencia de arvenses, plagas y enfermedades. En este se distinguen tres procesos importantes, intercepción de luz, utilización de la luz para producción de materia seca y distribución de materia seca. Las simulaciones para el peso total así como para el peso del tubérculo, fueron similares a los datos medidos. Las desviaciones de la simulación para este nivel fueron subestimadas principalmente por el valor del uso eficiente de la luz. Se presenta una subestimación en el tallo simulado pero un buen ajuste entre el peso seco medido y simulado en otros niveles de detalle. El segundo ejemplo corresponde a la incorporación del factor estrés que limita la producción. En este caso el estrés trabajado fue sequía. Se encontró una buena respuesta del modelo con relación a los datos medidos, para el peso seco total y el peso del tubérculo, sin embargo los pesos de las hojas y el tallo fueron sobre estimados por el modelo. Se concluye que este estudio ilustra las ventajas de usar un coherente conjunto de modelos para simular el crecimiento de papa y su desarrollo de acuerdo a objetivos particulares. Se demuestra que el uso de pocos o muchos parámetros depende del grado de complejidad o detalle que se requiera modelar, y de los procesos que se requieran explicar.

Kooman y Jones (1995), describen un modelo de producción potencial para banano, presentan un análisis de sensibilidad del modelo con variables como: crecimiento inicial de la hoja, densidad de planta, tiempo de los brotes y asignación de materia seca del fruto. En este estudio se evaluó el efecto de la temperatura y la radiación y el efecto de la variación del clima durante un año y entre años en la Lima, Honduras, donde se realizó el experimento. El estudio de las características del cultivo muestra que existe un óptimo balance entre los diferentes procesos del cultivo y este balance depende de las condiciones climáticas. El estudio de los efectos del clima muestra claramente que bajo los actuales parámetros del modelo la máxima producción se obtuvo a los 28°C, esta producción en un ciclo básico de crecimiento no es muy sensible entre 24 y 30 °C, pero cuando se calcula anualmente la sensibilidad de la temperatura aumenta. La variación dentro y entre años revela diferencias hasta de 25% en producción de fruto y puede ocurrir por turnos de acuerdo a la fecha de siembra, esto resulta de diferentes condiciones de clima y de diferentes estados de crecimiento y desarrollo del cultivo. Los datos con los cuales se construyó el modelo fueron muy escasos, aunque con estos datos es posible obtener una idea de la producción de banano usando los resultados simulados básicamente para comparar diferentes localidades. Cuando el modelo se usa como predicción, este cubre un amplio rango de condiciones de clima, es una herramienta para saber que practicas de manejo deben hacerse y en que clima pueden usarse.

Los capítulos siguientes presentan los modelos fenológico y de masa seca y su distribución, para uchuva (*Physalis peruviana* L.), es el primer reporte que presenta acerca de un modelo de producción potencial.

CAPITULO 4 MODELO FENOLOGICO

4.1 FENOLOGÍA DE UCHUVA (*Physalis peruviana* L.): I. FUNCIÓN NO LINEAL PARA EL CÁLCULO DE TEMPERATURA BASE Y LA APARICIÓN DE NUDOS

4.1.1 Resumen

Se presentan los resultados de un modelo no lineal segmentado de simulación de aparición de nudos en uchuva (*Physalis peruviana* L.) especie frutícola andina que se ha venido destacando como un producto de exportación por excelencia y es, una de las frutas más promisorias para el desarrollo del altiplano Colombiano. Los datos que alimentan el modelo corresponden a experimentos desarrollados en Colombia, a campo abierto y bajo condiciones de invernadero en dos localidades con diferente clima. El modelo empírico no lineal segmentado propuesto para estimar la temperatura base hizo posible la parametrización del modelo para la aparición de nudos y su posterior uso para simulación. La temperatura base (T_b) para aparición de nudos fue de $6,29^{\circ}\text{C}$ requeridos para precisar la acumulación del tiempo térmico (TT). Durante la primera fase del modelo la tasa promedio de aparición de nudos fue $0,2$ nudos/día para las cuatro localidades, en la segunda fase disminuyó a $0,08$ nudos/día. Estos resultados indican que en la fase inicial hasta cierta acumulación de grados día, el incremento en el número de nudos es acelerado y luego disminuye su velocidad de aparición. Ocho días después del transplante, el número de nudos por planta estuvo en un rango entre $9,1$ y $12,2$ para las cuatro localidades. La floración inicial ocurrió entre 8 y 12 semanas después del transplante, donde se formó un total entre 19 y 21 nudos en el tallo. La pendiente inicial fue de $0,022$ nudos $^{\circ}\text{C}/\text{día}$ [$^{\circ}\text{C d}$ (grados día) $< 1039,5$]. La mayor cantidad de nudos se produce bajo condiciones de invernadero y su aparición fue constante en relación con el tiempo térmico.

4.1.2 Introducción

El estudio periódico de fenómenos biológicos o eventos naturales se denomina fenología. La fenología está determinada por fases que marcan la aparición, transformación o desaparición rápida de órganos vegetales; tales como la emergencia de plantas, aparición de yemas, floración y las etapas que están delimitadas por dos fases sucesivas. Torres (1995) y Schwartz (1999) mencionan que el inicio y el final de las fases y las etapas, sirven para establecer la velocidad del desarrollo de las plantas.

De acuerdo con Angulo *et al.* (2003), la velocidad de desarrollo también se puede determinar a través de la duración o el tiempo que transcurre, desde la aparición de un nudo hasta que aparece el siguiente, mediante el conteo semanal del número de nudos; en uchuva debe entenderse por nudo cada una de las desviaciones del tallo principal (hoja, tallo, y fruto).

El número de órganos en una planta cambia cuando aparecen hojas nuevas, tallos o frutos. La tasa de iniciación de nuevos nudos es una función fenológica dependiente de la temperatura e importante en el desarrollo de la planta, ya que el número de nudos que depende de dicha tasa, representa el estado de desarrollo o edad de la planta. A su vez, el desarrollo de los órganos está regulado por la tasa de aparición de nudos y por las tasas de desarrollo de hojas y frutos (Cooman, 2002). La aparición de nudos en el tallo es un componente central del incremento del índice del área foliar y su posterior intercepción de radiación y crecimiento (Robertson *et al.*, 2002).

Según Reddy y Pachepsky (2002), la tasa de aparición de nudos define la evolución de la arquitectura de algodón y su altura, propiedades importantes para el manejo del cultivo. Scholberg *et al.* (2000) y Brown y Moot (2004) reportaron que la aparición de nudos se ve influenciada por la temperatura y generalmente se relaciona con la acumulación de tiempo térmico. Así mismo, en otros estudios como algodón, alfalfa, melón, arveja y soya entre otros; Ellis *et al.* (1995), Roche *et al.* (1998); Verghis *et al.* (1999), Baker y Reddy (2001); Moot *et al.* (2001), Reddy *et al.* (2002), Brown y Moot (2004) y Setiyono *et al.* (2005), encontraron que el desarrollo fenológico además de ser influenciado por la temperatura presenta interacción con la radiación, edad de la planta, relación fuente-vertedero, así como respuesta a foto período.

Usar grados día o tiempo térmico, en lugar de días calendario para predecir nudos permite tomar decisiones apropiadas acerca del manejo del cultivo, especialmente para establecer sistemas de tutorado, manejo de podas para mejorar el rendimiento y facilitar la cosecha (Millar *et al.*, 2001).

Las predicciones en función del tiempo térmico permiten simular estados fenológicos y número de nudos, así mismo, permite predecir cuando deben llevarse a cabo prácticas de manejo del cultivo como irrigación, fertilización entre otras operaciones con el objeto de maximizar los ingresos (Viator *et al.*, 2005).

Modelos de predicción de la fenología en uva de mesa cv. Thompson y cultivares de vid para vino Cabernet Sauvignon y Chardonnay, fueron formulados por Williams *et al.*, (1985) y Ortega *et al.* (2002), como una herramienta de apoyo para el manejo integrado de plagas y enfermedades.

El objetivo de este estudio es construir un modelo sencillo para aparición de nudos con base en el tiempo térmico (TT), lo que implica, calcular la temperatura base requerida para que ocurra este proceso. Observaciones de aparición de nudos y fecha de ocurrencia de eventos como aparición del primer botón, tiempo de botón a aparición de primera flor, de primera flor a cuajamiento del fruto y de primer fruto cuajado a primer fruto maduro se tuvieron en cuenta para desarrollar el modelo fenológico de uchuva.

4.1.3 Materiales y métodos

4.1.3.1 Modelo de aparición de nudos

Como se muestra en el diagrama de Forrester (fig.(4.1)), la temperatura se considera la única variable exógena de este modelo, que se basa en el tiempo térmico, por lo que fue necesario estimar el parámetro temperatura base de aparición de nudos. Las variables de estado están representadas en dos fases, que corresponden a la aparición de nudos en cada una de ellas. Se tuvo en cuenta dos fases debido a que el comportamiento observado de nudos a través del tiempo (con días después del transplante y temperatura acumulada) mostró dos pendientes diferentes. Los flujos representan la tasa de aparición de nudos en cada fase.

4.1.3.2 Tasa de aparición de nudos

La estimación de los parámetros del modelo, necesarios para calcular la tasa de aparición de nudos, se hizo a partir de la regresión, utilizando un modelo segmentado no lineal en los parámetros en el primer segmento. Se utilizó el procedimiento NLIN y el método de optimización de Marquardt del programa estadístico SAS (2005).

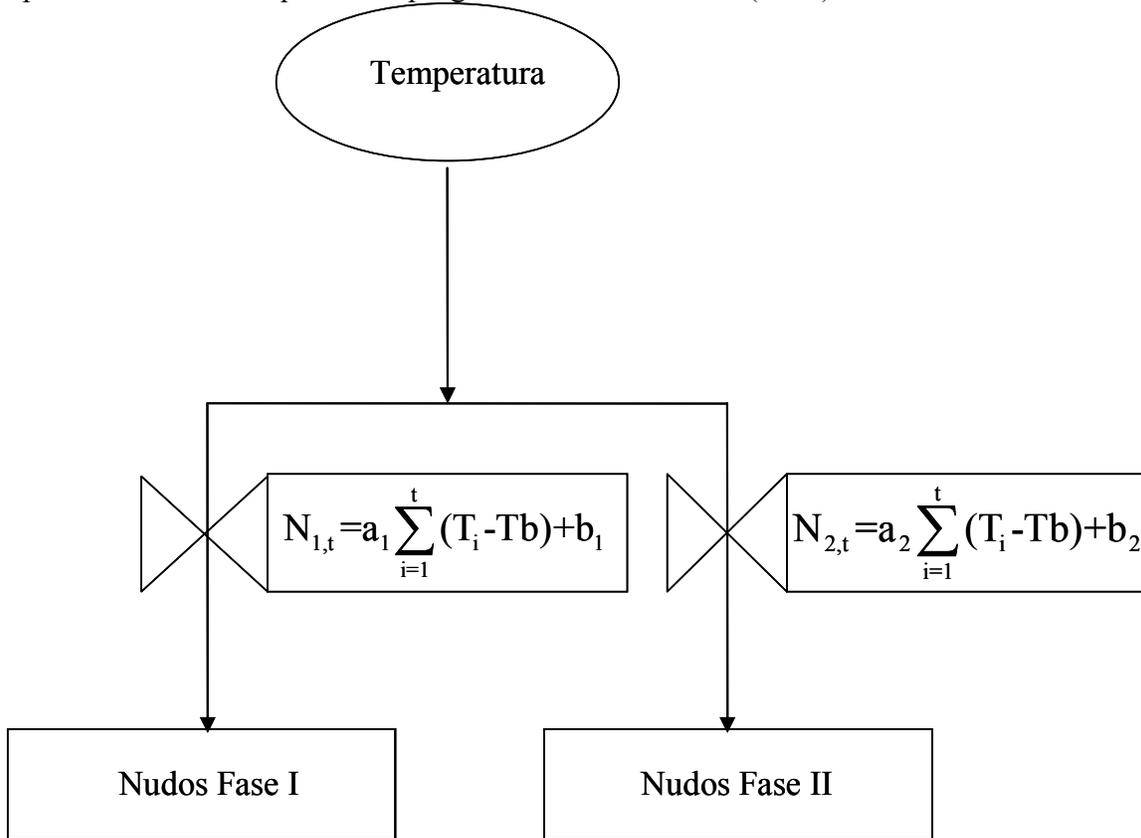


Figura 4.1 Diagrama de Forrester para el modelo de la aparición de nudos de uchuva. T es temperatura, T_b es el parámetro temperatura base (umbral mínimo de crecimiento) calculada para la aparición de nudos. a₁, a₂, b₁ y b₂ son parámetros del modelo.

La ecuación 4.1 representa la tasa de aparición de nudos de la primera fase y la ecuación 4.2 la tasa de aparición de nudos de la segunda fase.

$$N_{1,t} = a_1 \sum_{i=1}^t (T_i - T_b) + b_1 \quad (4.1)$$

$$N_{2,t} = a_2 \sum_{i=1}^t (T_i - T_b) + b_2 \quad (4.2)$$

donde: $N_{1,t}$ y $N_{2,t}$ son las tasas en cada segmento, a_1 y a_2 son parámetros que corresponden a las pendientes de cada una de las fases, b_1 y b_2 son parámetros que representan el intercepto de la primera fase, y de la segunda, $\sum (T_i - T_b)$ es el tiempo térmico acumulado, donde T_i es la temperatura media diaria y T_b es el parámetro temperatura base. El inicio de la segunda fase estuvo marcada por la cantidad de grados ($^{\circ}\text{C}$) acumulados correspondientes al cambio de pendiente.

La base de datos para construir el modelo se trabajó en EXCEL, se ubicaron las localidades una seguida de otra al igual que la temperatura y el número de nudos de cada localidad y se ajustó un sólo modelo para las cuatro localidades.

4.1.3.3 Simulación de la aparición de nudos

Para la simulación se usó el método de Euler (Thorney & Johnson, 1990; Keen & Spain, 1992; Jones & Lutten, 1998) y se trabajó el modelo segmentado de acuerdo con las dos tasas estimadas por las ecuaciones (4.1) y (4.2) de la siguiente forma:

Para la primera fase

$$\text{Nudo}_t = \text{Nudo}_{t-1} + a_1 (T_t - T_b) + b_1 \Delta t \quad (4.3)$$

Para la segunda fase

$$\text{Nudo}_t = \text{Nudo}_{t-1} + a_2 (T_t - T_b) \Delta t \quad (4.4)$$

Donde: Nudo_t es el número de nudos simulado en el tiempo t ; Nudo_{t-1} es el número de nudos simulado en el tiempo inmediatamente anterior al t y $\Delta t = 1$ período de tiempo (un día) de integración del modelo.

Para la simulación, la tasa de aparición de nudos de la segunda fase no considera el intercepto (b_2) ya que la simulación en el primer segmento incluye el intercepto del segundo.

4.1.3.4 Datos

Los datos con los cuales se construyó el modelo provienen de dos experimentos desarrollados por el Centro de Investigaciones y Asesorías Agroindustriales "CIAA" de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano en los departamentos de Boyacá (Miraflores) y Cundinamarca (Chía), bajo condiciones de invernadero y a campo abierto en ambos sitios. Las condiciones de temperatura y humedad de las localidades se encuentran en la tabla 4.1.

4.1.3.5 Material vegetal

Se transplantó un total de 260 plantas de 31 días de edad para ambas localidades y se utilizó una distancia de 2 m entre plantas y 2 m entre hileras. Para ambas localidades, tanto en invernadero como a campo abierto, se sembraron 20 camas cada una con 13 plantas (figuras 4.2a y 4.3a respectivamente) (Angulo *et al.*, 2004).

El manejo del cultivo que se describe a continuación es el reportado en el trabajo de crecimiento y desarrollo de la uchuva de donde provienen los datos desarrollado por Angulo *et al.* (2003,2004).

Tabla 4.1 Temperatura y humedad de las localidades

Localidad	Altitud (msnm)	Temperatura promedio día (°C)	Temperatura promedio noche (°C)	Humedad relativa día (%)	Humedad relativa noche (%)
CIAA invernadero	2,560	19,87	11,90	68	89
CIAA Exterior		16,25	10,71	72	91
Miraflores Invernadero	1,850	21,26	15,69	78	95
Miraflores exterior		19,98	13,97	79	98

4.1.3.6 Invernaderos

Los invernaderos utilizados en ambas localidades son los tradicionales para la zona, (Angulo *et al.*, 2004) construidos con estructura metálica, con cimientos de concreto y cerchas de madera. La cubierta fue de polietileno transparente, al igual que los laterales y la canal. La abertura de la cumbre fue de 0,45 m, y la altura de 2,5 m en la fachada frontal y posterior, y de 5,0 m en el centro del invernadero fig 4.2a. El sistema de ventilación funcionó mediante cortinas laterales en las fachadas frontales y posteriores, lo mismo que en las laterales. Las cortinas se manejaron de forma manual. Al mismo tiempo se tuvo un tubular en la apertura de la cumbre, que se llenó automáticamente por medio de un ventilador eléctrico. Los datos corresponden a un ciclo completo del cultivo y al periodo comprendido entre el año 2002 y 2003.

4.1.3.7 Tutorado

La uchuva por su arquitectura requiere de un sistema de soporte o tutorado, tradicionalmente se usa el sistema en “V”, el cual básicamente consiste en la colocación de dos repisas de madera, las cuales se entierran en el mismo hueco formando una “V”,

ubicadas en los extremos de la cama. De estas repisas se amarran cuerdas de alambre, para darle un soporte a la planta para que se mantenga erguida ya que la planta a medida que va creciendo se va desarrollando en esta forma y así se evita que se caiga o se arrastre. Cada tres plantas se colocan unos listones de 30 cm. para el primer piso, la función de estos es evitar que los alambres se cierren al colocar las pialas con las que se encajonan las plantas para evitar que ocupen el sitio de la planta vecina, quitándole luz, aireación, nutrientes y agua. El segundo piso tiene más aberturas y necesita, para evitar que los alambres se unan, unos listones de 60 cm. En el tercer piso los listones deben medir 90 cm. Este sistema se utilizó tanto para el manejo de las plantas sembradas bajo invernadero como para las a campo abierto (figuras 4.2b y 4.3b).

4.1.3.8 Podas

El objetivo de esta práctica es que las plantas formen una estructura adecuada para su manejo y producción, se realiza un despunte donde se quita la parte apical para inducir el brote de ramas.

Después de la poda de formación, la planta se manejó con seis tallos principales, los cuales generan laterales que son la parte productiva de la planta. A medida que estos tallos se cosechan, las hojas que nacen en el mismo nudo de cada fruto se eliminan, ya que pasan de ser fuente productiva a vertedero. Los chupones que aparecen en la base de la planta, también se eliminaron ya que disminuyen la calidad de los frutos, reducen el vigor a la planta, disminuyen la luminosidad, producen sombra e incrementan la humedad relativa, no permiten circulación de aire con lo que se estimula condiciones que pueden generar presencia de plagas y enfermedades y tamaño pequeño de los frutos.

En la Sabana de Bogotá las podas se hicieron aproximadamente cada 30 días, debido principalmente, al rápido crecimiento de la planta en el invernadero. En el exterior se realizó cada 40 a 45 días. En Miraflores la temperatura promedio está alrededor de 22 a 24 °C por lo tanto, se hicieron las podas cada 30 días tanto en el exterior como en invernadero. Estas podas a su vez permiten además de la aireación, una buena entrada de luz a la planta, especialmente a los frutos les permite que su capacho también pueda fotosintetizar, ayudan a que crezcan rápidamente y con buena coloración.

Para este ensayo se eligieron 30 plantas de las 260 sembradas de todo el experimento distribuidas en el centro de un bloque, tratando de mantener uniformidad de condiciones (temperatura y humedad) y eliminando el efecto borde. Estas plantas fueron numeradas para su manejo y cada tercer día se midieron las siguientes variables:

Tiempo de aparición de botón floral

Tiempo de apertura del botón floral

Tiempo de cuajamiento del fruto

Tiempo de maduración de fruto

La toma de datos de aparición de nudos se hizo desde el momento del transplante y hasta el descabece y después en una de las ramas de la planta. Para estas mediciones se

seleccionaron 20 plantas, para un total de 80 plantas en los 4 sitios de muestreo (Angulo *et al.*, 2003; 2004)

a.



b.



Figura 4.2 Disposición del cultivo sembrado bajo invernadero (a) y su sistema de soporte en “V” respectivamente (b)

a.



b.



Figura 4.3 Disposición del cultivo sembrado a campo abierto (a) y su sistema de soporte en “V” respectivamente (b).

4.1.4 Resultados y discusión

4.1.4.1 Tasa de aparición de nudos

La tasa de aparición de nudos se estimó graficando los valores de nudos formados vs tiempo térmico. Los parámetros estimados para el cálculo de la tasa de aparición de nudos (ecuaciones 4.1 y 4.2) se presentan en la tabla 4.2. La temperatura base calculada para la etapa de aparición de nudos para todas las localidades fue de 6,29 °C. Se hizo el análisis de residuos y a partir de una prueba de t, se verificó que la media de los residuos fue estadísticamente igual a cero $Pr > |t| = 1$. Se hizo la prueba de normalidad según:

Shapiro-Wilk $Pr < W 0.2617$; Kolmogorov-Smirnov $Pr > D > 0.1500$; Cramer-von Mises $Pr > W-Sq > 0.2500$ y Anderson-Darling $Pr > A-Sq > 0.2500$ con la que se comprobó que los residuos siguen la distribución normal.

En caña de azúcar Campbell *et al.* (1998) determinaron temperaturas base para aparición de nudos en dos variedades comerciales los valores fueron $7,6^{\circ}\text{C}$ y $7,8^{\circ}\text{C}$, reportan que estos valores son menores a los publicados para temperatura base de aparición de hojas en caña de azúcar.

Tabla 4.2. Parámetros estimados para el modelo de aparición de nudos.

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Limite inferior 95%	Limite superior 95%	R ²
a ₁	0,02230	0,00056	0,4513	0,96400	0,9046
b ₁	0,70270	0,12570	0,0212	0,02340	
Tb	6,29630	0,22070	5,8548	6,73770	
a ₂	0,00840	0,00044			0,7100
b ₂	15,2740	1,10080			

Durante la primera fase del modelo la tasa promedio de aparición de nudos fue 0,2 nudos/día para las cuatro localidades, en la segunda fase disminuyó a 0,08 nudos/día. Estos resultados indican que en la fase inicial hasta cierta acumulación de grados día, el crecimiento o el incremento en el número de nudos es acelerado y luego disminuye su velocidad de aparición. Ocho días después del transplante, el número de nudos por planta estuvo en un rango entre 9,1 y 12,2 para las cuatro localidades. La floración inicial ocurrió entre 8 y 12 semanas después del transplante, donde se formó un total entre 19 y 21 nudos en el tallo. La pendiente inicial fue de 0,022 nudos $^{\circ}\text{C}/\text{día}$ [$^{\circ}\text{C d}$ (grados día) $< 1039,5$]. En la tabla 4.3 se presenta el día después del transplante donde se observó la mínima y máxima tasa de aparición de nudos, de igual manera se presentan los valores de temperatura, el número de nudos presentes en el momento de alcanzar una de las dos tasas, el tiempo térmico, los días después del transplante y el tiempo (en días) que duraron las observaciones de aparición de nudos para las cuatro localidades.

Tabla 4.3 Tasa mínima¹ y máxima² de aparición de nudos, para las cuatro localidades

Localidad	Tasa (nudos/día)	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	# nudos	Tiempo térmico $^{\circ}\text{C}$	Ddtr (días)	Tiempo (días)
CIAA	0,05 ¹	12,62	42,35	3524,13	351	412
Invernadero	0,30 ²	19,36	2,90	509,42	44	
CIAA	0,03 ¹	10,48	33,74	2537,88	348	423
Exterior	0,21 ²	15,53	19,18	1000,85	145	
Miraflores	0,08 ¹	15,85	46,59	3898,23	318	365
Invernadero	0,35 ²	21,27	14,79	1064,10	84	
Miraflores	0,04 ¹	11,71	44,40	3518,07	336	350
Exterior	0,32 ²	19,92	12,73	740,41	71	

En tomate Scholberg *et al.* (2000) encontraron que la máxima tasa de desarrollo de nudos en el tallo principal fue de ≈ 0.5 nudos/día, al transplante el número de nudos de la planta estuvo entre 3,1 y 6,3, la floración inicial ocurrió ≈ 4 semanas después del transplante cuando había un total de 8-10 nudos en el tallo principal. La tasa total de nudos para tomate se calculó graficando el número de nudos formados vs. Tiempo térmico. La pendiente inicial fue de $0,027$ nudos $^{\circ}\text{C}/\text{día}$ [$^{\circ}\text{C d}$ (grados día) < 530] asumiendo una temperatura base de 10°C , y una tasa máxima de desarrollo de nudos a 28°C con $0,49$ nudos/día este valor, esta de acuerdo con el reportado por Jones (1989) de $0,5$ nudos/día para tomate en invernadero. La aparición del nudo cesa su incremento apreciablemente, después de la acumulación de 530°C y la formación de $15,7$ nudos, esto se explica ya que después de esta etapa hay formación de frutos inhibiendo el proceso de formación de nudos, en el momento del transplante ya se habían formado de 3 a 5 nudos, y el máximo número de nudos estuvo entre 19 a 21.

En Alfalfa Moot *et al.* (2001) y Brown & Moot (2004), encontraron que la aparición de nudos fue mas rápida en primavera y verano, que en invierno, así mismo trabajaron con temperatura base para la acumulación del tiempo térmico de 1°C a temperaturas de aire menores de 15°C y con temperatura base de 5°C para temperaturas de aire mayores a 15°C , la respuesta de aparición de nudos fue lineal con la acumulación del tiempo térmico, pero la tasa (phyllocron) varía en respuesta a fotoperiodo.

El desarrollo de nudos y la elongación de internudos son afectados por temperatura, según lo reportado por Reddy y Pachepsky (2002), ellos estudiaron el efecto de la temperatura en la aparición de nudos del tallo principal de algodón bajo condiciones controladas y en campo, encontraron que para temperaturas por debajo de 25°C , la tasa de aparición de nudos fue hasta un 40% mas baja y la duración de la expansión del internudo llegó hasta un 23% más en el campo que bajo condiciones controladas. Los valores de los parámetros de la tasa de aparición de nudos fueron significativamente diferentes para ambas condiciones, concluyen que esta clase de estudios son un valioso recurso que aporta información para un adecuado control y manejo del cultivo.

4.1.4.2 Simulación de aparición de nudos

El modelo empírico no lineal segmentado propuesto para estimar la temperatura base, hizo posible la parametrización del modelo para la aparición de nudos y su posterior uso para simulación. Hesketh *et al.* (1973), Yan y Hunt (1999), Yin *et al.* (1995), Kim y Reddy (2004) y Setiyono *et al.* (2005) aplicaron modelos no lineales en función de temperatura para describir y simular el comportamiento fenológico de diversos cultivos.

En soya Setiyono *et al.* (2005), utilizaron dos funciones para estimar la tasa de aparición de nudos, una en términos de temperatura, diferente al tiempo térmico y otra con el tiempo cronológico que relaciona el decrecimiento de la tasa de aparición de nudos. La simulación con ambas funciones ajustaron satisfactoriamente, de la misma forma (Hesketh *et al.*, 1973), menciona que el desarrollo vegetativo es muy sensible a la

temperatura y en su trabajo presenta una relación lineal entre tasa de formación de nudos y la temperatura.

Yan y Hunt, (1999), simularon la tasa relativa de crecimiento, en función de las temperaturas mínima, máxima, óptima y la tasa de desarrollo para determinar la fenología, adaptación y rendimiento de maíz, frijol, sorgo, trigo entre otros, el modelo aplicado describió bien la fenología de los cultivos mencionados anteriormente. Kim y Reddy (2004) desarrollaron un modelo de simulación simple para maíz en el cual usaron la función beta, aplicada en otros modelos por Yin *et al.*, (1995), donde la tasa de crecimiento se expresó en términos de temperatura media del aire, como variable de entrada, temperatura optima a la cual se obtiene la máxima tasa de desarrollo y la temperatura a la cual el desarrollo cesa, asumieron como temperatura base o mínima el valor de cero, las predicciones del modelo fueron buenas comparadas con otros experimentos independientes.

En uchuva las ecuaciones resultantes con las que se simuló la aparición de nudos para la primera y segunda fase, aplicando el método de Euler, fueron respectivamente:

$$\text{Nudo}_t = \text{nudo}_{t-1} + 0,0223 \sum (T - 6,2963) + 0,7027 \quad (4.3)$$

$$\text{Nudo}_t = \text{nudo}_{t-1} + 0,0145 \sum (T - 6,2963) \quad (4.4)$$

Las figuras 4.4 y 4.5 presentan el número de nudos simulados y observados en función de días después del transplante y tiempo térmico respectivamente, para los datos en general y para las localidades a campo abierto y bajo condiciones de invernadero.

Los valores simulados para la primera fase ajustan con mayor precisión que los de la segunda fase, debido a que la aparición de nudos se da homogéneamente para las cuatro localidades durante esta fase, este segmento del modelo corresponde en gran parte a la etapa vegetativa al final del primer segmento se han acumulado cerca de 1039,5 (°C) grados día .

En la segunda fase, la etapa reproductiva esta presente, hay recolección de frutos y todos los estados fenológicos están presentes en la planta, debido a lo anterior, se presenta mayor variabilidad ya que la duración de los estados fenológicos no es la misma en las cuatro localidades.

Uno de los más importantes hallazgos en la primera fase es la consistencia de la información entre todas las localidades cuando se usa el tiempo térmico, esto indica que la respuesta de la aparición de nudos es lineal cuando se relaciona con la temperatura. La variabilidad presentada después de la fase I es mayor entre localidades. La razón es desconocida, sin embargo, una de las causas puede ser la diferencia en las tasas de crecimiento del fruto (fuerza-vertedero) y la presencia en esta fase de todos los estados de desarrollo en la planta.

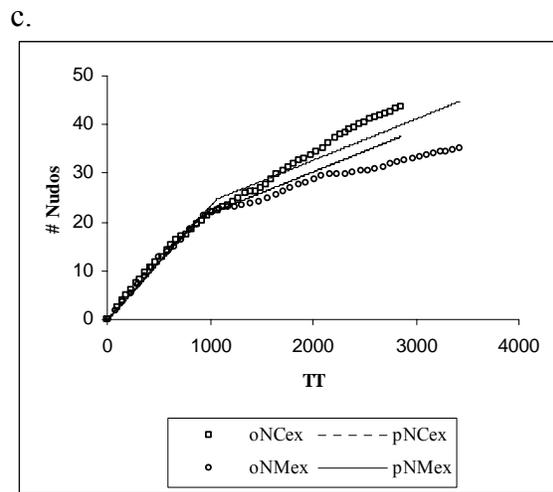
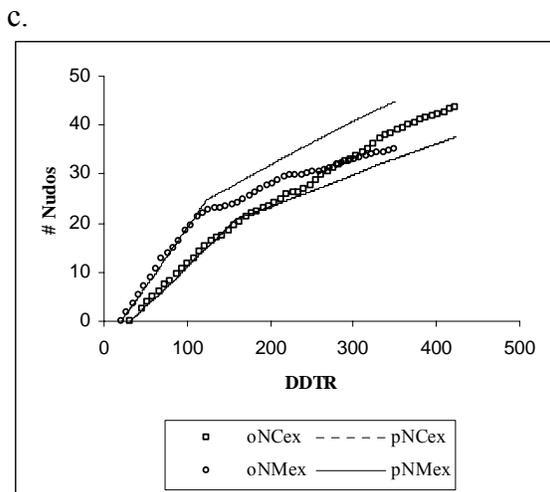
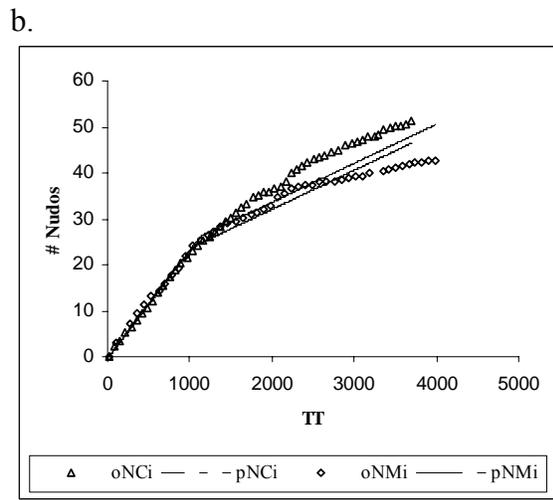
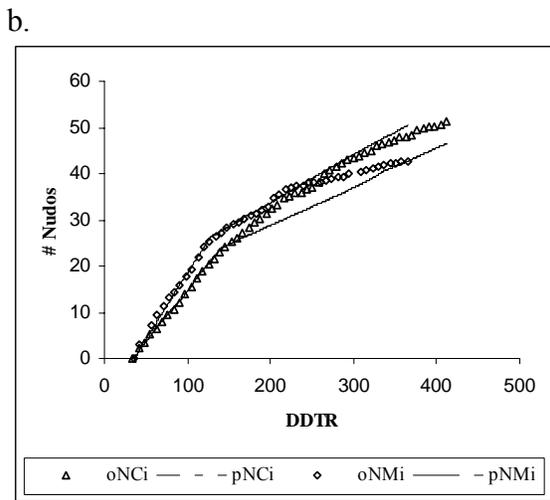
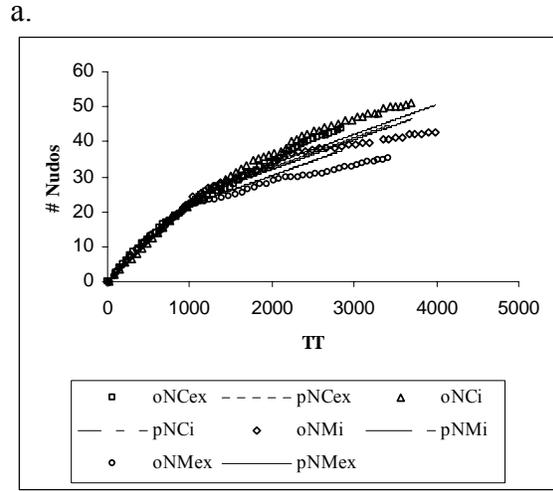
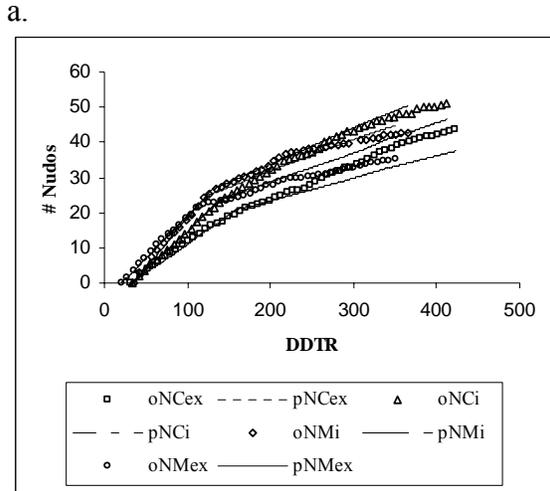


Figura 4.4 Aparición de nudos en función de días después del trasplante (DDTR-días) oNCex, oNMex, oNCi y oNMi son los nudos observados y pNCex, pNMex, pNCi, pNMi son los nudos estimados para Chía y Miraflores a campo abierto y dentro del invernadero respectivamente.

Figura 4.5 Aparición de nudos en función de tiempo térmico (TT-°C). oNCex, oNMex, oNCi y oNMi son los nudos observados y pNCex, pNMex, pNCi, pNMi son los nudos estimados para Chía y Miraflores a campo abierto y dentro del invernadero respectivamente.

4.1.5 Conclusiones

Se observó una relación no lineal en función del tiempo térmico acumulado para la aparición de nudos en uchuva, dentro del primer ciclo del cultivo.

Un modelo empírico no lineal segmentado propuesto para estimar la temperatura base hizo posible el establecimiento del modelo para la aparición de nudos y su posterior simulación. La simulación se realizó con el método Euler y se trabajó con base en el tiempo térmico utilizando la temperatura base estimada

La temperatura base (T_b) estimada para aparición de nudos fue de $6,29^{\circ}\text{C}$.

La mayor cantidad de nudos se produjo bajo condiciones de invernadero y su aparición fue constante en relación con el tiempo térmico.

4.2 FENOLOGÍA DE UCHUVA (*Physalis peruviana* L.): II. FASES FENOLOGICAS DE DESARROLLO

4.2.1 Resumen

Las plantas tienen diferentes órganos y su número cambia de una edad a otra, en la medida en que aparecen nuevos nudos, hojas, tallos (etapa vegetativa), flores y frutos (etapa reproductiva). Debido a esto el desarrollo fisiológico también cambia. Se estimó la temperatura base para aparición del primer botón floral (T_{b_b}), de primer botón a primera flor ($T_{b_{bf}}$), de primera flor a primer fruto (cuajado) ($T_{b_{ff}}$), de primer fruto a primer fruto maduro ($T_{b_{fm}}$), así mismo se determinó la duración de estas fases en términos de tiempo térmico (TT).

Se encontró que para la aparición del primer botón floral T_{b_b} fue de 10.83°C , de botón a flor ($T_{b_{bf}}$) 5.61°C de flor a fruto ($T_{b_{ff}}$) 10.20°C y para la fase entre la aparición del primer fruto a maduro ($T_{b_{fm}}$) la temperatura base fue 1.89°C , se presenta el tiempo térmico requerido para alcanzar cada una de las fases anteriormente mencionadas.

4.2.2 Introducción

En cultivos anuales se considera como fase vegetativa el tiempo transcurrido desde la germinación hasta que ocurre la primera floración. La uchuva es una especie perenne, la definición de la fase vegetativa es compleja ya que tanto el crecimiento vegetativo, como la formación de nudos y hojas se presenta durante toda la vida de la planta, simultáneamente con el crecimiento reproductivo (Fischer, 2000).

La planta de uchuva presenta un crecimiento indeterminado, el meristemo terminal permanece vegetativo durante todo el ciclo de desarrollo. Después del comienzo de la floración, el crecimiento vegetativo (hojas, ramas, tallos) y reproductivo (flores y frutos) tiene lugar al mismo tiempo y la planta no entra en receso (Fischer, 2000).

Los criterios usados para la descripción de las fases de crecimiento varían entre los cultivos y son dependientes de las características del crecimiento de las plantas (Charles, 1982). Las descripciones de las fases de desarrollo se utilizan ampliamente para programar una extensa gama de prácticas culturales como riego, fertilización, podas, programación de cosecha y caracterización de germoplasma en diferentes condiciones ambientales como lo consideran Boote (1982) y Ellis *et al.* (1995). Al igual, Mullins *et al.* (1992) en su estudio sobre la biología del vino, sugieren que, el conocimiento de los diversos estados fenológicos del viñedo y su identificación son importantes en las prácticas culturales y control de insectos y patógenos.

Para la mayoría de los cultivos de importancia comercial, como soya (Fehr y Caviness, 1981), girasol (Schneiter y Miller, 1981), algodón (Elsner *et al.*, 1979), maíz (Hanway,

1963), sorgo (Vanderlip y Reeves, 1972), trigo (Waldren y Flowerday, 1979 y Haun, 1973) entre otros, se han definido las fases de desarrollo. Así mismo, se han desarrollado modelos agroclimáticos que relacionan las distintas fases fenológicas con el tiempo térmico o tiempo fisiológico de la planta.

De este modo, algunos autores han calculado los requerimientos de acumulación térmica teniendo en cuenta el umbral mínimo de crecimiento o temperatura base necesaria para alcanzar los distintos estados fenológicos de cultivos como vid, cebada, avena, trigo, canola, mostaza, arveja, lenteja, girasol, pastos entre otros (Miller *et al.*, 2001; Ortega *et al.*, 2002; Mullahey *et al.*, 1990, 1991; Sanderson y Wolf, 1995).

El objetivo de este trabajo fue estimar el tiempo térmico requerido para alcanzar cada una de las diferentes fases fenológicas y la temperatura base para cada una de ellas.

4.2.3 Materiales y métodos

4.2.3.1 Datos

Los datos que se usaron para el cálculo del tiempo fisiológico y temperatura base para cada etapa de desarrollo provienen de dos experimentos desarrollados por el Centro de Investigaciones y Asesorías Agroindustriales “CIAA” de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano en los departamentos de Boyacá (Miraflores) y Cundinamarca (Chía), bajo condiciones de invernadero y a campo abierto en ambos sitios. Las condiciones de temperatura y humedad de las localidades se encuentran en tabla 4.4.

Tabla 4.4. Temperatura y humedad de las localidades.

Localidad	Altitud (msnm)	Temperatura promedio día	Temperatura promedio noche (°C)	Humedad relativa día (%)	Humedad relativa noche (%)
CIAA invernadero	2.560	19,87	11,90	68	89
CIAA Exterior Miraflores		16,25	10,71	72	91
Invernadero Miraflores	1.850	21,26	15,69	78	95
exterior		19,98	13,97	79	98

4.2.3.2 Material vegetal

Se transplantó un total de 260 plantas de 31 días de edad para ambas localidades y se utilizó una distancia de 2 m entre plantas y 2 m entre hileras. Para ambas localidades,

tanto en invernadero como a campo abierto, se sembraron 20 camas cada una con 13 plantas (Angulo *et al.*, 2004).

El manejo del cultivo que se describe a continuación es el reportado en el trabajo de crecimiento y desarrollo de la uchuva de donde provienen los datos desarrollado por Angulo *et al.* (2003, 2004).

Para este ensayo se eligieron 30 plantas distribuidas en el centro de un bloque, tratando de mantener la uniformidad de condiciones (temperatura y humedad) y eliminando el efecto borde. Estas plantas se marcaron y se hizo observaciones cada tercer día acerca de las siguientes variables:

- ✓ Aparición de botón floral
- ✓ Apertura del botón floral
- ✓ Cuajamiento del fruto
- ✓ Maduración de fruto

Los datos se tomaron después del descabece entre el 7° y 8° nudo y a partir del tercer botón ya que los primeros dos se eliminan para promover el crecimiento de la planta y evitar el rajado de estos frutos (Fischer, 2005), estas mediciones se hicieron en una de las 6 ramas que se dejaron para este propósito. Se tuvo en cuenta las fechas de aparición de botón, apertura floral, formación de fruto y maduración.

4.2.3.3 Metodología para estimación de Tb.

Para calcular el tiempo térmico (TT) es necesario conocer el acumulado de temperatura, el número de días que transcurre para cada etapa y la temperatura base que Sitte *et al.*, (1999), define como la temperatura por debajo de la cual las plantas detienen sus procesos metabólicos.

La expresión para el cálculo del tiempo térmico es la siguiente:

$\sum (T - T_b) = TT$, TT es a su vez igual a $\sum T - nT_b$, donde: $\sum T$ es el acumulado de temperatura para una etapa determinada y n es el número de días transcurridos para la misma etapa, T_b es la temperatura base.

Para la estimación de T_b de los diferentes estados fenológicos se usó la expresión anterior y se asumieron valores para T_b entre 1°C y 13 °C, para cada estado de desarrollo, en manzana Bourgeois *et al.* (2003) para estimación de temperaturas base en diferentes estados fenológicos de manzana asumieron valores entre 0,0 a 15,0°C usando intervalos de 0,1°C.

Los estados para los cuales se determinó la temperatura base fueron:

- Aparición del primer botón (T_{b_b}),
- Botón a primera flor ($T_{b_{bf}}$),
- Primera flor a cuajamiento del fruto ($T_{b_{ff}}$),

Cuajamiento del fruto hasta la aparición del primer fruto maduro (Tb_{fm}).

Para estos estados se tenía la fecha de aparición y con esta se hizo el cálculo de días para la duración de cada evento.

La temperatura base de los estados fenológicos se determinó minimizando la varianza del tiempo térmico de las cuatro localidades para los valores asignados de Tb . El proceso de minimización se hace analíticamente a partir del ajuste de una ecuación cuadrática de las varianzas observadas, con el objeto de derivar la Tb que hace mínima la varianza, así mismo, se puede calcular a través de un proceso no lineal, que por medio de iteraciones de Tb , se encuentra el mínimo valor de la varianza usando la herramienta SOLVER del programa EXCEL (2005). Después de calcular la temperatura base para cada estado se calculó el TT requerido para cada etapa.

4.2.3.4 Cálculo del tiempo térmico

Las tasas de iniciación de nuevos órganos se determinan por la temperatura, se estima el tiempo fisiológico de aparición del primer botón, entre el primer botón y la primera flor, entre la primera flor y el primer fruto cuajado, entre el primer fruto cuajado y primer fruto maduro. La temperatura se considera la única variable exógena, las tasas de aparición dependen del tiempo térmico, el cual depende del parámetro temperatura base que es necesario estimar para cada una de las fases anteriormente mencionadas.

4.2.4 Resultados y discusión

4.2.4.1 Estimación de Tb

El desarrollo fenológico es un componente importante en la simulación y modelación, como un determinante de la duración (maduración) del cultivo (Stapper, 2001).

Autores como Mullahey *et al.* (1990, 1991); Sanderson y Wolf (1995 a,b) establecieron relaciones entre grados día y tasa de desarrollo morfológico para programar el manejo de pastos. Los grados día también se han usado para estudiar los cambios fenológicos en diferentes condiciones climáticas (Madakadze *et al.*, 2003), los modelos fenológicos dependen de la determinación de una temperatura mínima o temperatura base, para una fase de crecimiento en particular. Sin embargo, en diferentes cultivares y para diferentes estados de desarrollo se ha utilizado un mismo valor de temperatura base con pequeñas variaciones. Para uchuva se determinó la temperatura base de los diferentes estados fenológicos de la planta y la cantidad de grados día para alcanzar cada una de ellas.

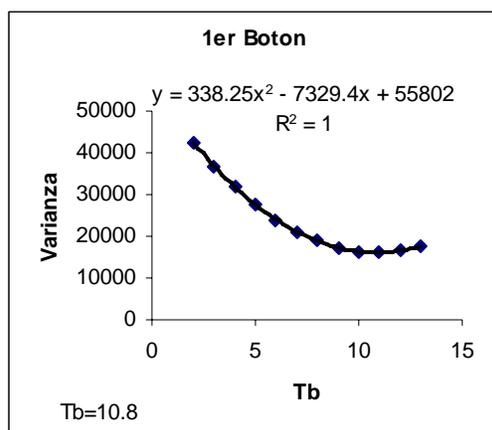
En la tabla 4.5 se presentan los valores calculados de Tb para cada etapa de desarrollo, con ambos métodos trabajados (analítico y no lineal) se encontró el mismo valor para Tb .

Tabla 4.5 Valores calculados de Tb para cada etapa de desarrollo, con ambos métodos trabajados (analítico y no lineal) se encontró el mismo valor para Tb.

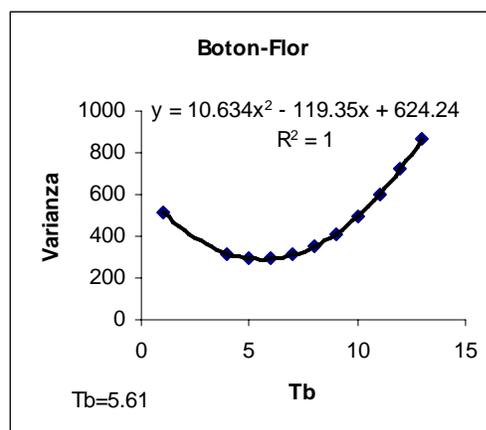
Etapa de desarrollo	Tb (°C)
Aparición del primer botón	10,83
Tiempo entre el primer botón y la primera flor	5,61
Tiempo entre la primera flor y primer fruto cuajado	10,20
Tiempo entre el primer fruto cuajado y primer fruto maduro	1,89

La ecuación de regresión y el ajuste para la determinación de la temperatura base para cada una de las fases fenológicas de uchuva se presenta en la figura 4.6.

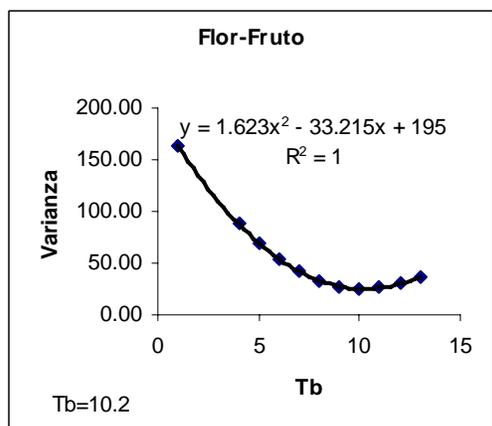
a.



b.



c.



d.

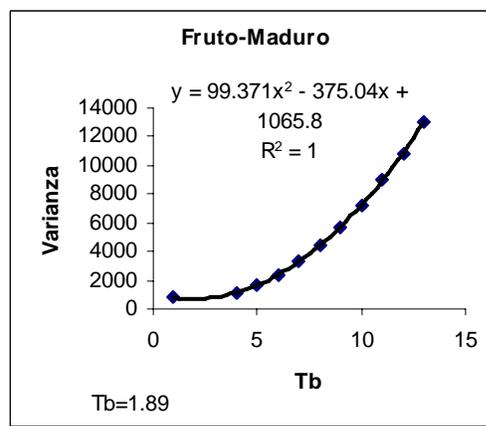


Figura 4.6 Ecuación de regresión y ajuste para la determinación de la temperatura base (Tb) para la aparición de primer botón floral (a), de primer botón floral a primera flor (b), primera flor a primer fruto cuajado (c), de primer fruto cuajado a primer fruto maduro (d), respectivamente.

Para cada estado fenológico se determinó la varianza mínima correspondiente a las temperaturas base T_b (10,83; 5,61; 10,20 y 1,89). A partir de las ecuaciones ajustadas para determinar la temperatura base en cada estado fenológico (figura 4.6), se calculó la varianza para el valor $T_b=6,29$ con el objeto de compararla con la varianza mínima encontrada. A partir de una prueba de F se probó la hipótesis de igualdad de varianzas, de manera que si las varianzas son estadísticamente iguales el valor de $T_b=6,29$ se puede usar para cualquier estado fenológico. De acuerdo con las pruebas (tabla 4.6), no se presentaron diferencias significativas entre las varianzas comparadas lo que sugiere que puede usarse $6,29\text{ }^{\circ}\text{C}$ como temperatura base en cualquier estado de desarrollo, sin embargo y de acuerdo con estudios realizados previamente por autores como Angus *et al.* (1981); Slafer y Savin, (1991); Madakadze *et al.* (2003) entre otros, el conocimiento del valor de T_b para cada una de las etapas fenológicas permite un mejor manejo y control del cultivo.

Tabla 4.6. Valores de la prueba de F de varianzas entre diferentes estados fenológicos

Etapa de desarrollo	Varianza de T_b		Prueba de F	P>F
	Nudos	Etapas		
Aparición del primer botón	23032,65	16097,66	1,43	0,38
Tiempo entre el primer botón y la primera flor	294,24	289,35	1,01	0,49
Tiempo entre la primera flor y primer fruto cuajado	50,29	25,06	2,00	0,29
Tiempo entre el primer fruto cuajado y primer fruto maduro	5622,36	1608,57	3,50	0,17

Para trigo se ha reportado que los valores de T_b varían dependiendo de la edad de la planta (Angus *et al.*, 1981) y del estado fenológico (Slafer y Savin, 1991); en pasto Madakadze *et al.* (2003) encontró temperaturas base entre $2,6-7,3^{\circ}\text{C}$ para plantas de semillero.

Bignami *et al.*, (1999) estimó la temperatura base para dos cultivares de olivo para la fase de botón a aparición de la flor, los valores obtenidos fueron $3,5^{\circ}\text{C}$ y $4,9^{\circ}\text{C}$. Las temperaturas base estimadas fueron utilizadas para calcular la adición del calor para florecer y el tiempo en el cual la acumulación del calor comenzó comparada con temperaturas de 7°C y $12,5^{\circ}\text{C}$. El coeficiente de variación observado para los cálculos de temperatura base fue bajo.

En trigo Stapper (2001), estudio durante 18 siembras en 4 años, 11 genotipos de trigo, en dos localidades a una latitud similar pero con una diferencia de 3°C en promedio diario de temperatura, las diferencias encontradas en tiempo térmico desde la emergencia a la antesis, y desde la aparición de la hoja bandera a la antesis fueron considerables durante las siembras y entre genotipos, sin embargo y a pesar de las variaciones en ambas localidades ocurrió un promedio de 0,75 tiempo térmico requerido para el estado de emergencia a la antes y la emergencia de la espiga ocurrió a 0,46 tiempo térmico, como

temperatura base se obtuvo 2°C , concluyen que las variaciones fueron causadas por el genotipo, el fotoperíodo, y que la sensibilidad dependió de la temperatura y el estado de desarrollo de la planta.

En estados tempranos de crecimiento de zanahoria se han aplicado temperaturas base bajas Brewster and Sutherland (1993) obtuvieron un T_b de $1,0^{\circ}\text{C}$ para el crecimiento de semillas de zanahoria; en el modelo de crecimiento de Benjamin and Aikman (1995), reportaron una T_b de $1,3^{\circ}\text{C}$ para zanahoria y col blanca para la germinación de semillas. (Wagenvoort y Bierhuizen 1977), y Benjamin y Aikman (1995) asumieron que estos valores podrían asumirse en todo el desarrollo.

Como se observó anteriormente para muchos cultivos han establecido valores de temperatura base, no solo para el cultivo sino para las etapas fenológicas del desarrollo, este es un parámetro importante a tener en cuenta en modelos de simulación del crecimiento y desarrollo, en uchuva estos valores no han sido reportados previamente, lo que permite con este trabajo tener un mejor conocimiento del cultivo y hacer un mejor manejo del mismo.

4.2.4.2 Duración fases fenológicas

Los estados de desarrollo y la duración de los mismos, se determinan por el efecto de factores, climáticos, genéticos, de fertilidad del suelo, prácticas culturales, entre otros. El desarrollo de las plantas depende en gran medida de la temperatura, las plantas requieren una cantidad específica de calor para desarrollarse desde un estado de desarrollo a otro. Por ejemplo desde la aparición del primer botón floral hasta el cuajamiento del fruto o la maduración del mismo, la cantidad de calor acumulada es diferente. La figura 4.7 muestra estados fenológicos para el cultivo de la uchuva.

a.



b.



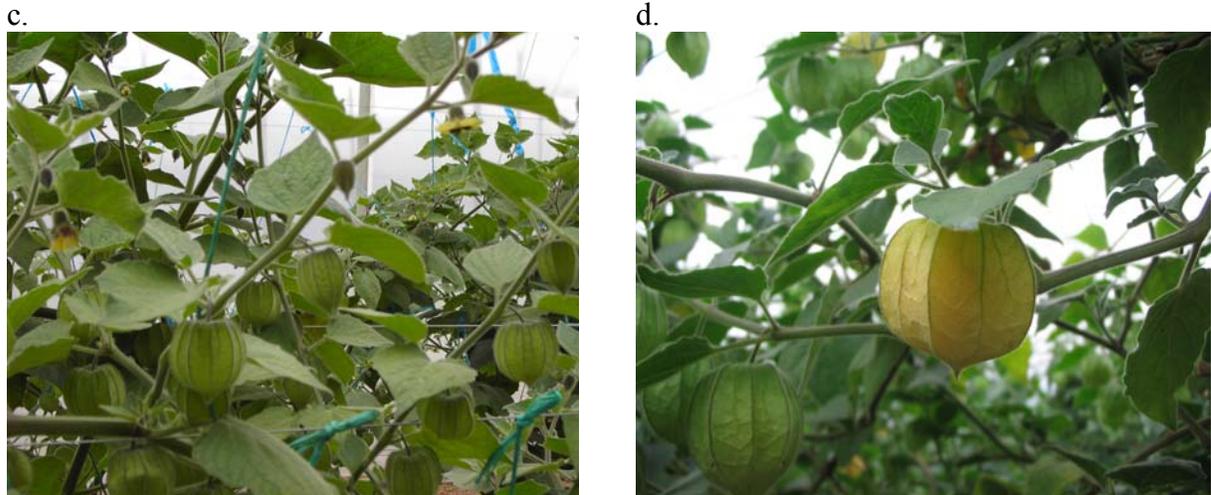


Figura 4.7 Aparición del primer botón (a), primer botón primera flor (b), flor a fruto (c), fruto a fruto maduro (d)

Usualmente se utiliza el calendario para predecir el desarrollo de la planta y así tomar decisiones para su manejo, sin embargo los calendarios pueden ser inapropiados, especialmente para estados tempranos de desarrollo de los cultivos si estos se ven afectados por condiciones de clima adversas, como por ejemplo dos semanas de mucho calor o frío pueden acelerar o retrasar un proceso de desarrollo en plantas.

Investigaciones han demostrado que las medidas de calor acumulado a través del tiempo proporcionan estimaciones más precisas de procesos fisiológicos que contar días calendario (Miller *et al.*, 2001). La sincronización de prácticas de manejo como control de arvenses, plagas, aplicaciones de abonos, usualmente se determina de acuerdo al estado de desarrollo. Se ha desarrollado gran cantidad de sistemas y escalas para nombrar y describir estados fenológicos. Si se combinan estas escalas y se usan los grados días basados en estados de crecimiento es posible pronosticar prácticas de manejo de cultivos.

Para uchuva (*Physalis peruviana* L.) la duración de cada fase fenológica se estimó en función de tiempo térmico (fig. 4.6) esto permite establecer la cantidad de grados acumulados para alcanzar determinado estado fenológico, los resultados se presentan en la tabla 4.7.

Como se observa en la tabla 4.7 entre los dos ambientes se presentaron diferencias, en cuanto al número de días de ocurrencia de cada fase y tiempo térmico requerido para llegar a determinado evento. Miraflores reporta temperaturas más altas y de acuerdo a su ubicación (Tabla 4.4) presenta un clima contrastante con CIAA. Las variaciones en el tiempo térmico indican mayor o menor sensibilidad a la temperatura según lo reportado por Windauer *et al.* (2004).

El mayor número de días después del transplante para la aparición del primer botón se registro en CIAA exterior, las temperaturas reportadas para CIAA exterior son las más

bajas, comparadas con la temperatura de las otras localidades, en la noche se llegan a temperaturas en promedio de 8,29°C, si se tiene en cuenta que la temperatura base calculada para esta etapa fue de 10,85 °C, es predecible que si se presentan temperaturas mas bajas, son necesarios mas días para el tiempo térmico requerido para esta fase. En general la cantidad de días después del trasplante y la cantidad de tiempo térmico dependen de la temperatura y las condiciones ambientales de cada localidad.

Tabla 4.7 Tiempo térmico acumulado para cada etapa y para cada localidad (Ddtr: días después del trasplante, TT: tiempo térmico (°C)).

Localidad	CIAA exterior		CIAA invernadero		Miraflores exterior		Miraflores invernadero	
	Ddtr	TT	Ddtr	TT	Ddtr	TT	Ddtr	TT
Primer botón	70	462,08	47	526,12	25	262,55	49	620,83
Botón-flor	23	161,00	15	154,63	18	181,41	16	191,00
Flor- fruto	5	37,03	4	38,72	3	32,55	2	24,78
Fruto maduro	78	894,68	61	848,52	61	889,06	55	912,71

Las respuestas fenológicas a la temperatura fueron diferentes en dos especies de Lesquerella (Windauer *et al.*, 2004), se calculó la temperatura base y el tiempo térmico (TT) para la fase desde la emergencia (EM) hasta la aparición del primer brote floral (FBA), desde este hasta la aparición de la primera flor abierta (FL) y desde la emergencia hasta la primera flor abierta para *L. fendleri* y *L. mendocina*, la temperatura base calculada para EM a FBA fue 2,6 °C y el TT requerido para esta etapa fue 370,7 °C para *L. fendleri* pero para *L. mendocina* no se estimó debido a la falta de relación entre la tasa de crecimiento y la temperatura para esta fase. Para la fase reproductiva desde FBA hasta FL las temperaturas fueron 6,1 °C y 3,6 °C, el TT 165,2 y 263,4 °C y desde EM hasta FL las temperaturas base estimadas fueron 4,6 °C y -2,9 °C y el TT 536,6 y 1566,0 para *L. fendleri* y *L. mendocina* respectivamente. a pesar de las diferencias presentadas, la cuantificación de la temperatura base y el tiempo térmico requerido para cada una de las diferentes fases, facilita la planeación de siembras y evita la coincidencia de los estados críticos con condiciones ambientales que pueden limitar el cultivo.

Así mismo, Wilson y Barnett (1983), en su trabajo de uva, indican que al determinar la ocurrencia de los distintos eventos fenológicos se facilita la coordinación de las labores tales como programación del riego, manejos culturales, y coordinar la cosecha de los distintos cuarteles dentro del viñedo, además, el conocimiento previo de las diferentes etapas fenológicas de la vid es importante para la caracterización vitivinícola y la correcta selección de un cepaje en una zona determinada. La acumulación de los grados día con umbral mínimo de crecimiento de 10°C (temperatura base) fue usada por Amerine y Winkler (1974), para describir los estados de la vid desde yema hinchada a cosecha y formularon recomendaciones para el crecimiento de cultivares de uva desde valles costeros fríos a desiertos interiores calurosos, realizaron una zonificación climática basada en acumulación térmica o días grado requeridos por los distintos cultivares de vid.

Williams *et al.* (1985) formularon modelos de predicción de la fenología en uva de mesa cv. Thompson sin semilla, como una herramienta de apoyo para el manejo integrado de plagas y enfermedades.

4.2.5 Conclusiones

Valores de temperatura base para aparición del primer botón floral, para el tiempo de primer botón a primera flor, de primera flor a primer fruto (cuajado), de primer fruto a primer fruto maduro para el cultivo de uchuva fueron estimados, a pesar de que no se encontraron diferencias significativas con la temperatura base estimada para la aparición de nudos es un gran aporte a la fisiología del cultivo el tener esta información. Es el primer reporte en uchuva y bajo condiciones de cuatro localidades a la vez con la que se cubre un buen rango de ambientes. En el marco de revisión de literatura son pocos los trabajos que han calculado T_b para cada fase fenológica en este sentido y se recomienda tener el conocimiento de estos valores de T_b para las diferentes fases de desarrollo con el fin de darle un manejo oportuno y apropiado al cultivo.

El tiempo térmico requerido para alcanzar cada una de las fases fenológicas en uchuva fue determinado, el tener esta información permite anticiparse y efectuar buenas prácticas de manejo al cultivo, además es una vía precisa para comparar fases fenológicas si se tienen diferentes variedades de determinado cultivo.

**CAPITULO 5. MODELO DE MASA SECA Y SU
DISTRIBUCION**

5.1 MODELO DE PRODUCCION DE MASA SECA DE LA PLANTA DE UCHUVA (*Physalis peruviana* L.) Y SU DISTRIBUCION

5.1.1 Resumen

El objetivo de este estudio fue construir un modelo simple de producción potencial para crecimiento y desarrollo del cultivo de uchuva, como una herramienta para la selección de zonas productivas y optimización de técnicas de producción. El modelo se basa en la radiación fotosintéticamente activa (PAR) $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ y la temperatura como variables exógenas; asume que no hay limitantes de suelo, agua, nutrientes o daño por plagas y enfermedades. Para un modelo de producción potencial, la tasa de crecimiento diaria, para la conversión a masa seca, se calcula con un modelo mecanístico donde el incremento diario de masa seca depende de la PAR, la fracción de luz interceptada por el follaje (F_{LINT}) y la eficiencia en el uso de la luz (LUE) gMJ^{-1} . La tasa de crecimiento diaria expresada como la masa seca total, se distribuye entre los órganos de la planta de acuerdo con el estado fenológico. El uso eficiente de la luz, el coeficiente de extinción de la luz y coeficientes de distribución para hojas, tallos y frutos son parámetros en el modelo de masa seca. Los datos de crecimiento usados para calibrar el modelo provienen de un experimento realizado en dos localidades diferentes (Cundinamarca y Boyacá, Colombia), bajo condiciones de invernadero y a campo abierto donde se midieron variables fisiológicas de la planta. La distribución entre las etapas vegetativa y reproductiva de la planta se modeló basada en la hipótesis que la partición esta regulada por la relación fuente vertedero. Los coeficientes estimados para la distribución para la etapa vegetativa para hojas fue 0,72 y para tallo fue 0,28, y el alfa estimado para la etapa reproductiva para hojas fue 0,09, tallo 0,23 y fruto 0,69.

5.1.2 Introducción

Muchos modelos se han desarrollado para simulación de crecimiento y desarrollo de variados cultivos, pero solo algunos simulan crecimiento, desarrollo y rendimiento. El presente trabajo se basó en el modelo de crecimiento de cultivo desarrollado en Wageningen por Spitters y Schapendonk (1990), Kooman (1995). El proceso básico en este modelo es la intercepción de luz, su conversión en producción de masa seca diaria y la distribución entre los diferentes órganos de la planta. Para el modelo potencial de uchuva se asumen condiciones óptimas para su desarrollo, sin limitantes de agua, suelo, nutrientes, enfermedades o ataque de plagas. Para un modelo potencial la tasa de crecimiento en masa seca se calcula a través de un modelo mecanístico explicativo y multiplicativo y el intervalo de tiempo de integración del modelo es un día.

5.1.3 Materiales y métodos

5.1.3.1 Datos

Los datos con los cuales se construyó el modelo provienen de dos experimentos desarrollados por el Centro de Investigaciones y Asesorías Agroindustriales “CIAA” de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano en los departamentos de Boyacá (Miraflores) y Cundinamarca (Chía), bajo condiciones de invernadero y a campo abierto en ambos sitios. Chía se encuentra a 2560 m.s.n.m. (4°53’N, 74°O) y Miraflores 1850 m.s.n.m. (5°11’N, 73°09’O).

La distancia de siembra utilizada fue de 2 x 2 m, para todas las localidades y condiciones. La fecha de transplante para uchuva en Chía fue 12/07/02 en el invernadero y 15/07/02 a campo abierto y en Miraflores esas fechas fueron 14/08/02 y 14/06/02, respectivamente. En la tabla 5.1 se presentan los datos de temperatura y humedad relativa para las localidades.

El manejo del cultivo se hizo de acuerdo a las recomendaciones de Angulo *et al.* (2004), la masa seca se determinó al momento del transplante, y se hicieron mediciones periódicas de la masa seca de las hojas, los tallos y frutos de acuerdo al desarrollo fenológico de la planta.

Tabla 5.1. Características climáticas (temperatura y humedad relativa) de las localidades Chía, Cundinamarca y Miraflores, Boyacá.

Localidad	Altitud (msnm)	Temperatura promedio día (°C)	Temperatura promedio noche (°C)	Humedad relativa día (%)	Humedad relativa noche (%)
CIAA (Chía)					
Invernadero	2.560	19,87	11,90	68	89
CIAA (Chía)					
Exterior		16,25	10,71	72	91
Miraflores					
Invernadero	1.850	21,26	15,69	78	95
Miraflores					
Exterior		19,98	13,97	79	98

5.1.3.2 Material vegetal

Se transplantó un total de 260 plantas de 31 días de edad en ambas localidades y se utilizó una distancia de 2 m entre plantas y 2 m entre hileras. Para ambas localidades, tanto en invernadero como a campo abierto, se sembraron 20 camas cada una con 13 plantas, de las cuales se tomaron 5 para las mediciones de área foliar, peso seco de tallos,

hojas y frutos en el momento del trasplante, cuando se formó el primer botón y el primer fruto, cuando ocurrió la maduración del primer fruto y las dos mediciones siguientes se realizaron en el momento de tener el pico y cola de cosecha (Angulo *et al.*, 2004).

El manejo que se le dio al cultivo es el reportado en el trabajo de crecimiento y desarrollo de la uchuva de donde provienen los datos con los que se construyó el modelo, desarrollado por Angulo *et al.* (2003, 2004).

5.1.3.3 Base de datos

La base de datos para construir el modelo se trabajaron en EXCEL, se ubicaron las localidades una seguida de otra al igual que la temperatura, radiación y variables como área foliar, masa seca total y de cada órgano (hojas, tallos, frutos).

5.1.3.4 Estimación de parámetros

Los parámetros del modelo de masa seca son LUE, coeficiente de extinción de la luz (k) y los coeficientes de distribución de la masa seca en los órganos de la planta. Estos parámetros se estimaron con la herramienta SOLVER del programa EXCEL. El objetivo es estimar los parámetros de manera que la suma de cuadrados de las desviaciones entre los valores observados y los estimados por el modelo, sea mínima. SOLVER es un procedimiento iterativo, que a partir de valores iniciales de los parámetros, los incrementa positiva o negativamente a la vez que va evaluando la suma de cuadrados de las desviaciones. El procedimiento se detiene cuando o bien se encuentre un valor mínimo o cuando al variar los valores de los parámetros no se logre ningún cambio en la suma de cuadrados.

5.1.3.5 Modelo de producción potencial

El incremento diario de masa seca en un modelo de producción potencial, depende de: la fracción de luz interceptada por las hojas (F_{LINTt}), la radiación incidente o radiación fotosintéticamente activa (PAR) $MJ\ m^{-2}d^{-1}$ y el uso eficiente de la luz (LUE) $g\ MJ^{-1}$ sobre la producción de biomasa. El desarrollo fenológico de la planta esta principalmente dirigido por la acumulación de temperatura. El estado de desarrollo de la planta determina el patrón de distribución de masa seca y el crecimiento de la hoja, el patrón de intercepción de luz (Kooman, 1995), Se asumen condiciones óptimas y sin limitantes por agua, nutrientes, arvenses, plagas o enfermedades, no se tuvo en cuenta masa seca de raíces y senescencia de hojas, debido a que estas mediciones no se realizaron

5.1.3.6 Tasa de crecimiento

La tasa de crecimiento diario de masa seca, ecuación (5.1), se calcula directamente a partir del producto de la PAR recibida, la fracción interceptada por el follaje y su uso eficiente (Monteith, 1969; Gosse *et al.*, 1986; Kooman, 1995).

$$\delta W_t = LUE F_{LINTt} PAR_t \quad (5.1)$$

δW_t se expresa en $\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, LUE es el uso eficiente de la luz en g.MJ^{-1} , PAR_t es la radiación fotosintéticamente activa en $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ y F_{LINT} es la fracción de luz interceptada por el cultivo. LUE es un parámetro importante en el desarrollo de cultivos, ya que representa o resume los procesos que tienen que ver con respiración y fotosíntesis; cada factor que afecta estos dos procesos, también afecta LUE y por ende el crecimiento y desarrollo del cultivo. LUE cambia de acuerdo con el estado de desarrollo del cultivo, según Kooman (1995).

Uno de los factores que influye en el crecimiento de un cultivo es la luz interceptada la cual depende de la cantidad de follaje presente en el cultivo, que a su vez varía durante el ciclo de crecimiento (Kooman, 1995). La interceptación de la luz por el follaje se puede describir como una función del incremento en el índice de área foliar (LAI) (Spitters *et al.*, 1989), mediante la siguiente ecuación:

$$F_{\text{LINT}} = 1 - e^{-k \text{LAI}} \quad (5.2)$$

Donde k es el coeficiente de extinción de la luz y LAI es el índice de área foliar.

5.1.3.7 Estimación del índice de área foliar a partir del área específica de la hoja

La relación entre el área de la hoja (LA) y la masa seca de la hoja (WI) puede expresarse en términos de área específica de la hoja ($\text{SLA m}^2\text{g}^{-1}$) (Barden, 1977; Spitters y Shapendonk (1990), Kooman, 1995; Garnier *et. Al.*, 2001, Lee y Heuvelink, 2003; Awal, *et al.*, 2004). A partir de las mediciones de área foliar y peso de las hojas se calculó el área foliar específica de las hojas (SLA_t); como el cociente entre el área y el peso de las hojas. El índice de área foliar se calculó como el producto de el área específica de la hoja (SLA_t) y el peso de la hoja (WI_t) ecuación (5.3) y se estimaron los índices diarios a partir de una regresión lineal en función del tiempo térmico.

$$\text{LAI}_t = \text{SLA}_t \text{WI}_t \quad (5.3)$$

Reemplazando (5.2) en (5.1) se tiene:

$$\delta W_t = \text{LUE } 1 - e^{-k \text{LAI}_t} \text{PAR}_t \quad (5.4)$$

Se calculó la tasa de crecimiento del peso seco de las hojas (5.5) a partir de los coeficientes de distribución de masa seca total en hojas (α_t) para las etapas vegetativa y reproductiva

$$\delta W_{t,t} = \alpha_t \delta W_t \quad (5.5)$$

Posteriormente, a partir de la ecuación (5.6) se obtuvo W_{t+1} , que es el peso de las hojas resultante de la primera simulación.

$$W_{t+1} = W_t + \delta W_t \Delta t$$

(5.6)

SLA_{t+1} es el área específica de la hoja estimada diariamente como una función lineal del tiempo térmico (TT)

$$SLA_{t+1} = bTT + a$$

(5.7)

y LAI_{t+1} es el valor diario simulado a través del método de Euler, del índice del área foliar, obtenido a partir del peso de la hoja y el área específica de la hoja, los valores estimados son los que van a entrar diariamente al modelo a través del F_{LINT}

$$LAI_{t+1} = W_{L,t+1} SLA_{t+1}$$

(5.8)

5.1.3.8 Simulación de la masa seca

Para simular la masa seca total diaria se usó método de Euler de la siguiente manera:

$$W_t = W_{t-1} + \delta W_t \Delta t$$

(5.9)

donde W_t masa seca total ($g \cdot m^{-2}$) en el tiempo t , W_{t-1} masa seca total en el tiempo $t-1$ ($g \cdot m^{-2}$), δW_t es la tasa de crecimiento diario de masa seca ($g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$), y Δt es el incremento a través del tiempo (1 día).

El modelo de masa seca total tiene en cuenta dos parámetros y debido a que el modelo se plantea como multiplicativo y a que el coeficiente de extinción de luz entra al modelo como una exponencial, es un modelo de simulación no lineal en los parámetros, razón por la cual para estimar los parámetros se usan métodos no lineales de optimización minimizando la suma de cuadrados de la diferencia entre los valores observados y los valores simulados.

5.1.3.9 Distribución de masa seca

La masa seca total se distribuye a través de los órganos de la planta de acuerdo a los diferentes estados fenológicos (Heuvelink and Marcelis, 1989). Una forma simple para simular la distribución de masa seca es considerar dos etapas, una vegetativa, que en el caso de la uchuva corresponde a producción de hojas y tallos, órganos necesarios para estructurar la planta y producir asimilados, y una segunda reproductiva donde, además de los órganos mencionados en la primera etapa considerada, se producen permanentemente flores y frutos.

La distribución de la biomasa se calcula asumiendo que hay competencia por asimilados entre los diferentes órganos de la planta, de manera que a cada órgano le corresponde una proporción de la masa seca total. La proporción de la distribución, varía según la etapa

fisiológica del cultivo, por lo tanto se calculan las proporciones para las dos etapas consideradas.

Los coeficientes de distribución α_0 , son las proporciones de la masa seca total que se asignan a hojas, tallos y frutos, dependiendo del estado de desarrollo vegetativo o reproductivo (Marcelis, 1994; Kooman, 1995). Para la estimación de los valores de α_0 , se usó la herramienta SOLVER de Excel que es un proceso no lineal iterativo que minimiza la suma de cuadrados entre los valores observados y los valores simulados.

El diagrama de Forrester para el modelo de masa seca y su distribución se presenta en la figura 5.1.

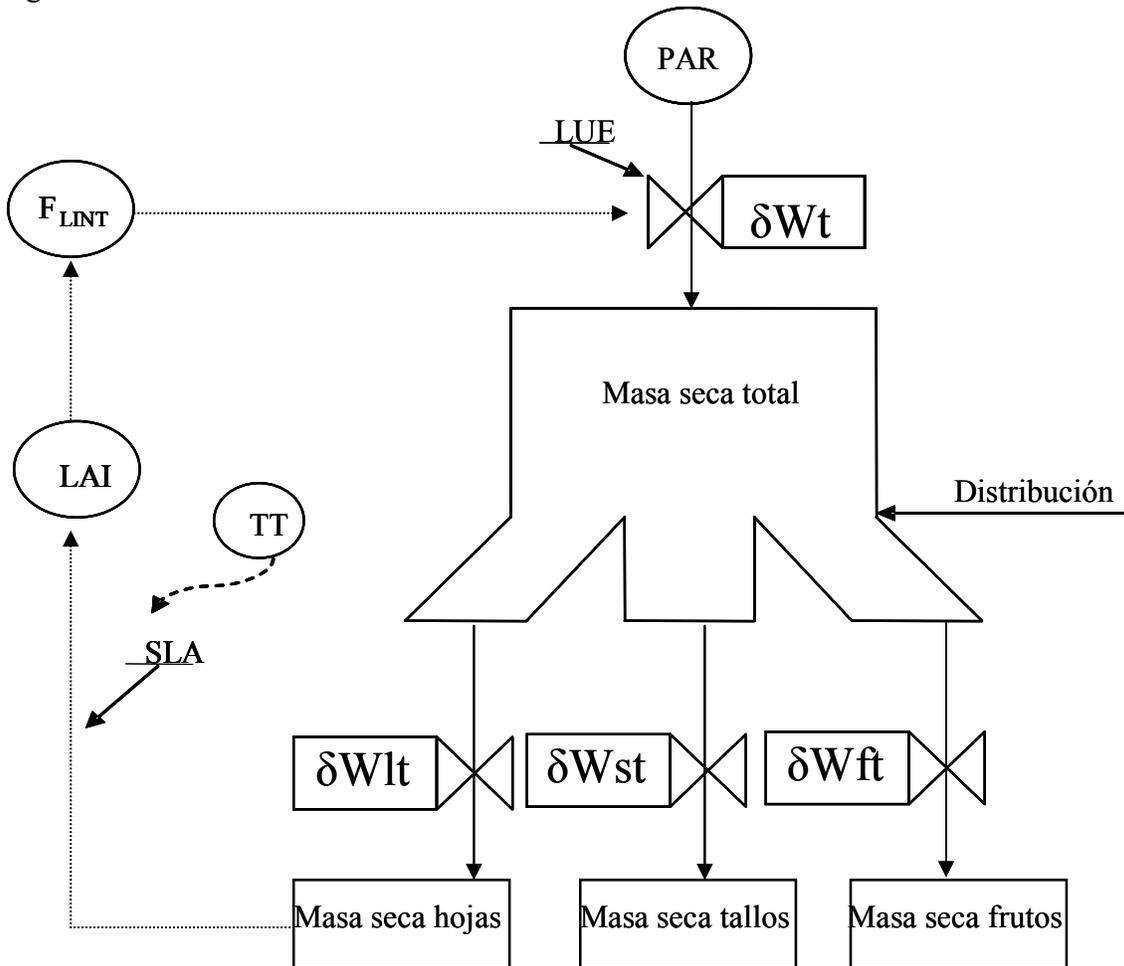


Figura 5.1 Diagrama de producción de masa seca y distribución. La masa seca y su distribución en hojas, tallo y frutos son variables estado del modelo. La radiación fotosintéticamente activa (PAR MJ.m⁻².d⁻¹) y la temperatura (T °C) son variables de entrada del modelo. La temperatura es una variable auxiliar con la cual se determina el SLA (área específica de la hoja), usando una función en términos del tiempo térmico. LUE, (uso eficiente de la luz g.MJ⁻¹), LAI (índice de área foliar m².m⁻²), F_{LINT} fracción de luz interceptada, k (involucrado en F_{LINT}), δW_t: tasa de crecimiento diario de masa seca total, δW_{lt}, δW_{st}, δW_{ft}: tasas de crecimiento cada

órgano en las etapas vegetativa y reproductiva. LUE, k , y los coeficientes de distribución de masa seca para hojas vegetativa y reproductiva (α_{11} , α_{12} , respectivamente) tallos vegetativa y reproductiva (α_{s1} , α_{s2} , respectivamente) y frutos (α_f) son los parámetros del modelo de masa seca.

La simulación de la distribución de masa seca de los diferentes órganos de la planta en las dos etapas del cultivo se llevó a cabo con el método de Euler a través de la ecuación (5.10).

$$W_{ot} = W_{o(t-1)} + \alpha_o \delta W_t \Delta t \quad (5.10)$$

donde W_{ot} es masa seca total de un órgano: hojas (W_{lt}), tallos (W_{st}), o frutos (W_{ft}), en el día t ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$); $W_{o(t-1)}$ es la masa seca de hojas (W_{lt-1}), tallos (W_{st-1}) o frutos (W_{ft-1}) en el día $t-1$ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), α_o es el coeficiente de distribución de hojas (α_l), tallos (α_s) o frutos (α_f); δW_t tasa de crecimiento diario de masa seca total ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) y Δt es el incremento a través del tiempo (1 día).

El modelo de la masa seca total y su distribución se trabajó separadamente para cada localidad con la misma metodología

5.1.3.10 Integración de los modelos

Se realizó la integración del modelo fenológico y el modelo de masa seca y distribución a través del tiempo térmico. Se calculó el tiempo térmico acumulado para las fases fenológicas hasta la aparición de la primera flor, este valor es el que determina el cambio de la etapa vegetativa a la etapa reproductiva. Para efectos de la simulación, se tomó el valor estimado del tiempo térmico hasta la aparición de la primera flor (TTf) y se condicionó el modelo de manera que, cuando el valor del tiempo térmico (TT) es menor que TTf, se utilizan los parámetros de la etapa vegetativa y cuando TT es mayor que TTf se usan los parámetros estimados para la etapa reproductiva.

5.1.4 Resultados y discusión

Los resultados, se presentan de la siguiente manera: primero se muestra la estimación de parámetros para el modelo general de masa seca y su distribución y enseguida la estimación del modelo para cada una de las localidades. Al final se presenta la integración de los modelos fenológico y de masa seca y su distribución.

5.1.4.1 Tasa de crecimiento

La tasa de crecimiento de masa seca total se calculó aplicando la ecuación 5.1, que incluye PAR, F_{LINT} y LUE y se presenta en la figura 5.2. El promedio de la tasa durante todo el experimento fue de $14,53 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, en la etapa vegetativa fue de $1,35 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, en un periodo de 109,5 días en promedio, en la etapa reproductiva y hasta el fin del experimento la tasa fue de $19,08 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ para 317,5 días en promedio.

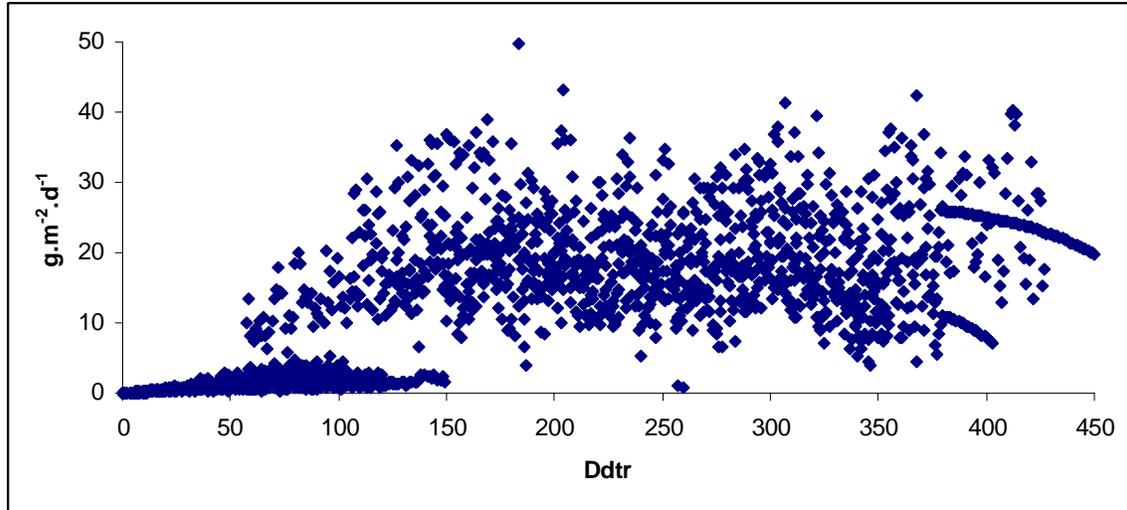


Figura 5.2. Tasa de crecimiento de masa seca total en $\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, y días después del transplante (Ddtr).

Durante el experimento la radiación fotosintéticamente activa (PAR) se midió para cada localidad y condición, el promedio para Chía dentro del invernadero y fuera de este fue 7,24 y 11,12 ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) respectivamente y para Miraflores fue 8,79 y 11,17 ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) dentro del invernadero y fuera del mismo respectivamente.

La estimación de F_{LINT} depende del valor de k y del índice de área foliar. El coeficiente de extinción k , determina la tasa a la cual la radiación solar es absorbida por unidad de área foliar, este valor se midió para uchuva en campo y fue igual a 0.469.

Para obtener el valor de k , se usaron sensores Quantum tipo QS de la marca Delta-T Devices, los cuales estaban conectados a un Microvolt Integrator del tipo MV2, de la misma marca del sensor; se tomaron los valores de radiación incidente y radiación transmitida en diferentes estratos de la planta; de acuerdo con Marcelis *et al.* (1998), la absorción de la radiación puede modelarse a partir del principio que la absorción se incrementa en la medida que se incrementa el área de la hoja, aunque así mismo la sombra que pueda producirse entre ellas disminuye la intercepción, este supuesto asume extinción de la luz exponencialmente y esta es equivalente a la ley de Beer Lambert (Monsi y Saeki, 1953), teniendo como base ese principio se aplicó la siguiente ecuación:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-kL} \quad (5.11)$$

Donde k es el coeficiente de extinción, I/I_0 es la relación de la radiación medida en la parte superior del dosel y dentro del cultivo, L hace referencia al LAI. Se han reportado valores de k en un rango entre 0,5 a 0,8 sin embargo el valor medido es similar al estimado y optimizado $k=0,465$.

El coeficiente de extinción depende de arquitectura de la planta y de la posición, ángulo y orientación de las hojas, a este respecto se han desarrollado modelos en diferentes cultivos (De Wit, citado por Marcelis, *et al.*, 1965).

Se han reportado valores de k para diferentes cultivos y este varía con la densidad de siembra, para café Castillo *et al.* (1996) reportaron diferentes valores de k para diferentes densidades de siembra el valor para 2.500 plantas h^{-1} de 0,46 este valor coincide con el valor estimado para uchuva a la misma densidad de siembra, así mismo reporta los siguientes valores; 0,48; 0,60 y 0,61 para 5.000; 7.500-10.000 y 12.000 plantas/ha respectivamente. Así mismo Heuvelink (1995) reporta para tomate un k de 0,72 con una densidad de 2,3 y 2,6 plantas/ m^2

El índice del área foliar (LAI_{t+1}) con el cual se llevo a cabo la simulación diaria de masa se estimó a partir del área específica de las hojas (SLA_{t+1}), y la partición de la masa seca de hojas de una primera simulación. SLA_{t+1} se estimó en función del tiempo térmico a través de una regresión lineal (figura 5.3). Los valores estuvieron en un rango entre 0,080 y $0,141 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$.

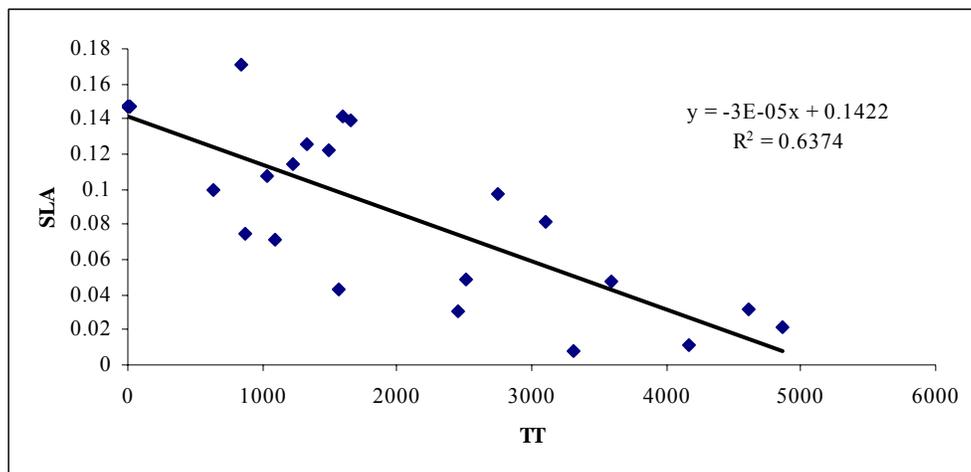


Figura 5.3. Relación SLA (área específica de la hoja) vs. tiempo térmico, para estimación de LAI_{t+1} .

Los valores de LAI_{t+1} estimados alcanzaron valores de 8,36 en la localidad de CIAA y 4,36 en la localidad de Miraflores, en la figura 5.4 se presentan los valores observados y estimados de LAI_{t+1} .

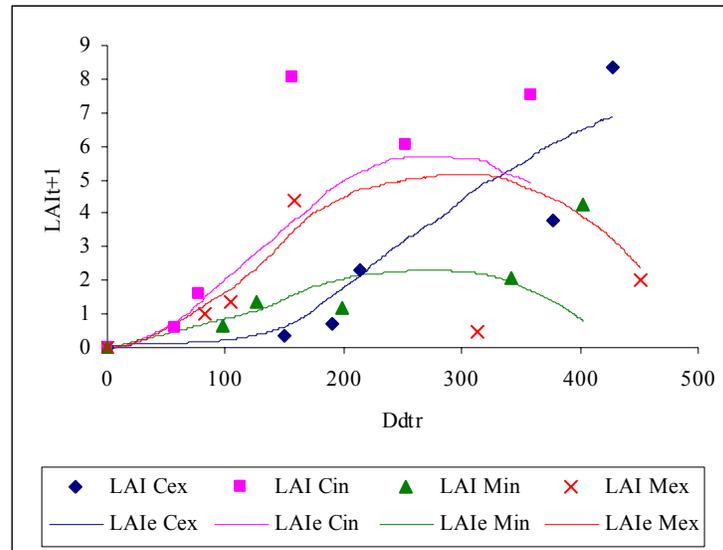


Figura 5.4. Valores observados y estimados de LAI vs días después del trasplante (Ddtr). LAI valores observados y LAIe valores estimados de LAI. Para Chía. y Miraflores exterior e invernadero, respectivamente Cex, Mex, Cin, Min.

La precisión de muchos modelos de fotosíntesis depende en gran parte de la precisión en la predicción del área foliar, generalmente relacionada con la intercepción de la luz, sin embargo, la predicción del LAI, falta explorarse en este tipo de modelos (Heuvelink, 1999). Dos enfoques son los más usados para la simulación del desarrollo del área foliar: (1) el área de la hoja se describe en función del estado de desarrollo de la planta. (2) el área foliar se predice a partir de masa seca de la hoja simulada (Marcelis *et al.*, 1998). El primer enfoque es frecuentemente impreciso para cultivos bajo condiciones de invernadero, debido a fluctuaciones en radiación (cultivos anuales), el desarrollo del área foliar es fuertemente influenciado por la radiación (Marcelis *et al.*, 1998). La simulación del área de la hoja basada en masa seca de la hoja simulada y SLA es un enfoque más flexible y es uno de los más aplicados en varios cultivos como tomate (Heuvelink, 1999), lechuga (Van Henten, 1994), rosa (Lieth & Pasian, 1991), crisantemo (Lee & Heuvelink, 2003) palma de aceite (Awal *et al.*, 2004), entre otros.

Varios autores han realizado la predicción de LAI usando valores constantes de SLA, SLA como función del estado de desarrollo o bien en función de la relación fuente vertedero, por ejemplo en tomate y rosa (Marcelis *et al.*, 1998), LAI frecuentemente es sobreestimada antes de cerrarse el dosel Lee & Heuvelink (2003). Como se observa en la figura LAI ajusta relativamente bien para las localidades estudiadas, sin embargo bajo condiciones de invernadero se observa subestimación de valores con respecto a los valores observado. La estimación de LAI por SLA y la partición de masa seca de hojas es una metodología simple de fácil aplicabilidad y muy útil para usarse en modelación de cultivos. Hasta el momento esta metodología no se había explorado para predicción de LAI en uchuva, por lo que este trabajo muy probablemente es una valiosa contribución para la investigación en este cultivo.

Otro de los componentes de la tasa de crecimiento es el uso eficiente de la luz (LUE), que es a su vez uno de los parámetros del modelo, Rosati & Dejong (2003), mencionan que la producción de biomasa puede ser modelada como función lineal de la PAR y que la pendiente de esta relación es el uso eficiente de la radiación, que es aproximadamente constante para bosques y ecosistemas naturales, y particularmente para cultivos donde no hay limitaciones por agua o nutrientes o condiciones climáticas adversas que puedan disminuir la eficiencia metabólica y otros procesos que determinen su uso eficiente .

Los valores obtenidos para la etapa vegetativa y reproductiva en uchuva de LUE fueron 0,46 y 2,62 g.MJ⁻¹ respectivamente.

La diferencia entre una etapa y otra la definió la aparición de la flores que es cuando se inicia la etapa reproductiva, sin embargo y para efectos de la simulación de frutos, se tuvo en cuenta el primer valor de masa seca de los frutos en cada localidad. El inicio de la etapa reproductiva no sucedió simultáneamente en las localidades en términos de días después del transplante o de tiempo térmico, ésta depende de las condiciones ambientales de cada localidad en que se desarrolló el experimento (tabla 5.2).

Tabla 5.2. Días después del transplante (Ddtr) y tiempo térmico (TT) acumulado para la aparición de frutos en cada localidad.

Localidad	Ddtr	TT
CIAA exterior	150	1039,14
CIAA invernadero	57	641,82
Miraflores invernadero	126	1568,26
Miraflores exterior	105	1087,21

Cuando el tiempo térmico fue mayor a los indicados para cada localidad, el valor de *LUE* cambio de 0,46 a 2,62.

En estudios realizados en diferentes cultivos, el valor de LUE se encuentra en diferentes rangos de acuerdo al cultivo, al manejo y a la densidad de siembra, el rango de valores (en g.MJ⁻¹) para variedades de papa esta entre 2,1 y 3,2 (Kooman 1995); 1,92 y 2,02 para maní, (Kiniry *et al*; 2005); 1,81±0,05 para trigo, 1,52 ±0,05 para arveja y 1,92±0,12 para mostaza (O'Connell *et. al*; 2004).

Para uchuva el valor de LUE en la fase reproductiva es similar al de los cultivos mencionados previamente, en los que se reporta un solo valor de LUE. El valor de LUE cambia de acuerdo a los estados de desarrollo de las plantas según lo reportado por Kooman (1995).

Es evidente que el valor de LUE, para la etapa vegetativa de la uchuva es pequeño ya que en los primeros estados de desarrollo, la planta es pequeña y no existe competencia entre las plantas por luz o radiación, ni de distribución de asimilados ya que la planta sólo tiene raíz, hojas y ramas. En contraste en el estado reproductivo, donde además de los órganos mencionados en la etapa vegetativa, se presentan flores y frutos, hay gran actividad de parte de la planta y mayor intensidad en el transporte de asimilados, por tanto el uso

eficiente de la luz es mayor ya que los asimilados se deben dirigir a mayor cantidad de órganos que los demandan que constituyen la biomasa total.

La figura 5.3 presenta los valores observados y simulados para la masa seca total, para las cuatro localidades. Los datos simulados siguen la tendencia de los datos observados por lo que el ajuste para las localidades fue satisfactorio, sin embargo para CIAA el ajuste fue mejor que para Miraflores en donde modelo sobreestimó la acumulación de masa seca, especialmente en Miraflores exterior.

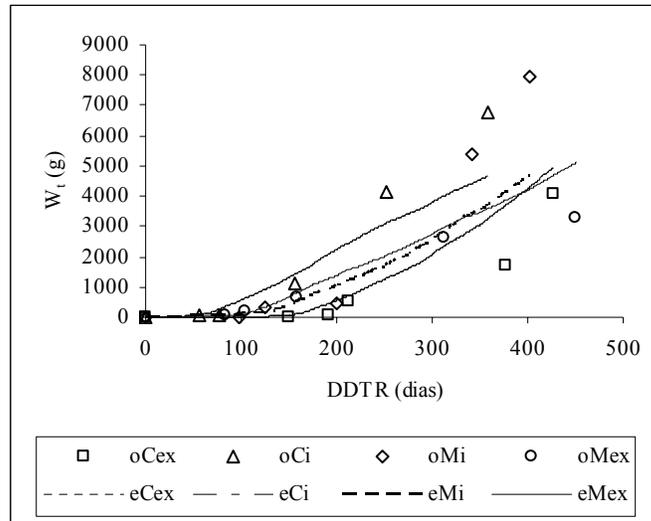


Figura 5.5 Valores observados y simulados de la masa seca total (W_t) vs días después del trasplante (Ddtr); oCiout, oCin, oMout y oMin son los valores observados de masa seca para Chía (CIAA) a campo abierto e invernadero y Miraflores a campo abierto e invernadero respectivamente; eCout, eCin, eMout, eMin son los valores obtenidos con la calibración del modelo de masa seca total para Chía (CIAA) a campo abierto e invernadero y Miraflores a campo abierto e invernadero respectivamente

5.1.4.2 Distribución de la masa seca

La distribución de masa seca esta principalmente regulada por los vertederos, este es un supuesto que ha sido aceptado por varios autores (Marcelis, 1994), en tomate se ha considerado en varios estudios (Heuvelink & Buiskool, 1995). La distribución de la masa seca total se hizo tanto para la etapa vegetativa como para la reproductiva. En la etapa vegetativa, se consideró la masa seca de las hojas y el tallo y en la etapa reproductiva hojas, tallos y frutos.

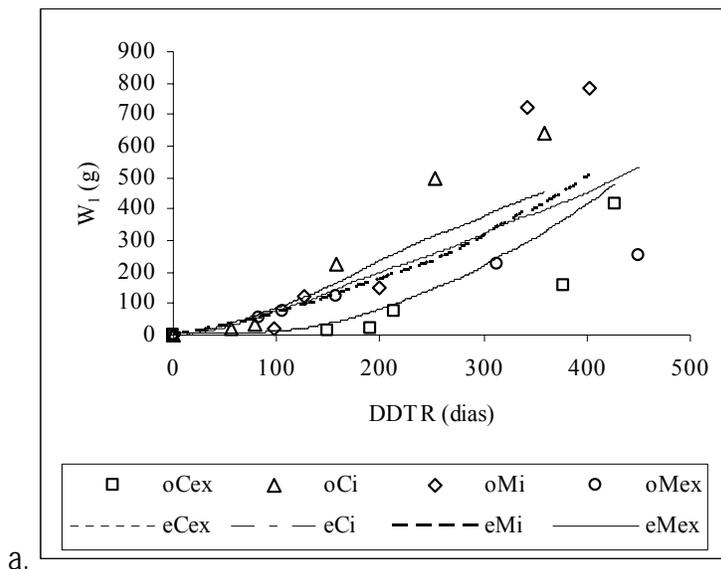
Los coeficientes de distribución de masa seca para hojas vegetativa y reproductiva (α_{11} , α_{12} , respectivamente) tallos vegetativa y reproductiva (α_{21} , α_{22} , respectivamente) y frutos (α_f) son parámetros del modelo de masa seca.

Para la primera etapa el coeficiente de partición de masa seca total en hojas fue $\alpha_1=0,72$, la distribución de tallos se estimo como $\alpha_2=1-\alpha_1$ y el valor obtenido fue 0,28, lo que indica que el 72% de la masa total correspondió a la masa de las hojas y el 28% a la biomasa de tallo. En la fase reproductiva el valor de la distribución de hojas fue $\alpha_2=0,09$, en esta etapa la mayor proporción de masa seca fue para frutos con $\alpha_f=0,69$ y en tallos $\alpha_s=1-\alpha_f-\alpha_2$ el valor fue 0,22. La figura 5.6 presenta la distribución en hojas, tallos y frutos de la masa seca total, se observa una tendencia similar de la masa seca total y de los órganos a través del tiempo.

La formación de la hoja es uno de los procesos mas importantes en la etapa vegetativa hasta que empieza el estado reproductivo con la aparición de la flor, la proporción de la masa seca asignada a las hojas cae considerablemente de 0,72 a 0,09 %, este comportamiento fue similar al reportado por Lee & Heuvelink (2003) y otros autores citados por ellos para crisantemo. La porción de masa seca en los tallos es \approx constante como se indicó anteriormente.

La masa seca de los frutos, 69% de la masa seca total encontrada es similar al reportado en tomate que oscila entre 52-72%. Este coeficiente para pepino se encontró entre 50-64%, en berenjena es igual al 50% y en el pimiento dulce está entre 45-60%. (Bakker 1995). El principal vertedero en uchuva fue el fruto. El modelo de masa seca simula la dinámica del crecimiento, desarrollo y producción del cultivo en todas las condiciones estudiadas

La modelación de la distribución de masa seca basada en los órganos como vertederos es un enfoque flexible que muestra buen ajuste entre los valores medidos y simulados para un determinado rango de condiciones.



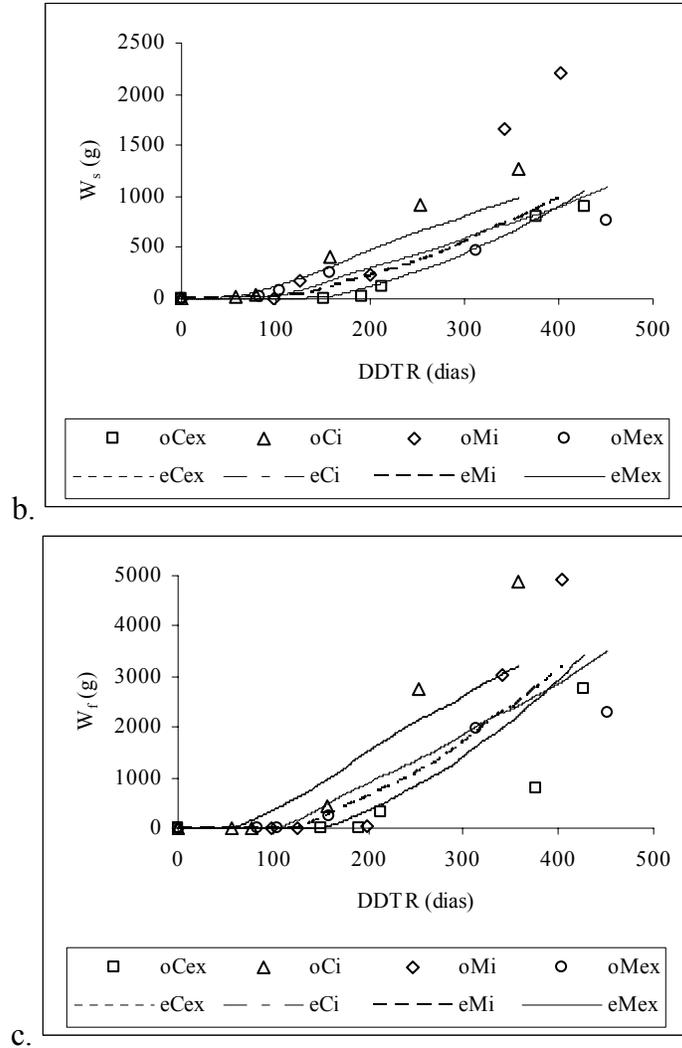


Figura 5.6 (a). Valores observados y simulados de la masa seca total de hojas (W_l), (b) tallos (W_s) (c) frutos (W_f) vs días después del transplante (DDTR); oCex, oMex, oCi, oMi eCex, eMex, eCi, eMi son los valores observados y estimados de masa seca total para Chía (CIAA) y Miraflores a campo abierto e invernadero respectivamente

5.1.4.3 Parámetros para las localidades

Con base en la misma concepción del modelo general, se estimaron los parámetros de masa seca en cada una de las localidades, sin embargo, en estos modelos no se estimó LAI con SLA, esta se estimó en función del tiempo térmico con una ecuación de regresión; los parámetros estimados se presentan en la tabla 5.3. Se observa que cuando se estiman los parámetros por localidad, el parámetro que tiene mayor variabilidad es LUE2 (etapa reproductiva); en la misma tabla se presenta el promedio de los parámetros de las cuatro localidades y su desviación estándar, finalmente la última línea corresponde a los parámetros del modelo general. Al calcular el intervalo con una desviación estándar para cada parámetro, se observa que los valores de los parámetros del modelo general están en este rango, lo que implica que no tiene diferencia significativa con el promedio

de los parámetros estimados en cada localidad. La figura 5.7 presenta los valores observados y estimados para masa seca y su distribución para cada localidad.

Tabla 5.3. Parámetros estimados para cada una de las localidades estudiadas, k coeficiente de extinción de luz, LUE_1 , LUE_2 , uso eficiente de PAR para las etapas vegetativa y reproductiva. α_1 , α_2 , α_{s1} y α_{s2} , parámetros de distribución de hojas y tallos para etapas vegetativa y reproductiva respectivamente, α_f parámetro de distribución de frutos.

Localidad	Parámetros							
	K	LUE_1	LUE_2	α_1	α_2	α_{s1}	α_{s2}	α_f
CIAA exterior	0,45	0,30	1,80	0,65	0,09	0,35	0,27	0,64
CIAA invernadero	0,44	0,30	3,70	0,62	0,10	0,38	0,19	0,71
Miraflores exterior	0,46	0,30	1,50	0,70	0,05	0,30	0,22	0,73
Miraflores invernadero	0,67	0,30	3,70	0,72	0,10	0,28	0,20	0,70
Promedio	0,50	0,30	2,62	0,67	0,08	0,32	0,22	0,69
Desviación estándar	0,11	-	1,13	0,04	0,02	0,04	0,03	0,03
+1 desviación estándar	0,61	0,30	3,76	0,71	0,10	0,37	0,25	0,73
-1 desviación estándar	0,39	0,30	1,48	0,62	0,06	0,28	0,18	0,65
Modelo general	0,46	0,46	2,62	0,72	0,09	0,28	0,22	0,69

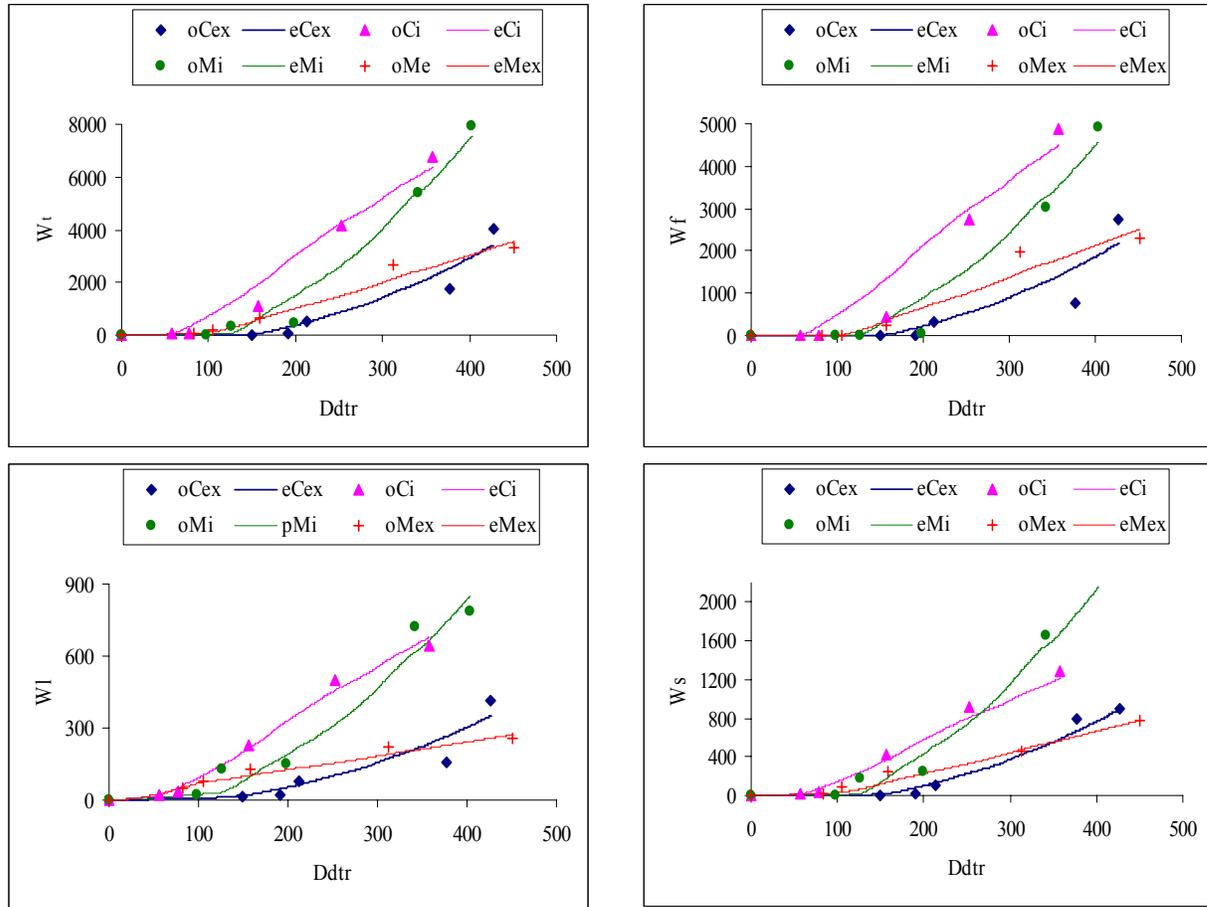


Figura 5.7. (a). Valores observados y simulados de la masa seca total (W_t), (b) de hojas (W_l), (c) tallos (W_s) y (d) frutos (W_f) vs. días después del transplante (Ddtr); oCex, oMex, oCi, oMi eCex, eMex, eCi y eMi son los valores observados y estimados de masa seca para Chía (CIAA) y Miraflores a campo abierto e invernadero respectivamente.

5.1.4.4 Integración de los modelos

El modelo fenológico y el modelo de masa seca y distribución, se unieron a partir del tiempo térmico, ambos modelos usan el tiempo térmico para la estimación de parámetros, luego entonces en el modelo integrado se presentan dos condiciones respecto del tiempo térmico, una para el cambio de pendientes en el modelo de aparición de nudos y otra para el cambio de la etapa vegetativa a la etapa reproductiva en el modelo de masa seca.

El modelo fenológico utiliza el TT para simular la aparición de nudos y para calcular el TT de cada fase fenológica, a su vez la simulación de la aparición de nudos esta dividida en dos segmentos donde el TT marca el cambio de pendiente para el segundo segmento, este valor en promedio fue de 1.035,24 °C con un error estándar de 52,49 °C, cuando se alcanzo el valor máximo del numero de nudos se alcanzaron en promedio un tiempo térmico de 3.808,40 °C con un error estándar de 294,26 °C.

El modelo de masa seca y distribución esta definido en dos etapas vegetativa y reproductiva, este cambio esta determinado por la acumulación del TT desde el transplante hasta la aparición de la primera flor que marca el inicio de la etapa reproductiva. El valor que determina este cambio en el modelo integrado es 650,19 °C, con un error estándar de 76,47 °C. Los parámetros estimados en los modelos son los que se estimaron separadamente para cada modelo,

La ventaja de tener el modelo integrado es que permite analizar conjuntamente las fases fenológicas y la acumulación de masa seca en las dos etapas definidas, así como los cambios que se puedan presentar en el cultivo principalmente por variación en temperaturas, ya que pueden adelantar o retrasar procesos fenologicos, esto permite tener un mejor control y manejo adecuado del cultivo, ya que se tiene una visión general de lo que puede ocurrir si se presenta este tipo de cambios.

5.1.5 CONCLUSIONES

El uso eficiente de la luz se estimo para las fases vegetativa y reproductiva para simular la masa seca total. El valor de LUE en la fase reproductiva es mayor que el encontrado en la primera fase, pero debe tenerse en cuenta para este tipo de cultivo y sus específicas prácticas de manejo.

La distribución de masa seca en hojas, tallos y frutos se hizo para ambas fases vegetativa y reproductiva. Para el estado vegetativo se encontró que el 72% de la masa seca total corresponde a hojas y 28% a tallo, la distribución para los frutos fue del 69% de la masa seca total, 22% para tallo y 0,09% para hojas en el estado reproductivo.

Se estimaron para cada localidad los mismos parámetros del modelo general, las distribuciones en general son muy similares entre si, el parámetro que mas vario entre localidades fue el LUE₂ sin embargo los valores bajo condiciones de invernadero son similares así como a campo abierto.

En el modelo integrado el modelo fenológico y el modelo de masa seca y distribución, se unieron a partir del tiempo térmico, ambos modelos usan el tiempo térmico para la estimación de parámetros.

El modelo de masa seca y distribución esta definido en dos etapas vegetativa y reproductiva, este cambio en el modelo integrado esta determinado por la acumulación del TT.

CAPITULO 6 ANALISIS DE SENSIBILIDAD

6.1 ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO FENOLOGICO Y DE MASA SECA Y SU DISTRIBUCION EN UCHUVA (*Physalis peruviana* L.)

6.1.1 Resumen

El análisis de sensibilidad permite determinar la variación causada sobre la variable de respuesta o de estado debida a variaciones en los parámetros o variables de entrada o exógenas. A continuación se presentan los resultados del análisis de sensibilidad para el modelo integrado de aparición de nudos, masa seca y su distribución. La sensibilidad de la masa seca total, de la masa seca de sus órganos y del número de nudos se realizó a partir de variaciones en valores de los parámetros y de variaciones en las variables climáticas o exógenas. Se encontró que para el modelo de nudos el parámetro mas sensible fue la pendiente del tiempo térmico del segundo segmento del modelo (a_2). Se encontró que a medida que aumenta la temperatura base (T_b) disminuye el número de nudos y que cuando aumenta el valor de las pendientes para el primer y segundo segmento (a_1 y a_2) aumenta el número de nudos. En general para el modelo de masa seca total, los parámetros de mayor sensibilidad, fueron el uso eficiente de la luz, en la etapa reproductiva (LUE_2), el coeficiente de extinción de luz (k) y cada uno de los parámetros que representan la partición de la masa seca total. La sensibilidad del modelo de nudos a cambios en la temperatura mostró una relación directa entre el número de nudos y la temperatura. La sensibilidad de la masa seca total como respuesta a las variaciones en temperatura y radiación fotosintéticamente activa, mostró que hay variaciones de la masa seca a los cambios en estas dos variables, la mayor masa seca se presentó cuando se tuvo la mayor temperatura y la mayor radiación y la menor cuando las series de clima fueron las de menor valor. Se presentó interacción entre la temperatura y la radiación. Sin embargo, la masa seca es mas sensible a radiaciones bajas que a temperaturas bajas; temperaturas bajas con altas radiaciones pueden tener buena respuesta. Para la masa seca de hojas, y de frutos se observo respuesta similar a la masa seca total.

6.1.2 Introducción

El proceso de variar los variables de entrada y parámetros de un modelo, y de observar el cambio en la respuesta es el análisis de sensibilidad. Tiene como propósito mostrar la sensibilidad de las simulaciones del modelo a la incertidumbre en valores de los datos de entrada del modelo, además de evaluar la importancia relativa que las variables de entrada, las condiciones iniciales de las variables de estado y los parámetros tienen sobre la evolución en el tiempo, de las variables de estado y las salidas (Saltelli *et al.*, 2000a).

El análisis de sensibilidad es una herramienta útil, en la determinación de la dirección de actividades futuras en la toma de decisiones, esto para mejorar el rendimiento y la calidad de los cultivos (Lopez *et al.*, 2004). Los datos para los cuales el modelo resulte sensible requieren una caracterización previa, en comparación con los datos para los cuales el modelo es relativamente sensible. Así mismo, el análisis de sensibilidad puede contribuir

considerablemente en el uso de modelos, proporciona un criterio objetivo y debe considerarse una parte integral del proceso de modelación que calcula el impacto de diferentes factores en lo que va a analizarse (Saltelli *et al.*, 2000b).

El análisis de sensibilidad de un modelo de un cultivo es similar a un experimento, motivo por el cual la teoría del diseño experimental es una herramienta del análisis de sensibilidad. En particular, el análisis factorial hace posible evaluar simultáneamente la influencia de varios factores y sus interacciones (Monod *et al.*, 2005).

El objetivo de este capítulo es analizar la sensibilidad del modelo fenológico y de masa seca y su distribución a variaciones en valores de los parámetros y variaciones en variables climáticas.

6.1.3 Materiales y métodos

El análisis de sensibilidad que se presenta a continuación hace la simulación de un experimento factorial, el cual se llevó a cabo para los parámetros de los modelos y sus interacciones y para las variables climáticas temperatura media y radiación fotosintéticamente activa.

6.1.3.1 Sensibilidad a los parámetros del modelo

A partir del modelo integrado de aparición de nudos y de la masa seca total con sus particiones, se llevó a cabo el análisis de sensibilidad.

En la parte del modelo correspondiente al número de nudos, se varió el valor de los parámetros a partir de los valores estimados más o menos un error estándar y se estructuró un arreglo factorial 3^4 , es decir que se simuló 81 veces la aparición de nudos en cada una de las cuatro localidades, para un total de 324 simulaciones. Los valores ensayados de los parámetros se presentan en la tabla 6.1.

Tabla 6.1. Valores de los parámetros usados en el análisis de sensibilidad del modelo de nudos.

Parámetro	-(1) error estándar	Valor estimado	+(1) error estándar
Tb	6,0756	6,2963	6,5170
a ₁	0,0217	0,0223	0,0228
a ₂	0,0079	0,0084	0,0088
b	0,5770	0,7027	0,8284

En el modelo de masa seca total se consideraron tres niveles para cada parámetro (varió cada parámetro un 10% hacia arriba y hacia abajo, debido a que no se tenía una distribución de probabilidad para los parámetros), y se estructuró un arreglo factorial 3^4 considerando las cuatro localidades, los parámetros Tb, K, LUE₁ y LUE₂ fueron probados; el modelo simuló 324 veces la masa seca total (Tabla 6.2).

Tabla 6.2. Valores de los parámetros usados en el análisis de sensibilidad del modelo de masa seca total, para $T_b \pm 1$ error estándar, para K, LUE_1 y $LUE_2 \pm 10\%$

Parámetro	Limite inferior	Valor estimado	Limite superior
Tb	6,076	6,296	6,517
K	0,420	0,470	0,510
LUE_1	0,410	0,460	0,510
LUE_2	2,360	2,630	2,890

En la partición del modelo de masa seca de hojas se varió cada parámetro un 10% de la misma forma en que se hizo para la materia seca total, para el T_b se tuvo en cuenta ± 1 error estándar. Se trabajó con 6 parámetros y se conformó un arreglo factorial 3^6 considerando las cuatro localidades. Se simuló la masa seca de hojas 2916 veces (Tabla 6.3).

Tabla 6.3. Valores de los parámetros usados en el análisis de sensibilidad del modelo de masa seca de hojas, para $T_b \pm 1$ error estándar, para K, LUE_1 , LUE_2 , $ALFAL_1$ y $ALFAL_2 \pm 10\%$.

Parámetro	Limite inferior	Valor estimado	Limite superior
Tb	6,076	6,296	6,517
K	0,420	0,470	0,510
LUE_1	0,410	0,460	0,510
LUE_2	2,360	2,630	2,890
$ALFAL_1$	0,650	0,720	0,790
$ALFAL_2$	0,080	0,090	0,100

La sensibilidad de los parámetros de la partición de la masa seca total en masa seca de frutos se trabajó en forma similar al de las hojas pero se incluyó un parámetro adicional correspondiente a la partición debida a frutos ($ALFAF$). Como resultado de las simulaciones resultaron 8748 datos de masa seca de frutos correspondientes a un arreglo factorial 3^7 en las cuatro localidades (Tabla 6.4)

Tabla 6.4 Valores de los parámetros usados en el análisis de sensibilidad del modelo de masa seca de frutos.

Parámetro	Limite inferior	Valor estimado	Limite superior
Tb	6,076	6,296	6,517
K	0,420	0,470	0,510
LUE_1	0,410	0,460	0,510
LUE_2	2,360	2,630	2,890
$ALFAL_1$	0,650	0,720	0,790
$ALFAL_2$	0,080	0,090	0,100
$ALFAF$	0,620	0,690	0,760

Con el objeto de analizar la sensibilidad de los parámetros del modelo y sus interacciones, se descompuso la suma de cuadrados total del número de nudos, de la masa seca total y su distribución en las diferentes fuentes de variación correspondientes al arreglo factorial y se calculó la sensibilidad como el cociente entre la suma de cuadrados de cada parámetros y sus interacciones entre la suma de cuadrados total. Para cada caso se llevó a cabo el análisis de varianza de los arreglos factoriales con el objeto de calcular las sumas de cuadrados de cada variable de salida correspondiente a los parámetros y todas las posibles interacciones y de la suma de cuadrados total.

El análisis de sensibilidad se llevó a cabo teniendo en cuenta las cuatro localidades a la vez y para cada localidad por separado. En el primer caso, para calcular la sensibilidad, se usó la suma de cuadrados del modelo como denominador de cada suma de cuadrados de los parámetros y sus interacciones; la suma de cuadrados del error que aparece en este caso es debida a la variación entre localidades. Para cada localidad, se calculó la sensibilidad con la suma de cuadrados total como denominador de las sumas de cuadrados debida a los parámetros y sus interacciones. Los análisis de varianza se realizaron con el procedimiento GLM de paquete estadístico SAS® (2003).

Los parámetros que mostraron mayor sensibilidad en cada modelo se graficaron en diagramas de barras con el objeto de contrastarlos; no se incluyeron todos los parámetros e interacciones en estas gráficas debido a que en muchos casos su contribución a la suma de cuadrados total o sensibilidad fue menor de 1%.

6.1.3.2 Sensibilidad climática

Este análisis sólo se realizó en la localidad CIAA exterior. Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad de temperatura media y de radiación, se calculó su desviación estándar de la serie original de datos y se substrajo y adicionó a la serie de datos original, de tal manera que resultaron 9 combinaciones de la siguiente forma (Tabla 6.5):

Tabla 6.5. Variaciones en las series de temperatura y radiación.

Temperatura	Radiación
Original – 0,95	Original-3,28
Original – 0,95	Original
Original – 0,95	Original+3,28
Original	Original-3,28
Original	Original
Original	Original+3,28
Original + 0,95	Original-3,28
Original + 0,95	Original
Original + 0,95	Original+3,28

La simulación de la aparición de nudos y de la masa seca total y sus particiones con los cambios temperatura se graficaron en el eje y, y los días después del transplante en eje x

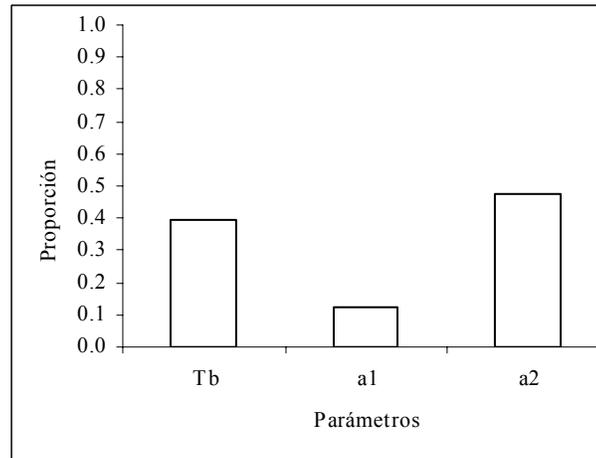
con el objeto de observar la sensibilidad de cada variable a los cambios en las dos condiciones climáticas.

6.1.4 Resultados y discusión

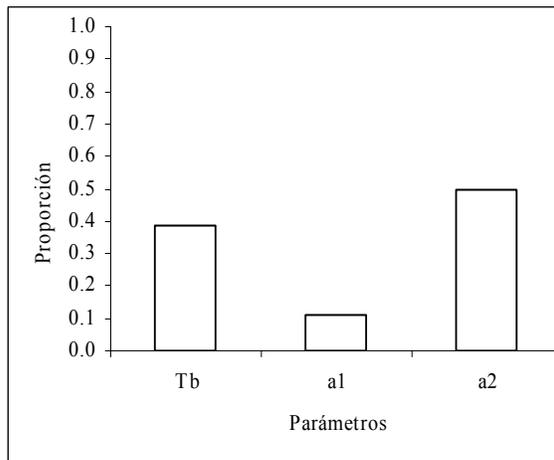
6.1.4.1 Modelo de nudos

A partir de las combinaciones de los tres valores asignados a los parámetros a_1 , a_2 , b y T_b se calculó el número de nudos, con estos datos se realizó un análisis de varianza para calcular las sumas de cuadrados y la proporción de cada parámetro o porcentaje correspondiente a cada parámetro y sus interacciones respecto de la suma de cuadrados total. Los parámetros con mayor sensibilidad fueron a_1 , a_2 , y T , el parámetro b y todas las posibles interacciones no presentaron proporciones mayores de 0,01, por lo que no fueron considerados (Fig. 6.1).

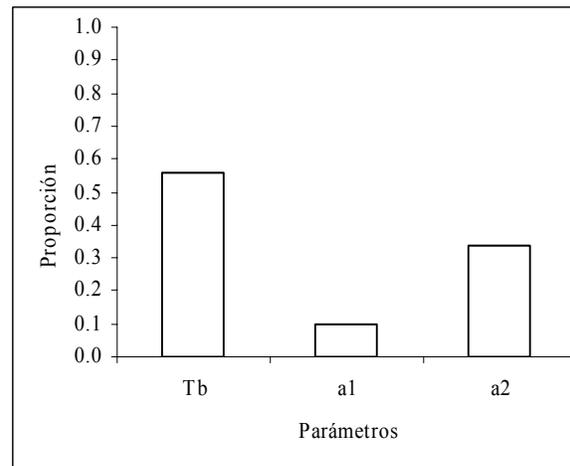
a.



b.



c.



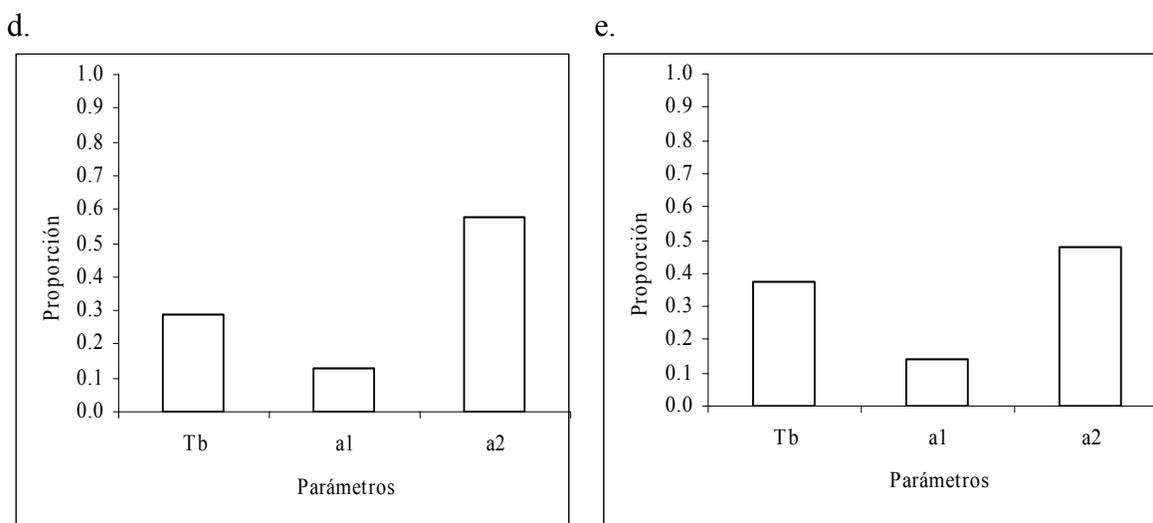


Figura 6.1. Sensibilidad de los parámetros del modelo de nudos. a. Todas las localidades, b. CIAA invernadero, c. CIAA exterior, d. Miraflores invernadero y e. Miraflores exterior.

Para el modelo integrado, el parámetro más sensible fue a_2 , que es la pendiente del tiempo térmico del segundo segmento; el parámetro T_b fue menos sensible que el anterior y por último el menos sensible fue el parámetro a_1 que es la pendiente del tiempo térmico del primer segmento modelado. En cada localidad se conservó el mismo orden, excepto en CIAA exterior donde el parámetro T_b fue el más sensible. La figura 6.1 muestra la sensibilidad de los parámetros considerados. La importancia del T_b en CIAA exterior se debe a que fue la localidad donde se reportaron las más bajas temperaturas.

En general, a medida que aumenta T_b disminuye el número de nudos y disminuye la cantidad de tiempo que debe acumularse para alcanzar el número final de nudos y viceversa; si disminuye el valor de T_b aumenta el número de nudos y así mismo aumenta la cantidad de grados día que deben acumularse para llegar al número final de nudos, esto con relación al valor de temperatura base estimado ($6,29\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Tabla 6.6). Cuando aumenta el valor de las pendientes aumenta también el número de nudos (la relación es directa si aumenta el valor del parámetro, aumenta el valor de la variable). Las localidades donde se presentó mayor número de nudos fueron CIAA invernadero y Miraflores invernadero, que fue donde se presentaron los mayores valores de temperatura durante el experimento.

El modelo fenológico utiliza el TT para simular la aparición de nudos y para calcular el TT de cada fase fenológica, a su vez la simulación de la aparición de nudos esta dividida en dos segmentos donde el TT marca el cambio de pendiente para el segundo segmento, este valor en promedio fue de $1.035,24\text{ }^{\circ}\text{C}$ con un error estándar de $52,49\text{ }^{\circ}\text{C}$, cuando se alcanzo el valor máximo del número de nudos se alcanzaron en promedio un tiempo térmico de $3.808,40\text{ }^{\circ}\text{C}$ con un error estándar de $294,26\text{ }^{\circ}\text{C}$. En la tabla 6.6. se presenta también el tiempo térmico al cambio de temperatura para el (TTC) cambio de pendiente del segundo segmento del modelo de nudos y el TTFN que corresponde al tiempo

térmico acumulado hasta el final de la simulación de nudos, así mismo se presenta el valor del TTM que corresponde al tiempo térmico que indica el cambio en el modelo de masa seca de la etapa vegetativa a la etapa reproductiva.

Como se observa en la Tabla 6.6 existe una relación inversa entre T_b y el número de nudos, en la medida que T_b disminuye el número de nudos aumenta, y viceversa, lo mismo ocurre con los tiempos térmicos (TTC, TTFN, TTM), en la medida que la T_b disminuye el tiempo térmico requerido para el cambio de pendiente, el final de la simulación y el cambio de etapa de vegetativa a reproductiva aumenta.

Tabla 6.6. Valores de # de nudos, TTC, TTFN, TTM presentados con los cambios de temperatura base.

Sitio	T_b	TTC	TTFN	TTM	# NUDOS
CIAAinvernadero	6,0756	1058,80	3894,14	664,92	46,88
CIAAexterior	6,0756	1058,80	3894,14	664,92	38,13
Miraflores invernadero	6,0756	1058,80	3894,14	664,92	50,40
Miraflores exterior	6,0756	1058,80	3894,14	664,92	44,93
CIAAinvernadero	6,2963	1035,24	3808,39	650,19	45,86
CIAAexterior	6,2963	1035,24	3808,39	650,19	37,02
Miraflores invernadero	6,2963	1035,24	3808,39	650,19	49,51
Miraflores exterior	6,2963	1035,24	3808,39	650,19	44,01
CIAAinvernadero	6,5170	1011,68	3722,65	635,45	44,83
CIAAexterior	6,5170	1011,68	3722,65	635,45	35,90
Miraflores invernadero	6,5170	1011,68	3722,65	635,45	48,62
Miraflores exterior	6,5170	1011,68	3722,65	635,45	43,09

6.1.4.2 Modelo materia seca

La figura 6.2 muestra claramente que el parámetro uso eficiente de la luz en la parte reproductiva (LUE_2) es el más sensible considerando todas las localidades al vez e independientemente. Sin embargo, la localidad donde tuvo mayor sensibilidad el parámetro LUE_2 fue CIAA invernadero.

Por otra parte, el otro parámetro que mostró sensibilidad fue el coeficiente de extinción de la luz (k), el cual fue más sensible en la localidad Miraflores invernadero. Ningún otro parámetro o interacción mostró sensibilidad mayor de 1%. A medida que aumentó tanto el valor de LUE_2 como el valor de k , la masa seca total se incrementó (Figura 6.3). La sensibilidad de estos dos parámetros sugiere mejoras en el manejo del cultivo, especialmente en la densidad, podas, número de tallos y del tipo de plástico en el caso de cultivos en invernadero.

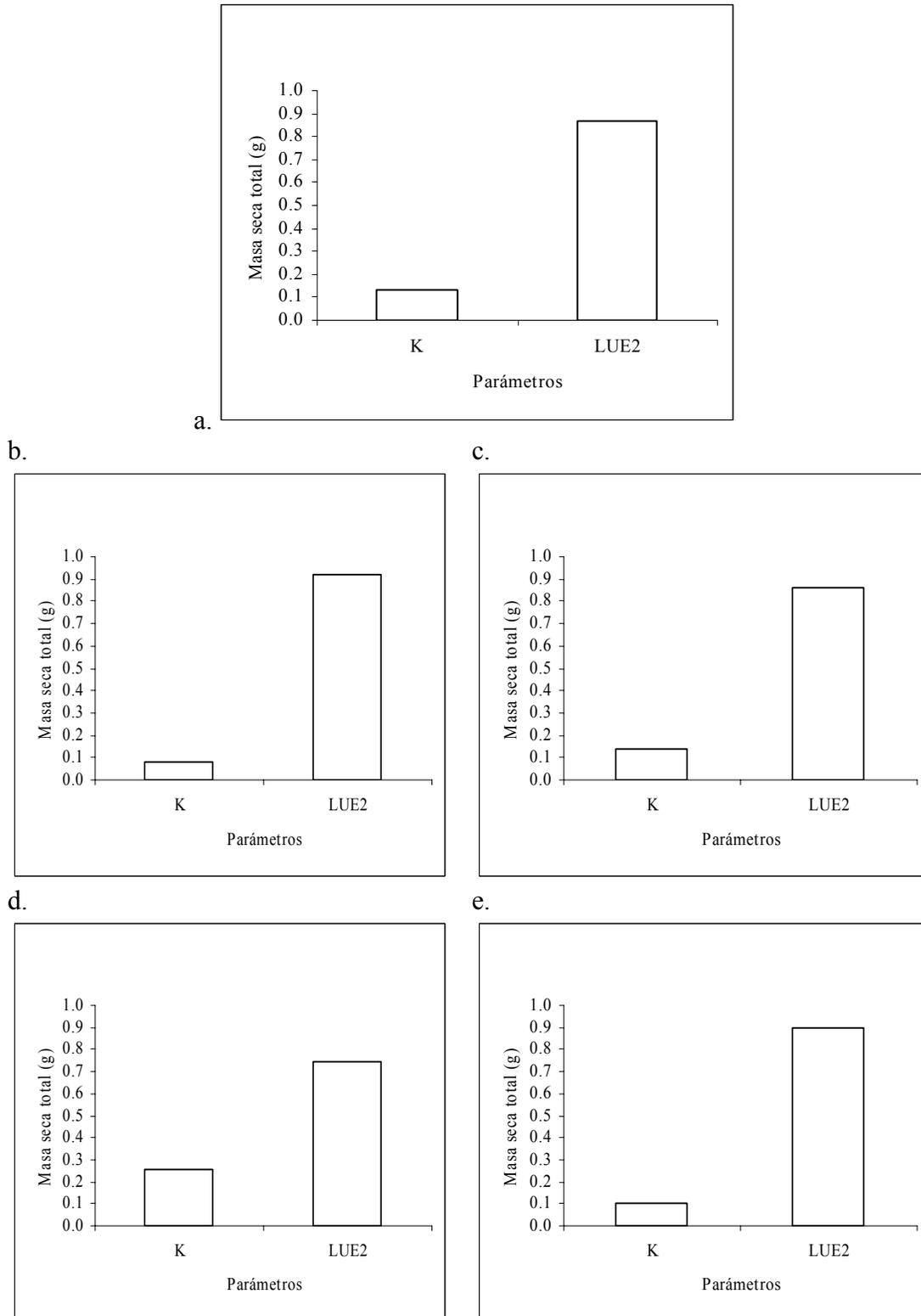


Figura 6.2. Sensibilidad de los parámetros modelo de masa seca total a. Todas las localidades, b. CIAA invernadero, c. CIAA exterior, d. Miraflores invernadero y e. Miraflores exterior.

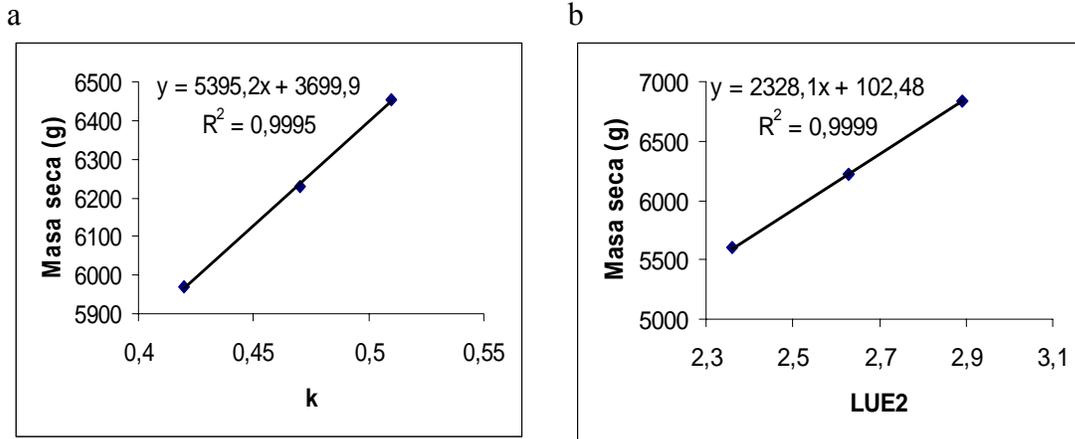
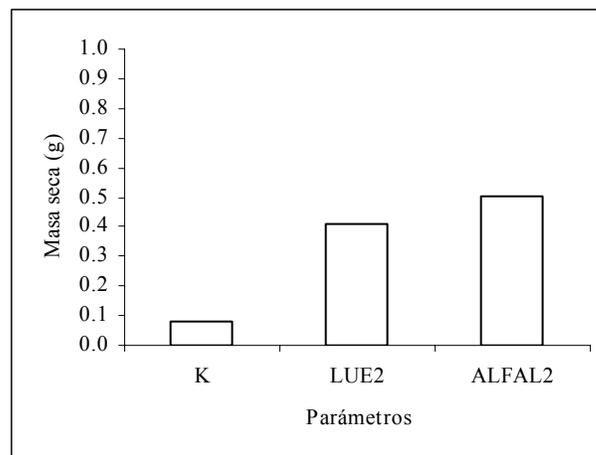


Figura 6.3. Relación masa seca total y parámetros a. coeficiente de extinción y b. uso eficiente de la luz.

6.1.4.3 Modelo masa seca de hojas

La masa seca de hojas tuvo mayor sensibilidad al parámetro α_2 , correspondiente a la proporción de masa seca de las hojas en la fase reproductiva. El uso eficiente de la luz (LUE₂) en la fase reproductiva fue otro parámetro sensible sobre la masa seca de las hojas, su proporción fue similar al parámetro α_2 . Finalmente también fue sensible el parámetro k, sin embargo, la proporción varió entre 8% y 14 % de la sensibilidad total (Figura 6.4). Ningún otro factor o interacción tuvo una sensibilidad de consideración ya que fueron menores al 1%. La relación entre la variación de estos parámetros y la masa seca de hojas fue directamente proporcional, es decir que incremento en los valores de los parámetros mencionados causan incremento en la masa seca de las hojas (Figura 6.5).

a.



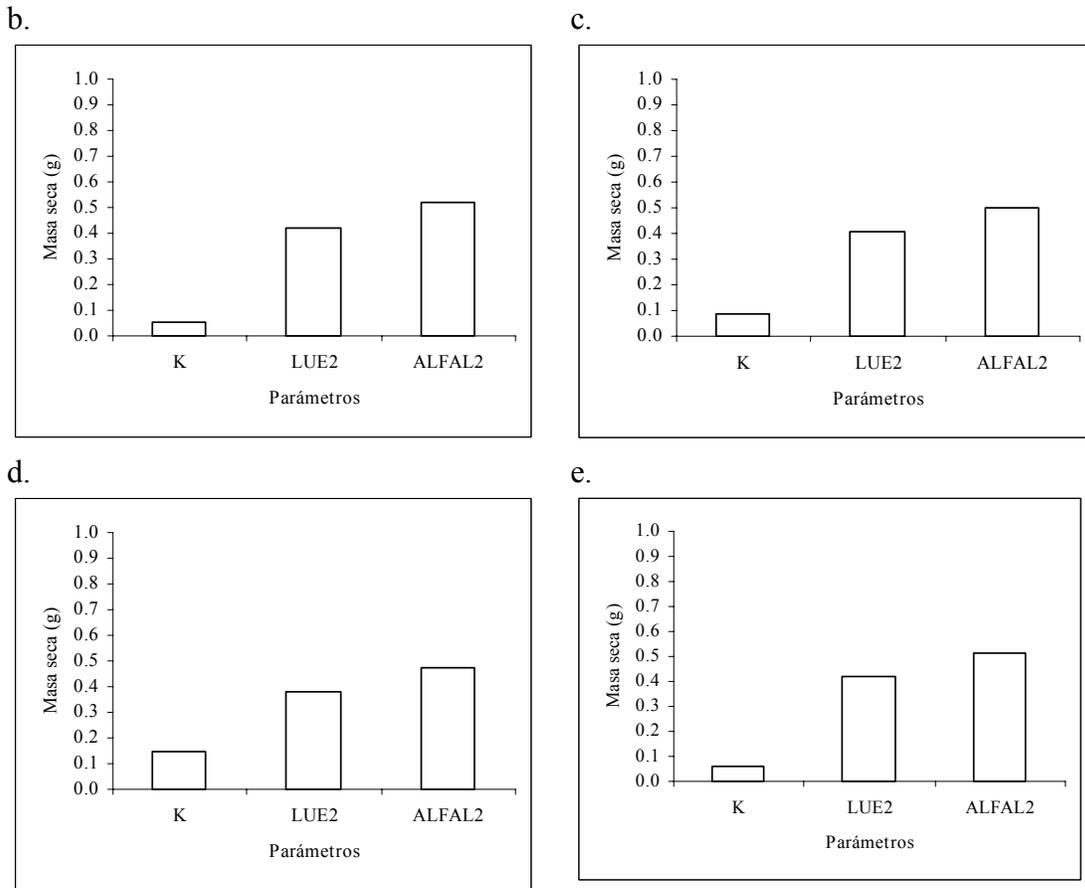
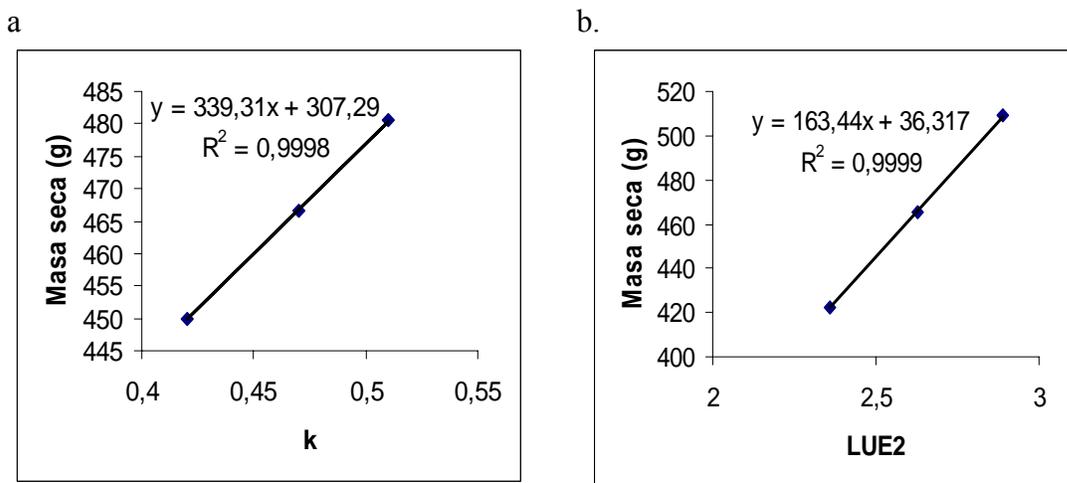
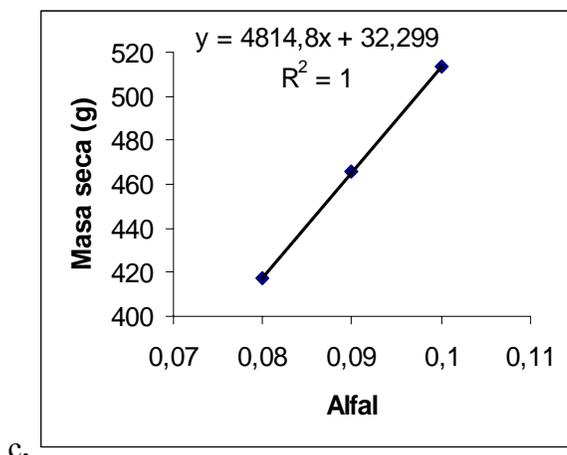


Figura 6.4. Sensibilidad de los parámetros del modelo de masa seca foliar a. Todas las localidades, b. CIAA invernadero, c. CIAA exterior, d. Miraflores invernadero y e. Miraflores exterior.





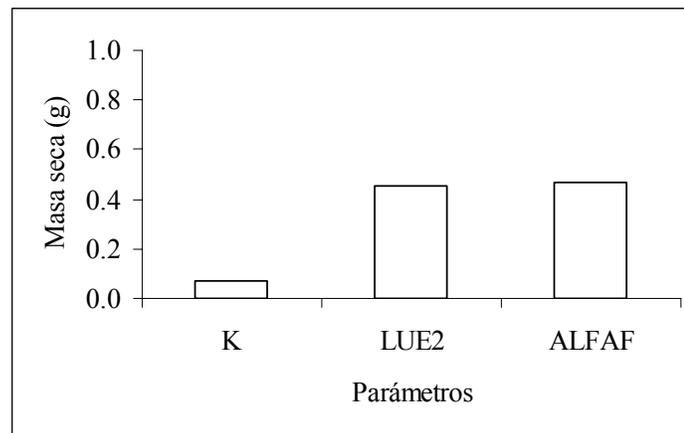
c. Figura 6.5. Relación masa seca de hojas y parámetros a. coeficiente de extinción, b. uso eficiente de la luz y c. partición en hojas.

6.1.4.4 Modelo masa seca de frutos

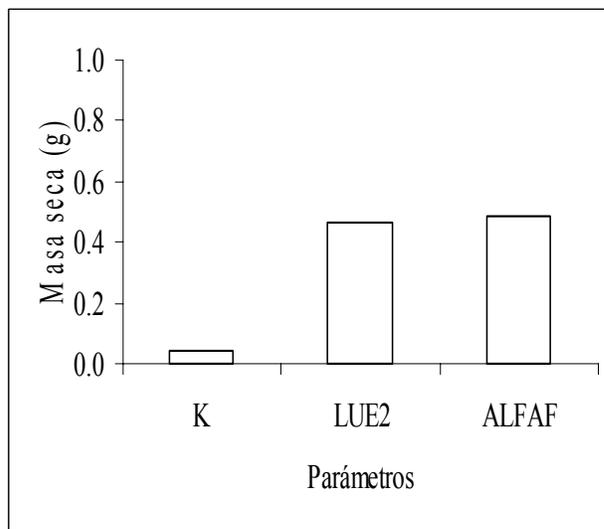
Como lo muestra la figura 6.6 la masa seca de frutos tuvo mayor sensibilidad a los parámetros α_f , que representa la partición de la masa seca total correspondiente a los frutos y el uso eficiente de la luz LUE_2 en la etapa reproductiva; el coeficiente de extinción de la luz (k) también mostró sensibilidad, sin embargo, su proporción no fue mayor del 15% en ninguno de los casos. No se presentó sensibilidad de consideración ($<1\%$) en los demás parámetros ni en las interacciones. Se presentó una relación directa entre la masa seca de los frutos y los parámetros k , LUE_2 y α_f (Figura 6.7).

La partición correspondiente a frutos representa el 69% de la masa seca total, incrementar este valor significa aumentar la proporción de peso seco de los frutos; sin embargo, no puede tomar valores tan altos, pues el resto de la masa seca debe estar dedicado a los tallos y las hojas que, por una parte soportan las demás estructuras de la planta y por otra parte debe haber una cantidad suficiente de hojas que hagan fotosíntesis eficientemente y contribuya a que la planta cuente con los foto asimilados necesarios para un buen desarrollo y producción de buena calidad.

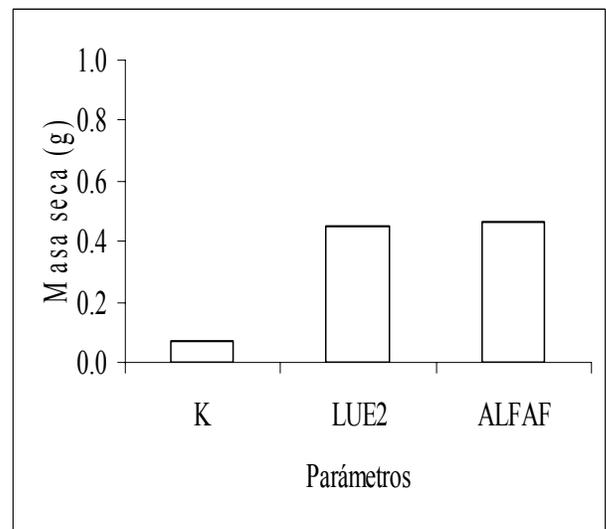
a.



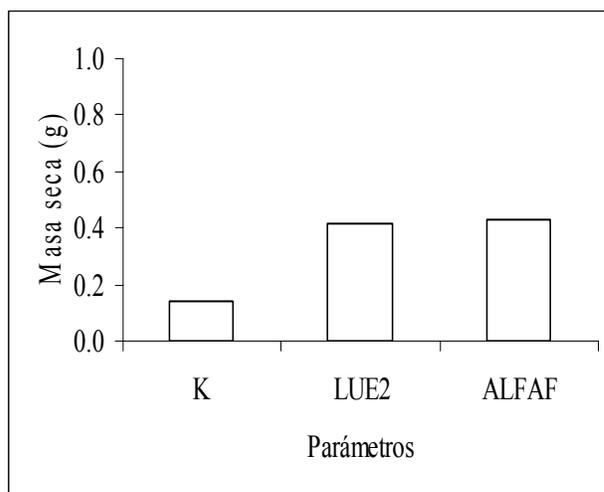
b.



c.



d.



e.

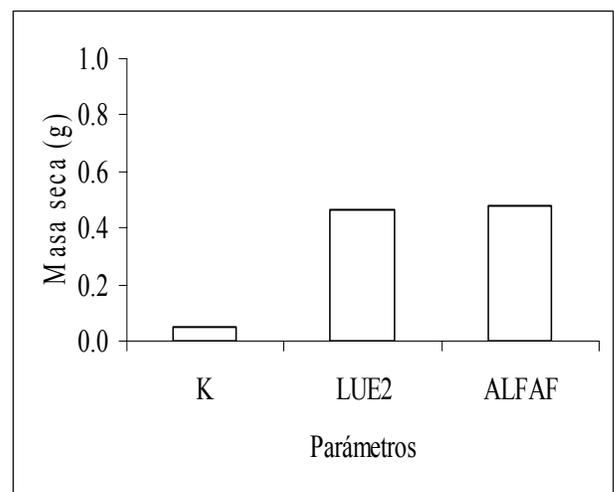


Figura 6.6. Sensibilidad de los parámetros del modelo de frutos de todas las localidades (a); CIAA invernadero (b), CIAA exterior (c), Miraflores invernadero (d) y Miraflores exterior (e).

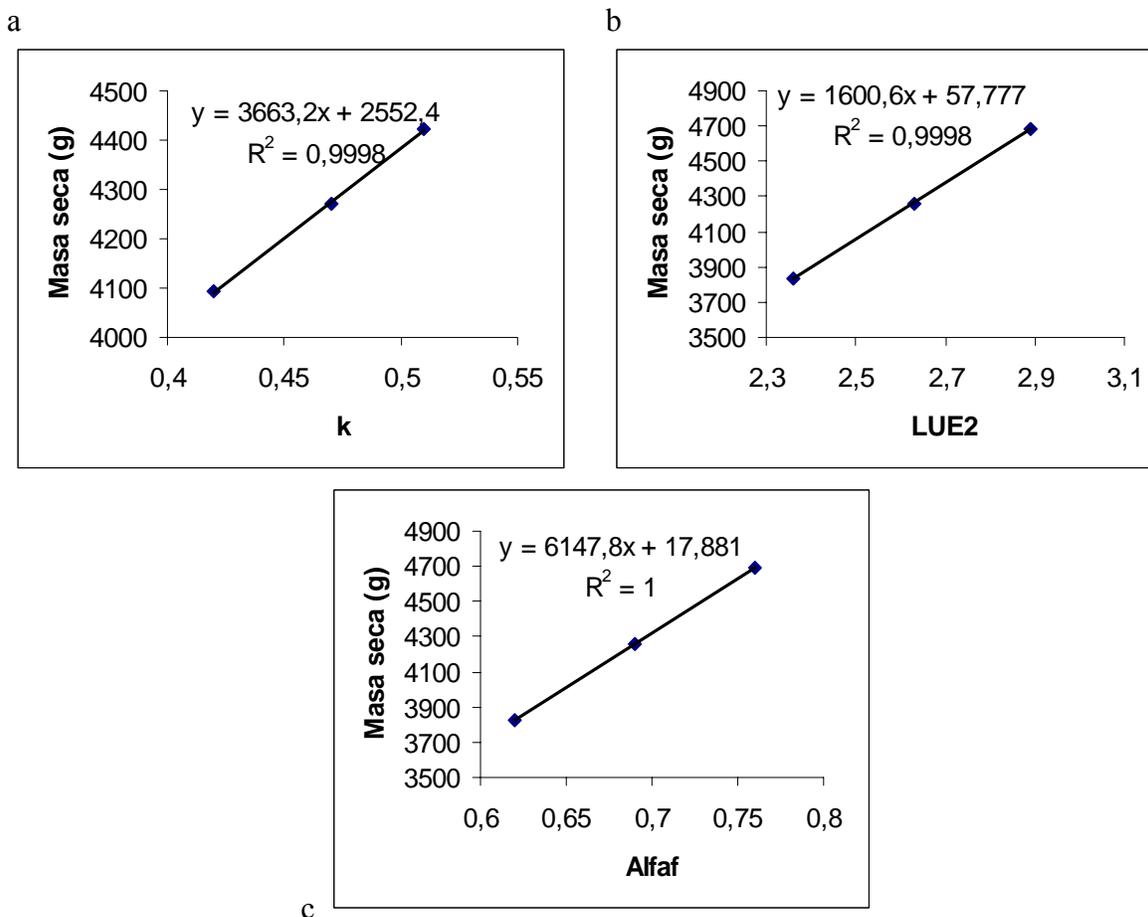


Figura 6.7. Relación masa seca de frutos y parámetros a. coeficiente de extinción, b. uso eficiente de la luz y c. partición en frutos.

6.1.4.5 Sensibilidad de temperatura y radiación fotosintéticamente activa

Este análisis se hizo para CIAA exterior.

6.1.4.5.1 Modelo de nudos

Al aumentar la temperatura, aumenta el número de nudos. La figura 6.8 muestra como cuando se incrementó en $0,95\text{ }^{\circ}\text{C}$ toda la serie original de temperatura media de la localidad CIAA exterior, el número de nudos fue mayor que la serie original, la cual a su vez fue mayor que los datos simulados con la temperatura menos $0,95^{\circ}\text{C}$. Inicialmente, el número de nudos es similar, pero a medida que transcurre el tiempo, la diferencia se va haciendo mayor, debido a que la pendiente cambia levemente tanto en la fase vegetativa como en la reproductiva.

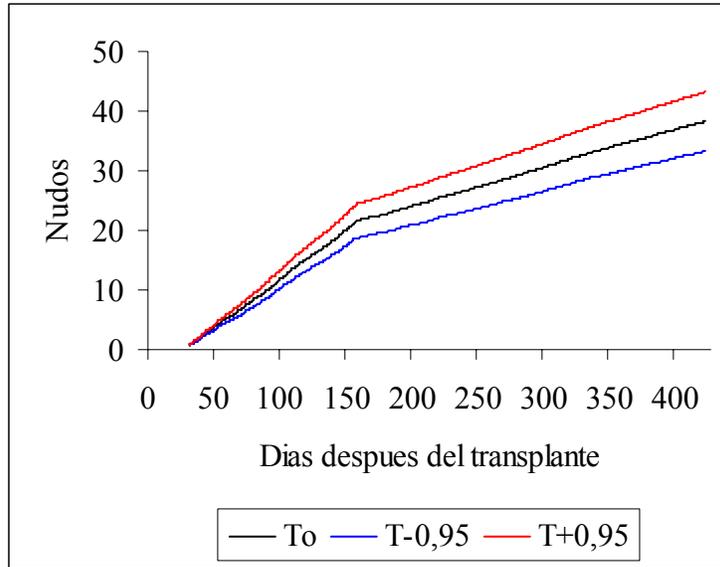


Figura 6.8. Sensibilidad del número de nudos a cambios en temperatura en CIAA exterior.

6.1.4.6 Masa seca total

La masa seca total mostró sensibilidad a los cambios en temperatura y radiación, la figura 6.9 muestra la respuesta de la masa seca total a los cambios en estas dos variables climáticas; se observa que la mayor masa seca se presenta cuando se tiene la mayor temperatura y la mayor radiación y la menor cuando las series de clima tienen los menores valores.

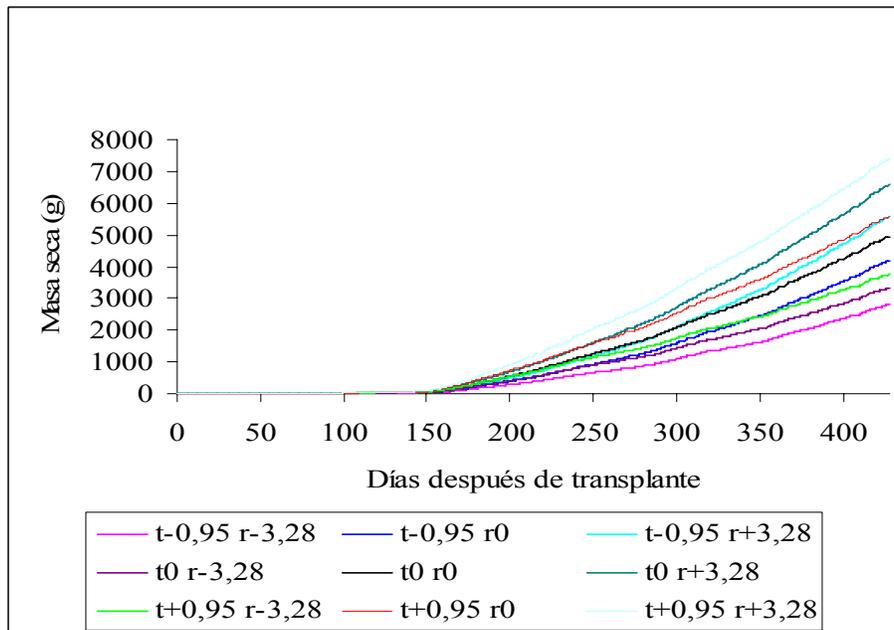


Figura 6.9. Sensibilidad de la masa seca total a cambios en temperatura y radiación en CIAA exterior.

No se puede decir que la temperatura responde independientemente de la radiación, pues como se observa en la figura 6.6, no siempre fue mayor la respuesta para las temperaturas mas altas ni tampoco para las mas bajas. Igual se puede decir de las respuestas mas bajas, no siempre ocurrieron ni para las temperaturas mas bajas ni para las radiaciones mas bajas. En resumen se presentó interacción entre la temperatura y la radiación; temperaturas bajas con altas radiaciones pueden tener buena respuesta. La figura 6.10 muestra la sensibilidad de la masa seca total final a la temperatura y la radiación en términos de contribución a la suma de cuadrados total.

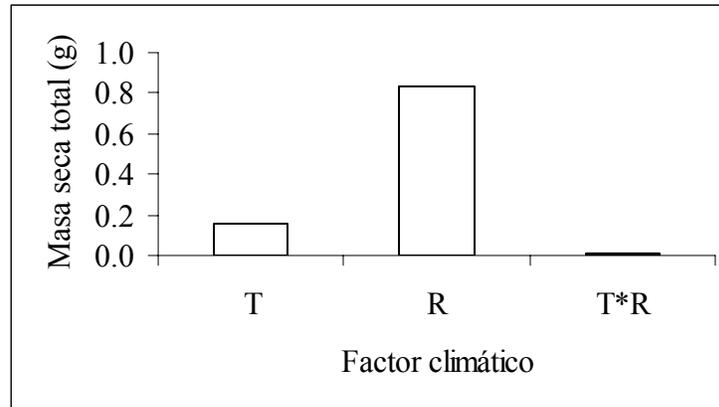


Figura 6.10. Sensibilidad de la masa seca total a la temperatura (T) y la radiación (R).

La masa seca de hojas tuvo idéntica respuesta a la masa seca total en el sentido del orden en que se presentaron las combinaciones de las temperaturas y las radiaciones. La figura 6.11 muestra la tendencia para cada combinación de temperatura y radiación.

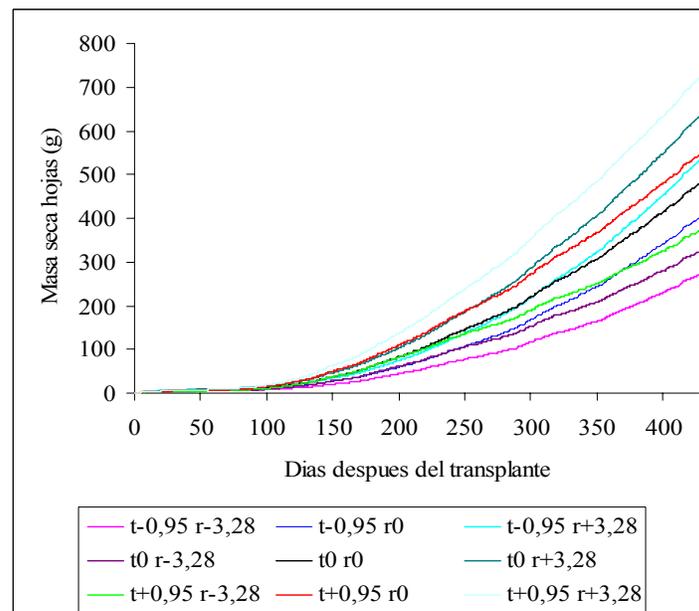


Figura 6.11. Sensibilidad de la masa seca de hojas a cambios en temperatura y radiación en CIAA exterior.

La figura 6.12 muestra como también para la masa seca final de las hojas el factor climático de mayor sensibilidad es la radiación.

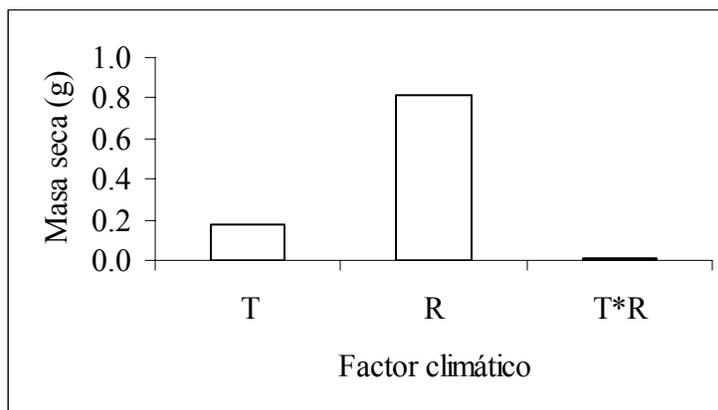


Figura 6.12. Sensibilidad de la masa seca de hojas a la temperatura y la radiación.

La sensibilidad de los frutos a la temperatura y la radiación se presentó idénticamente igual al presentado por la masa seca total y la masa seca de hojas. La figura 6.13 muestra la respuesta a las diferentes combinaciones de las dos variables climáticas.

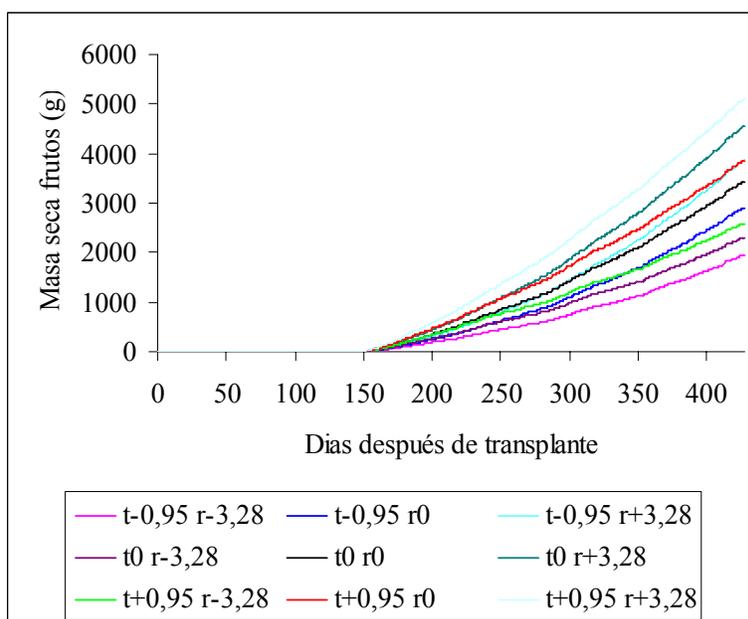


Figura 6.13. Sensibilidad de la masa seca de frutos a cambios en temperatura y radiación en CIAA exterior.

De acuerdo con la contribución de la suma de cuadrados de la masa seca de frutos al final del experimento, la radiación es el factor climático que causa mayor variabilidad en la masa seca de los frutos (Figura 6.14).

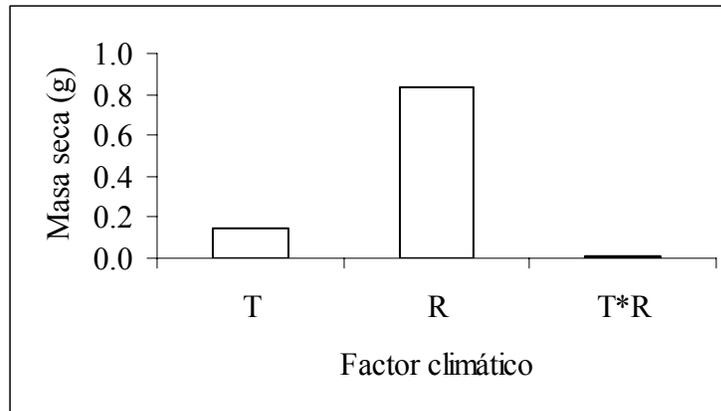


Figura 6.14. Sensibilidad de la masa seca de frutos a la temperatura y la radiación.

6.1.5 Conclusiones

Los parámetros con mayor sensibilidad en el modelo de nudos fueron a_1 , a_2 , y T_b , el parámetro mas sensible fue a_2 que es la pendiente del tiempo térmico del segundo segmento, esto es esperado por la variación que hay entre localidades en esta parte.

A medida que aumenta T_b disminuye el número de nudos, en contraste el número de nudos aumentó cuando las pendientes se incrementaron.

En el modelo de masa seca total, los parámetros mas sensibles fueron el uso eficiente de la luz LUE_2 , y el coeficiente de extinción de la luz (k).

A medida que aumentó tanto el valor de LUE_2 como el valor de k , la masa seca total se incrementó.

Para la masa seca de hojas, el parámetro mas sensible fue α_2 , correspondiente a la proporción en la fase reproductiva de la masa seca total. El uso eficiente de la luz (LUE_2) en la fase reproductiva fue otro parámetro sensible para la masa seca de las hojas, su proporción fue similar al parámetro α_2 .

El incremento en los valores de α_2 , LUE_2 y k causan incremento en la masa seca de las hojas.

En la masa seca de frutos los parámetros que presentaron mayor sensibilidad fueron el parámetro α_f y LUE_2 ; k también mostró sensibilidad, sin embargo, su proporción no fue mayor del 15% en ninguno de los casos. No se presentó sensibilidad de consideración en los demás parámetros ni en las interacciones.

En general, los parámetros que mayor sensibilidad tuvieron, excepto en el modelo de nudos, fueron el uso eficiente de la luz en la etapa reproductiva LUE_2 , el coeficiente de extinción de luz k y cada uno de los parámetros que representa la partición de la masa seca total. Por lo tanto, las prácticas culturales o manejo del cultivo atinentes a mejorar k

y LUE_2 redundaran en beneficio de una mayor cantidad de masa seca; por otra parte, las proporciones de la masa seca total correspondientes a hojas, tallos y frutos deben guardar un balance de manera que la planta funcione eficientemente.

Para la sensibilidad de los modelos con relación a temperatura y radiación fotosintéticamente activa se concluye lo siguiente:

Al aumentar la temperatura, aumenta el número de nudos y viceversa. Inicialmente, el número de nudos es similar, pero a medida que transcurre el tiempo, la diferencia se va haciendo mayor, debido a que la pendiente cambia levemente tanto en la fase vegetativa como en la reproductiva.

La masa seca total mostró sensibilidad a los cambios en temperatura y radiación, la mayor masa seca se presenta cuando se tiene la mayor temperatura y la mayor radiación y la menor cuando las series de clima son las menores; sin embargo, se presentó interacción entre temperatura y radiación.

CONCLUSIONES GENERALES

Un modelo empírico no lineal segmentado se uso para la determinación de la temperatura base, esta metodología no había sido explorada para uchuva, por lo que se considera un aporte para trabajos futuros en este cultivo.

Una relación no lineal en función del tiempo térmico acumulado permitió establecer el modelo de aparición de nudos del tallo en uchuva y su posterior simulación, el modelo ajusto relativamente bien para las localidades estudiadas y bajo las condiciones de manejo que se le dio al cultivo.

Se determinó la temperatura base para la aparición de nudos y para los diferentes estados fenológicos de la planta.

A pesar de que no se encontraron diferencias significativas en la varianza de las temperaturas base estimadas para la aparición de nudos y las diferentes etapas de desarrollo es un gran aporte a la fisiología del cultivo el tener esta información, es el primer reporte en uchuva y bajo condiciones de cuatro localidades a la vez con la que se cubre un buen rango de ambientes.

El tiempo térmico requerido para alcanzar cada una de las fases fenológicas en uchuva, fue establecido, el tener esta información permite anticiparse y efectuar buenas prácticas de manejo al cultivo, además es una vía precisa para comparar fases fenológicas si se tienen diferentes variedades de determinado cultivo

Para la acumulación de masa seca y distribución se establecieron dos etapas, la acumulación del TT determino este cambio desde el transplante hasta la aparición de la primera flor que marca el inicio de la etapa reproductiva.

Dos valores para el uso eficiente de la luz (LUE) fueron calculados para la simulación de masa seca total. El valor de LUE en la fase reproductiva es mayor que el encontrado en la primera fase, estos valores deben tenerse en cuenta para este tipo de cultivo y sus específicas prácticas de manejo, el valor de LUE en la fase reproductiva es similar al encontrado en otros cultivos.

El tiempo térmico permitió la unión de los modelos fenológico y el modelo de masa seca y distribución. Con el modelo integrado se analizan conjuntamente las fases fenológicas y la acumulación de masa seca en las dos etapas definidas, así como los cambios que se puedan presentar en el cultivo principalmente por variación en temperaturas, ya que pueden adelantar o retrasar procesos fenológicos, esto permite tener un mejor control y manejo adecuado del cultivo, ya que se tiene una visión general de lo que puede ocurrir si se presenta este tipo de cambios.

El análisis de sensibilidad mostró que los parámetros con mayor sensibilidad en el modelo de nudos fueron a_1 , a_2 , y T_b , el parámetro mas sensible fue a_2 que es la pendiente del tiempo térmico del segundo segmento, esto es esperado por la variación que hay entre

localidades en esta parte. A medida que aumenta T_b disminuye el número de nudos, en contraste el número de nudos aumenta cuando las pendientes se incrementaron.

En el modelo de masa seca total, los parámetros más sensibles fueron el uso eficiente de la luz LUE_2 , y el coeficiente de extinción de la luz (k). A medida que aumentó tanto el valor de LUE_2 como el valor de k , la masa seca total se incrementó.

Para la masa seca de hojas, el parámetro más sensible fue α_2 , correspondiente a la proporción en la fase reproductiva de la masa seca total. El uso eficiente de la luz (LUE_2) en la fase reproductiva fue otro parámetro sensible para la masa seca de las hojas, su proporción fue similar al parámetro α_2 .

En general, los parámetros que mayor sensibilidad tuvieron, excepto en el modelo de nudos, fueron el uso eficiente de la luz en la etapa reproductiva LUE_2 , el coeficiente de extinción de luz k y cada uno de los parámetros que representa la partición de la masa seca total. Por lo tanto, las prácticas culturales o manejo del cultivo atinentes a mejorar k y LUE_2 redundaran en beneficio de una mayor cantidad de masa seca; por otra parte, las proporciones de la masa seca total correspondientes a hojas, tallos y frutos deben guardar un balance de manera que la planta funcione eficientemente.

Para la sensibilidad de los modelos a temperatura y radiación (PAR) para Chía exterior se concluye lo siguiente:

Al aumentar la temperatura, aumenta el número de nudos y viceversa. Inicialmente, el número de nudos es similar, pero a medida que transcurre el tiempo, la diferencia se va haciendo mayor, debido a que la pendiente cambia levemente tanto en la fase vegetativa como en la reproductiva.

Se observó sensibilidad a los cambios en temperatura y radiación para el modelo de masa seca, esta se obtiene a mayor temperatura y radiación y viceversa. Se presentó interacción entre temperatura y radiación.

RECOMENDACIONES

Para dar mayor confiabilidad al modelo propuesto, es necesario realizar su validación en diferentes condiciones ambientales. (Pero con las mismas prácticas culturales con la que se construyó el modelo).

Se recomienda considerar limitantes de disponibilidad de agua, de nutrientes, y de plagas y enfermedades en el modelo, con el objeto de lograr una aproximación más cercana a lo que ocurre en campo esto de acuerdo a la aplicación y detalle que se requiera. De esta manera, es posible también contribuir a determinar acertadamente la cantidad y oportunidad para la aplicación de agua y fertilizantes; así mismo, es posible determinar umbrales para plagas y enfermedades con el objeto de aproximarse a un manejo eficiente y racional.

Para lograr mayor cobertura, desde del punto vista genético, es importante aplicar el modelo a otros ecotipos, y hacer los respectivos ajustes y calibraciones. Por otra parte, es necesario extender el modelo al número de ciclos de producción del cultivo y estimar la vida útil, desde el punto de vista productivo, del cultivo de uchuva.

Es conveniente llevar a cabo experimentos con diferentes prácticas de manejo del cultivo, particularmente ensayos de podas, plástico, densidades y arreglos de siembra, con el fin de mejorar la eficiencia en el uso de la luz, y el coeficiente de extinción ya que LUE y k fueron los parámetros más sensibles en el modelo de acumulación de masa seca.

En futuros trabajos se debe estudiar el aporte del capacho al desarrollo del fruto y a la acumulación de masa seca.

Se sugiere desarrollar un modelo para la etapa de poscosecha, donde se logre simular el comportamiento de los frutos en diferentes tipos de empaque, diferentes temperaturas de almacenamiento y disposición de los frutos dentro del empaque.

Se recomienda programar el modelo en un lenguaje amigable, interactivo y fácil de modificar, que incluya bases de datos de clima, de suelo y de características del cultivo.

Seria conveniente la formación de un grupo interdisciplinario que apoye y este permanentemente trabajando en actualización y el desarrollo del modelo.

REFERENCIAS

Acock, B., Reddy, V. R., Whisler, F. D., Baker, D. N., McKinion, J. M., Hodges, H. F., Boote, K. F. 1985. The soybean crop simulator GLYCIM: model documentation USDA, Washington.

Agrocadenas. 2004. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Observatorio agrocadenas de Colombia. Área de producción y rendimientos-Colombia Doc. de trabajo No 45. Abril 2004 <http://www.agrocadenas.gov.co> Cadena: Frutas de exportación. Bogotá.

Almanza, P. J. & Fischer, G. 1993. Nuevas tecnologías de la uchuva *Physalis peruviana* L. Agro-Desarrollo 4 (1-2), 292-304.

Amerine, M. A. & Winkler, A. J. 1974. Composition and quality of musts and wines of California grapes. Hilgardia 5, 493-675.

Angulo, R. 1988. Uchuva (*Physalis peruviana* L). Memorias curso frutales de clima frío. Federacafe, Tibacuy. p 1-3.

Angulo, R. 2003. Frutales exóticos de clima frío. Bayer CropScience, Bogotá. p 27-48.

Angulo, R. (ed.). 2005. Uchuva el cultivo. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colciencias, Centro de Investigaciones y Asesorías Agroindustriales. 78 p.

Angulo, R., Cooman, A., Gómez. D., Escobar, H., Fuentes, L. S., & Medina, A. 2003. Evaluación y desarrollo de un modelo de producción de lulo y uchuva bajo condiciones de invernadero. III informe técnico Colciencias. Bogotá.

Angulo, R., Cooman, A., Gómez. D., Escobar, H., Fuentes, L. S., & Medina, A. 2004. Evaluación y desarrollo de un modelo de producción de lulo y uchuva bajo condiciones de invernadero. Informe final para Colciencias. Bogotá 213 p.

Angus, J. F., Cunningham R. B., Moneur, M. W. & Mackenzie, D. H. 1981. Phasic development in field crops. I. Thermal response in the seedling phase. Field Crops Res. 3, 365-378.

Aracil, J. 1978. Introducción a la dinámica de sistemas. Alianza Editorial S.A. 303 p.

Awal, M. A., Wan, I., Endan, J. & Haniff, M. 2004. Determination of specific leaf area and leaf area-leaf mass relationship in oil palm plantation. Asian Journal of Plant Sciences 3 (3), 264-268.

Bakker, J. C., Bot, G.P.A., Challa, H. & van de Braak, N.J. 1995. Greenhouse climate control: an integrated approach. Wageningen Press, the Netherlands. 279 p.

- Baker, J. & Reddy, V. 2001. Temperature effects on phenological development and yield of muskmelon. *Annals of Botany* 87, 605-613.
- Barden, J.A. 1977. Apple tree growth, et photosynthesis, dark respiration and specific weight as affected by continuous and intermittent shade. *J.Amer. Soc. Hort. Sci.* 102, 191-194.
- Benjamin, L. R. & Aikman, D. P. 1995. Predicting growth in stands of mixed species from that in individual species. *Annals of Botany* 76, 31-42.
- Bignami, C., Natali, S. & Amadei, P. 1999. Growth analysis and temperature effects on olive bud development. *Acta Hort.* 474, 261-264.
- Boote, K. J. 1982. Growth stages of peanut (*Arachis hypogaea* L.) *Peanut Science* 9, 35-40.
- Boote, K.J. & Tollenaar, M. 1994. Modeling genetic yield potential. pp 533-565 En: Boote K. J., Bennett, J.M., Sinclair, T. R. & Paulsen G. M. (eds). *Physiology and determination of crop yield. American Society of Agronomy* pp. 533-565.
- Boote, K. J., Jones, J. W. & Pickering, N. B. 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agr. J.* 88, 704-716.
- Boote, K. J., Kropff, M. J., & Bindraban, P. S. 2001. Physiology and modelling of traits in crop plants: implications for genetic improvement. *Agricultural Systems* 70 (2-3), 395-420.
- Bourgeois, G., Écuyer, M.L. Chouinard, G., Gay, G., Malenfant, Y., Fortier A. M., Plouffe, D. & Laurence, H. 2000. Mathematical models for apple phenology and pest predictions using the recherche thase software. Institut de recherche et de développement en agro-environnement, Saint-Hyacinthe (Quebec). *Research Summary.* 27, 1999-2000.
- Bowen, W. & Jaramillo, R. 1998. Modelos de dinámica de nutrientes en el suelo y en la planta. VII Congreso Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. <http://www.tradeoffs.montana.edu/pdf/e-Bowen-Jaramillo.pdf>
- Brewster, J. L. & Sutherland, R. A. 1993. The rapid determination in controlled environments of parameters for predicting seedling growth rates in natural conditions. *Annals of Applied Biology* 122, 123-133.
- Brisson, N., Cary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillere, J.P., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B and Sinoquet, H. 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18 (3-4), 309-332.

Brown, H. E. & Moot, D. J. 2004. Main- Stem node appearance of Lucerne regrowth in a temperate climate. [http:// www.cropscience.org.au/icsc2004/poster/2/8/1939_brown.htm](http://www.cropscience.org.au/icsc2004/poster/2/8/1939_brown.htm).

Campbell, J. A., Robertson, M. J. & Grof, C.P.L 1998. Temperature effects on node appearance in sugarcane Australian Journal of Plant Physiology 25(7), 815 – 818.

Cantor, F., Cure, J. R., Orozco A. M. 1995. Simulación del crecimiento y desarrollo de *Gypsophyla paniculata* var. Perfecta, incluyendo el efecto de vernalización. En: Reunión de la red de la sociedad internacional de Biometría para Centro América, el Caribe, Colombia y Venezuela, 4. Santa Marta, Junio 11-15 de 1995. Resúmenes de comunicaciones.

Castañeda, G. & Paredes R. 2003. Estudio del proceso respiratorio, principales ácidos orgánicos, azúcares y algunos cambios físico-químicos en el desarrollo del fruto de uchuva (*Physalis peruviana*). Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Castillo, E., Jaramillo, A., Arcila, J. & Sanabria, J. 1996. Coeficientes de extinción de la radiación fotosintéticamente activa en *Coffea arabica* L. *Atmósfera* 24, 65-70.

Challa, H., Bakker, J., 1998. Potential production within the greenhouse environment. In: Enoch, Z., Stanhill, G. Eds., *Ecosystems of the World. The Greenhouse Ecosystem*. Elsevier, Amsterdam, in press.

Charles, E. D. A. 1982. Physiological determinants of crop growth. CSIRO Division of Tropical Pastures Cunningham Laboratory, St. Lucia, Queensland. Academic Press. 161 p.

Cooman, A. 2002. Feasibility of protected tomato cropping in the high altitude tropics using statistical and system dynamic models for plant growth and development. PhD. Thesis. Katholieke Universiteit Leuven. Faculteit Landbouwkundige en Toegespaste Biologische Wetenschappen.

CRFG. 1997. Cape gooseberry *Physalis peruviana* L. California Rare Fruit Growers, Inc. 3 p.

Dayan, E., Keulen, H. V., Jones, J. W., Zipori, I., Shmuel, D & Challa, H. 1993b. Development, calibration and validation of a Greenhouse Tomato Growth Model: I. description of the model. *Agricultural Systems* 43, 145-163.

Dayan, E., Keulen, H. V., Jones, J.W., Zipori, I., Shmuel, D. & Challa, H. 1993. Development, calibration and validation of a Greenhouse Tomato Growth Model: II. Field calibration and Validation. *Agricultural Systems* 43, 165-183.

Dourado, N. D., Teruel, D. A. & Reichardt, K. 1998. Principles of crop modelling and simulation: II. the implications of the objective in model development. *Sci. Agric.* 55, no.spe. pp. 51-57. ISSN 0103-9016

- Ellis, R. H., Watkinson, A. R., Summerfield, R. J. & Lawn, R. J. 1995. From evaluation descriptors of times to flowering to the genetic characterization of flowering responses to photoperiod and temperature. *Plant Genetic Resources Newsletter*. 103, 36-38.
- Elsner, J. E., Smith, C. W. & Owen, D. F. 1979. Uniform stage descriptors in upland cotton. *Crop Science*. 19, 361-363.
- EXCEL. Portions of the Microsoft Excel Solver program code are copyright 1990, 1991, 1992, and 1995 by Frontline Systems, Inc. Portions are copyright 1989 by Optimal Methods, Inc.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) 1982. Fruit-bearing forest trees technical notes. Roma. pp. 140-143.
- Fehr, W. R. & Caviness, C. E. 1981. Stages of soybean development. Cooperative Extension Service. Iowa State University. Ames Iowa 50011. Special Report 80. 11 p.
- Fischer, G. 1989. Aspectos fisiológicos del desarrollo de la uchuva *Physalis peruviana* L. Memorias IV Seminario Nacional Recursos Vegetales Promisorios. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. pp. 9-19.
- Fischer, G. 1995. Effect of root- zone temperature and tropical altitude on the growth, development and fruit quality of cape gooseberry *Physalis peruviana* L. Tesis de doctorado. Universidad de Humboldt. Berlin.
- Fischer, G. & Lüdders P. 1997. Developmental changes of carbohydrates in cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits in relation to the calyx and the leaves. *Agronomía Colombiana* 14(2), 95-107.
- Fischer, G., Lüdders P. & Torres, F. 1997. Influencia de la separación del cáliz de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) sobre el desarrollo del fruto. *Revista Comalfi* 24(1-2), 3-16.
- Fischer, G. & Angulo, R. 1999. Los frutales de clima frío en Colombia. La uchuva en ventana al campo andino 2(1), 3-6.
- Fischer, G. 2000. Crecimiento y desarrollo. En Florez, V.J., Fischer, G. & Sora, A. Producción, poscosecha y exportación de la Uchuva *Physalis peruviana* L. Unibiblos, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Pp 9-26.
- France, J. & Thornley, J. H. M. 1984. Mathematical models in agriculture. A quantitative approach to problems in agriculture and related sciences. Butterworths, London. 335 p.
- Forjan, H. 2002. Modelos de simulación de crecimiento y desarrollo de los cultivos Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Chacra Experimental Integrada Barrow

Convenio INTA Ministerio de Asuntos Agrarios y Producción - Pcia. De Buenos Aires (MAAyP) AgroBarrow Digital N° 27 Octubre 2002 1©. INTA. Rivadavia 1439 (1033) Buenos Aires, Argentina.

Garnier, E., Shipley, B., Routmet, C. & Laurent, G. 2001. A standardized protocol for the determination of specific leaf area and dry matter content. *Functional Ecology* 15, pp 688-695.

Gary, C., Bertin, N. & Tchamitchian, M. 1996. 'TOMGRO' mode' le explicatif de fonctionnement des cultures sous serre : un outils pour la recherche et pour l'aide a' la de cision. In: Baille A, ed. *Actes du seU minaire de l'AIP intersectorielle Serres*. Avignon: INRA, pp 90-99.

Gary, C., Jones, J. W. & Tchamitchian, M. 1998. Crop modeling in horticulture: state of the art. *Scientia Horticulturae* 74, 3-20.

Goudrian, J. & Laar, H. H., Van. 1994. Current sigues in production ecology. Modelling potential growth processes. Text book with exercises. Kluwer Academic Publishers, London.

Hanway, J. J. 1963. Growth stages of corn (*Zea mays*, L.). *Agronomy Journal* 5, 487-491.

Haun, J. R. 1973. Visual quantification of wheat development. *Agronomy Journal* 55, 116-119.

Heinze, W. & Midasch, M. 1991. Photoperiodische Reaktion von *Physalis peruviana* L. *Gartenbauwissenschaft* 56 (6), 262-264.

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

Heuvelink E. & Marcelis L. F. M. 1989. Dry matter distribution in tomato and cucumber. *Acta Horticulturae* 260, 149-157.

Heuvelink, E. 1995. Dry matter production in a tomato crop: Measurements and simulation. *Annals of botany* 75, 369-379.

Heuvelink, E. & Buiskool, R. P. M. 1995. Influence of sink source interaction on dry matter production in tomato. *Annals of botany* 75, 381-389.

Heuvelink, E. 1996. Dry matter partitioning in tomato: Validation of a dynamic simulation model. *Annals of botany* 77, 71-80.

Heuvelink, E. 1999. Evaluation of a dynamic simulation model for tomato crop growth and development. *Annals of botany* 83, 413-422.

- Jones, J. W., Hunt, L. A., Hoogenboom, G., Godwin, D. C., Singh, U., Tsuji, G. Y., Pickering, N. P., Thornton, P. K., Bowen, W. T., Boote, K. J. & Ritchie, J. T. 1994. Input and output files. En DSSAT R3 Vol 2-1. Tsuji, G. Y., Uehara, G. & Balas, S. (eds.) University of Hawaii, Honolulu p 1-93.
- Jones, J. W., Mishoe, J. W. & Boote, K. 1987. Introduction to simulation and modeling. Technical Bulletin No 100. Taipei, ASPAC Food and Fertilizer Technology Center.
- Jones, J. W., Dayan, E., Jones P., Hwang, Y. & Jacobson, B. 1988. Modeling tomato growth for greenhouse environment control. American Society of Agricultural Engineers. Winter meeting presentation. 88-7501.
- Jones, J. W., Dayan, E., Van Keulan, H. & Challa, H. 1989. Modeling tomato growth for optimizing greenhouse temperatures and carbon dioxide concentrations. Acta Horticulturae 248, 285-294.
- Jones, J. W., Ritchie, J. T. 1990. Crop growth models. En: Hofman, G. J., Howell, T. A., Solomon, K. H. (eds.). Management of farm irrigation systems. St. Joseph, ASAE. P 63-69.
- Jones, J. W., Dayan, E., Allen, L. H., Van Keulen, H. & Challa, H. 1991. A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). Transactions of the ASAE 34(2), 663-672.
- Jones, J. W., Yong Kee, H. & Kening, A. 1997. Developing a simplified crop model. In Seginer, I., Jones, J. W., Gutman, P. O & Vallejos, C. E., Optimal environmental control for indeterminate greenhouse crops. Final Report, BARD Research Project IS-1995-91RC. Department of Agricultural Engineering, Technion, Haifa, Israel: III. 6.1-6.8.
- Jones, J. W. & Luten, J. C. 1988. Chap. 2. Simulation of biological processes. En: Peart, M., Robert. M. & Curry, B. R. (eds.). Agricultural systems modeling and simulation. Dekker, Inc 1998. New York.
- Jones, J. W., Hoogenboom, G. Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Sigh, U. Gijzman, A. J. & Richie, J. T. 2003. The DSSAT cropping system model. Eur. J. Agron. 18 (3-4), 235-265.
- Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzwoth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J. N. G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verbug, K., Snow, V., Dimes, J. P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K. L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R. L., Freebairn, D. M. & Smith, C. J. 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. Eur. J. Agron. 18 (3-4), 267-288.
- Keen, R. E. & Spain, J. D. 1992. Computer simulation in biology: A BASIC introduction. Wiley-Liss, New York. 498 p.

Kim, S. H., & Reddy, V. 2004. Simulating maize development using a nonlinear temperature response model. Proceedings of the 4th International Crop Science Congress Brisbane, Australia, 26 Sep – 1 Oct 2004. En: www.cropscience.org.au

Kooman, P. L. 1995. Yielding ability of potato crops as influenced by temperature and daylength. PhD. Thesis. Landbouw Universiteit Wageningen.

Kooman, P. & Jones, J. W. 1995. Report on theoretical studies with potential yield and shooting models for banana. Work document. Florida University

Kooman, P. L. & Spitters, C. J. T. 1995. Coherent set of models to simulate potato growth. En: Kaba, P., Marshall, B., Van den Broek, B. J., Vos, J. & Van Keulen, H. (eds.). Modelling and parameterization of the soil-plant-atmosphere system. A comparison of potato growth models. Wageningen Press, Wageningen, p 253–274

Kunsch, P. L 2003. La Dynamique des Systèmes (DS).un outil pour les politiques d'environnement ULB/SMG Bruxelles www.mhhe.com/sterman

Laar, H. H. V., Goudriaan J. & Keulen, V. 1997. SUCROS97: Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations. As applied to spring wheat. Quantitative Approaches in Systems Analysis. September 1997.

Lee, J. H., & Heuvelink, E. 2003. Simulation of leaf area development based on dry matter partitioning and specific leaf area for cut chrysanthemum. *Annals of Botany* 91, 319-327.

Legge, A. P. 1974. Notes on the history, cultivation and uses of *Physalis peruviana* L. *J. Royal Hort. Soc.* 99 (7), 310- 314.

Lentz, W. 1998. Model applications in horticulture: a review. *Sci. Hortic.* 74, 151–174.

Lieth, J. H. & Pasian, C. C. 1991. A simulation model for the growth and development of flowering rose shoots. *Scientia Hortic.* 46, 109-128.

Ligarreto, G. A., Lobo, M. & Correa, A. 2005. Recursos genéticos del género *Physalis* en Colombia. 2005. En: Fischer, G. D., Miranda, D., Piedrahita, W. & Romero, W. J. (eds). Avances en cultivo, poscosecha y exportacion de la uchuva *Physalis peruviana* L en Colombia. Unibiblos, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá pp. 9-28.

Lopez, C. I., Ramirez, A. & Rojano, A. 2004. Sensitivity análisis of a dinamic growth model for greenhouse grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) *Agrociencia* 38, 613-624.

Madakadze, I.C., Stewart, K. A., Madakadze, R. M., & Smith, D. L. 2003. Base temperatures for seedling growth and their correlation with chilling sensitivity for warm-season grasses *crop science* 43, 874-878.

- Marcelis, L. M. F. 1994. A simulation model for dry matter partitioning in cucumber. *Annals of Botany* 74, 43-52.
- Marcelis, L. F. M., Heuvelink, E. & Goudriaan, J. 1998. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae* 74, 83–111.
- Meyer, G. E., Curry, R. B., Streeter, J. G. & Mederski, H. J. 1979. SOYMOD/OARDC: a new dynamic simulator of indeterminate soybean growth, development and seed yield: I. Theory, structure and validation. Ohio Agricultural Research and Development Center, Research Bulletin, 1113.
- Meyer, G. E., Curry, R. B., Streeter, J. G. & Baker, C. H. 1981. Simulation of reproductive processes and senescence in indeterminate soybeans. *Transactions of the ASAE* 24, 421.
- Meira, S., Guevara, E. & Hernandorena, C. 1999. SUR 98, Decision tool for the main crops in Argentina. Global Soy Forum. 4-7 agosto, Chicago.
- Miller, P., Lanier, W., Brandt, S. 2001 Montana State University. Extension Service. Montguide MT20013 AG 7/2001.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural 2005. Estadísticas, exportaciones frutas exóticas. Bogotá. www.minagricultura.gov.co.
- Monod, H., Naud, C. & Makowski, D. 2005. En Notas de clase curso Agricultural and Biological System Simulation. Spring semester.ABE5646. Dr. James W. Jones. University of Florida.
- Monsi, M. & Saeki, T. 1953. Über den Lichtfaktor in dem Pflanzengengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany* 14, 22-52.
- Moot, D. J., Robertson, M. J. & Pollock, K. M. 2001. Validation of the APSIM-Lucerne model for phenological development in a cool-temperate climate¹ Lincoln University, Canterbury, New Zealand.² CSIRO Indooroopilly, Queensland. Australian Society of Agronomy. <http://www.regional.org.au/au/asa/2001/6/d/moot.htm>.
- Monteith, J. L. 1996. The quest for balance in crop modeling. *Agronomy Journal* 88, 695-697.
- Morton, J. 1987. Cape Gooseberry. En: *Fruits of warm climates*. Julia F. Morton, Miami, FL. pp. 430–434.
- Mullahey, J. J., Waller, S. S. & Moser, L. E. 1990. Defoliation effects on production and morphological development of little bluestem. *J. Range Manage* 43, 497–500.

- Mullahey, J. J., Waller, S. S. & Moser, L. E. 1991. Defoliation effects on yield and bud and tiller numbers of two sandhill grasses. *J. Range Manage* 44, 241–245.
- Mullins, M. G., Bouquet, A. & Williams, L. E. 1992. *Biology of the grapevine*. Cambridge University, New York, 239 p.
- Mutsaers, H. J. W. & Wang, Z. 1999. Forum: Are Simulation Models Ready for Agricultural Research in Developing Countries?. *Agron. J.* 91, 1-4.
- National Research Council. 1989. *Lost crops of the Incas: Little known plants of the Andes with promise for worldwide cultivation*. National Academic Press, Washington, D.C. pp. 241-251.
- O'Connell, M. G., O'Leary, G. J., Whitfield, D. M. & Connor, D. J. 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(2/3), 111-124.
- Ortega, S. O., Lozano, P., Moreno, Y., & León, L. 2002. Desarrollo de modelos predictivos de fenología y evolución de madurez en vid para vino cv. Cabernet Sauvignon y Chardonnay. *Agricultura Técnica (Chile)* 62, (1), 27 -37.
- Passioura, J. B. 1996. Simulation models: Science, snake oil, education, or engineering. *Agronomy Journal* 88, 690-694.
- Pedro, M., Camargo, J., De Moraes, M. B. P. & De Camargo, A. V. 2004. Base-temperature, growing degree-days and crop growth cycle duration of triticale cultivars. *Bragantia* 63 (3), 447-453.
- Penning de Vries, F. W. T., Jansen, D. M., Berger, H. F. M. & Bakema, A. 1989. *Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops*. Wageningen, Pudoc. 271 p. (Simulation monographs No 29).
- Penning de Vries, F. W. T. & Spitters, C. J. T. 1991. The potential for improvement in crop yield simulation. En Muchow, R.S., & Bellamy, J.A. (eds.). *Climatic risk in crop production: Models and management for semiarid tropics and subtropics*. eds. Muchow, RC & Bellamy, JA), pp. 511–525 CAB International, Wallingford, UK.
- Perez, A. E. 1986. *Plantas utiles de Colombia*. Editorial Sucesores Vadeneira, Madrid. pp. 707-708.
- Prusinkiewicz, P. 2004a. Art and science for life: Designing and growing virtual plants with L-systems. *Acta Horticulturae* 630, 15–28.
- Prusinkiewicz, P. 2004b Modeling plant growth and development *Current Opinion in Plant Biology* 7 (1), 79-83.

- Reddy, K. J., Hodges, H. F. & McKinion, J. M. 1997. Crop modelling and applications: A cotton example. *Adv. Agron.* 59, 226–290.
- Reddy, V. & Pachepsy, Y. A. 2002. Temperature effects on node development rates in Cotton. *Annals Of Botany* 31, 101-111.
- Reffy, P de, Blaise, F. & Houllier, F. 1998. Modelling plant growth and architecture: Some recent advances and applications to agronomy and forestry. *Acta Hort.* 456, 105-112.
- Ritchie, J. T. & NeSmith, D. S. 1991. Temperature of crop development. En Hanks, J. & Richie, J. T. (eds.). *Modeling plant and soil systems*. Madison, WI: American Society of Agronomy, pp 5-25.
- Robertson, M. J, Carberry, P. S., Huth, N. I, Turpin, J.E., Probert, M. E., Poulton, P. L., Bell, M., Wright, G. C., Yeates, S. J. & Brinsmead, R. B. 2002. Simulation of growth and development of diverse legume species in APSIM. *Australian Journal of Agricultural Research* 53, 429-446.
- Roche, R., Jeuffroy, M. H. & Ney, B. 1998. A model to simulate the final number of reproductive nodes in pea (*Pisum sativum* L.). *Annals of Botany* 81, 545-555.
- Romero, R. 1991. Frutas silvestres de Colombia. Instituto Colombiano de Cultura Hispanica. Bogotá. pp. 458-460.
- Rosati, A. & Dejong, T. M. 2003. Estimating photosynthetic radiation use efficiency using incident light and photosynthesis of individual leaves. *Annals of Botany* 91, 869-877.
- Salazar, M. R., Chaves, B., Jones, J. W. & Cooman, A. 2005. Modelo potencial de producción de uchuva (*Physalis peruviana* L). *Memorias XXXV Congreso anual de la Sociedad Colombiana de Control de Malezas y Fisiología Vegetal*, Medellín. p. 26.
- Saltelli, A., Chang, K. & Scott, M. (eds.). 2000a. *Sensitivity Analysis*. J. Wiley & Sons, Chichester, England. 475 p.
- Saltelli, A., Tarantola, S. & Campolongo, F. 2000b. Sensitivity analysis as an ingredient of modeling. *Statistical Science* 15 (4), 377–395.
- Sanderson, M. A. & Wolf, D. D. 1995a. Morphological development of switchgrass in diverse environments. *Agron. J.* 87:908–
- Sanderson, M. A. & Wolf, D. D. 1995b. Switchgrass biomass composition during morphological development in diverse environments. *Crop Sci.* 35, 1432–1438.

SAS Institute Inc., 2003. The GLM procedure. SAS/STAT User's quick start guide, Version 9.1. & Online support. Copyright (c) 2002-2003 by SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.

SAS Institute Inc., 2003. The NLIN procedure. SAS/STAT User's quick start guide, Version 9.1. & Online support. Copyright (c) 2002-2003 by SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.

Schneider A. A. & Miller, J. R. 1981. Description of sunflower growth stages. *Crop Science*. 21, 901-903.

Scholberg, J., McNeal, B. L., Jones, J. W., Boote, K. J., Stanley, C. D. & Obreza, T. A. 2000. Growth and canopy characteristics of field-grown tomato. *Agron. J.* 92, 152–159.

Schwartz, M. D. 1999. Advancing to full bloom: planning phenological research for the 21st century. *International Journal of Biometeorology* Publisher: Springer Berlin / Heidelberg Volume 42, Number 3 pp113 - 118

Setiyono, T., Dobermann, A. Weiss, A., Specht, J. & Bastidas., A. 2005. Soybean phenology: Simulating node-appearance (V-Stages) using non-linear temperature and chronological function related to reproductive stage.¹ Department of Agronomy and Horticulture, University of Nebraska-Lincoln. The ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings November 6-10, 2005). Salt Lake City, UT School of Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln. This presentation is part of 135: Modeling Plant Growth and Yield

SIM Sistema de Información de Mercados. 2000. Precios Internacionales #23.Mayo. <http://www.cci.org.co/informacion/sim.html>.

SIM Sistema de Información de Mercados. 2001. Perfil del producto #13.Septiembre. <http://www.cci.org.co/informacion/sim.html>.

SIM Sistema de Información de Mercados. 2005. Perfil del producto #34. <http://www.cci.org.co/informacion/sim.html>.

SIM Sistema de Información de Mercados. 2006. Reportes e Informes. Información de Monitoreo Internacional. Uchuva Fresco. Febrero-Marzo. <http://www.cci.org.co/informacion/sim.html>.

Sitte, P., Ziegler, H., Ehrendorfer, F. & Bresinsky, A. 1999. *Lehrbuch der Botanik*, 34. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1007 pp.

Slafer, G. A., & Savin, R. 1991. Developmental base temperature in different phenological phases of wheat (*Triticum aestivum*). *J. Exp. Bot.* 42, 1077–1082.

- Spitters, C. J. T., van Keulen, H. & van Kraalingen, D. W. G. 1989. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS 87. pp.147-181. En: Rabbinge, R., Ward, A. S. & van Laar H. H. (eds.). Simulation and Systems Management in Crop Prediction. Simulation Monographs 32, Pudac, Wageningen. Pp. 147-181.
- Spitters, C.J.T., & Schapendock. A.H.C.M., 1990. Evaluation of breeding strategies for drought tolerance in potato by means of crop growth simulation . Plant and soil 123:193-203.
- Stapper, M. 2001. Variation in phenology of wheat genotypes grown at different temperatures under similar photoperiod in Southern. NSW. CSIRO Plant Industry, Canberra, ACT. Proceedings of the Australian Agronomy Conference, Australian Society of Agronomy. <http://www.regional.org.au/au/asa/2001/p/4/stapper.htm?print=1>.
- Stockle, C. O., Donatelli, M. & Nelson, R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. Eur. J. Agron. 18 (3-4), 289-307.
- Suojala, T. 2000 Pre- and postharvest development of carrot yield and quality. Academic Dissertation. University of Helsinki, Department of Plant Production, Section of Horticulture.
- Tinker, R. F. 1998. The importance of dynamic modeling. Teaching theory building. Cambridge, MA. Report based on results of the TERC Modeling Project funded by the National Science Foundation grant MDR-8550373.
- Thornley, J. H. M. & Johnson, H. R. 1990. Plant and crop modelling. Clarendon Press, Oxford.
- Torres R., E. 1995. Agrometeorología. Editorial Trillas, México, D.F. 154 p.
- Tsuji, G. Y. 1998. Network management and information dissemination for agrotechnology transfer. En: Tsuji, G. Y. Hoogenboom, G. & Thornton, P. K. (eds.) Understanding Options for Agricultural Production.. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. p. 367-383.
- Valencia, M. L. 1985. Anatomía del fruto de la uchuva. Acta Biológica Colombiana 1(2), 63-89.
- Van Henten, E. J. 1994. Validation of a dynamic lettuce growth model for green house climate control. Agric. Syst.45, 55-72.
- Van Ittersum, M. K., Leffelaar, P. A., van Keulen, H., Kropff, M. J., Bastiaans, L. & Goudrian, J. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. Eur. J. Agron. 18 (3-4), 201-234.
- Vanderlip, R. L. & Reeves, H. E. 1972. Growth stages of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.). Agron. J. 64, 13-16.

Verdoodt, A., Ranst, E. V. & Ye, L. 2004. Daily simulation of potential dry matter production of annual field crops in tropical environments. *Agron. J.* 96, 1739-1753.

Verghis, T. I., Mcknzie, B. A. & Hill, G. D. 1999. Phenological development of chickpeas (*Cicer arietinum*) in Canterbury, New Zealand. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 27, 249-256.

Verheij, E. W. M. & Coronel, R. E. (eds.). 1991. Plant resources of south- East Asia. Editorial Pudoc, Wageningen, pp. 254-256.

Viator, R. P., Nuti, R. C., Edmisten, K. & Wells, R. 2005. Predicting cotton boll maturation period using degree days and other climatic factors. *Agronomy Journal* 97, 494-499.

Waldren, R. P. & Flowerday, A. D. 1979. Growth stages and distribution of dry matter, N, P and K in winter wheat. *Agron. J.* 71, 391-397.

Wagenvoort, W. A. & Bierhuizen, J. F. 1977. Some aspects of seed germination in vegetables. II. The effect of temperature fluctuation, depth of sowing, seed size and cultivar, on heat sum and minimum temperature for germination. *Scientia Horticulturae* 6, 259-270.

Williams, D. W., Andris, H. L., Beede, R. H., Luvisi, D. A., Norton, M. V. K., & Williams, L. E. 1985. Validation of a model for the growth and development of the Thompson Seedless grapevine. II. Phenology. *Am. J. Enol. Vitic.* 36, 283-289.

Wilson, L. T. & Barnett, W. W. 1983. Degree-days: an aid in crop and pest management. *Calif. Agric.* 37, 1-2, 4-6.

Windauer, L. B., Slafer, G. A. & Ravetta, D. A. 2004. Phenological responses to temperature of an annual and perennial *Lesquerella* species. *Annals of Botany* 94, 139-144.

Whisler, F. D., Acock, B., Baker, D. N., Fye, R. E., Hodges, H. F., Lambert, J. R., Lemmon, H. E., McKinion, J. M. & Reddy, V. R. 1986. Crop simulation models in agronomic systems. *Adv. Agron.* 40, 141-208.

Wolff, X. Y. 1991. Species, cultivar, and soil amendments influence fruit production of two *Physalis species*. *HortScience* 26 (12), 1558-1559.

Yan, W. & Hunt, L. A. 1999. An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. *Annals of Botany* 84, 607-614.

Yin, X., Kropff, M. J., McLaren, G. & Visperas, R. M. 1995. A nonlinear model for crop development as a function of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* 77, 1-16.