

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS (IICBA)

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
(CIICAp)**

**"DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO
MATEMÁTICO EN UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE
TOMATE DE DOS PLANTAS POR CONTENEDOR A DOS
RACIMOS BAJO CUBIERTA PLÁSTICA"**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

OPCIÓN TERMINAL EN TECNOLOGÍA

DE MATERIALES

PRESENTA:

M.E.M. LUZ ELVA MARÍN VACA

DIRECTOR INTERNO: DRA. MARTHA LILIA DOMÍNGUEZ PATIÑO

DIRECTOR EXTERNO: DR. OSCAR VILLEGAS TORRES

SINODALES: DRA. ROSA MARÍA MELGOZA ALEMÁN.

DR. JOSÉ ALFREDO RODRÍGUEZ RAMÍREZ.

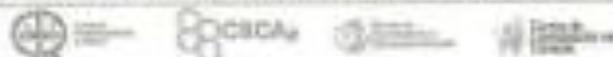
DR. ANTONIO RODRÍGUEZ MARTÍNEZ.

DR. JOSÉ GONZALO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ.

DR. RENÉ GUARDÍAN TAPIA.

CUERNAVACA, MOR.

MAYO, 2019



Cuernavaca, Morelos, a 23 de noviembre de 2017.

DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ
COORDINADOR DE POSGRADO
EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
PRESENTE

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada "DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO EN UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE TOMATE DE DOS PLANTAS POR CONTENEDOR A DOS RACIMOS BAJO CUBIERTA PLÁSTICA" que presenta la alumna MARÍN VACA LUZ ELVA, para obtener el título de DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS con opción terminal en TECNOLOGÍA DE MATERIALES.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DRA. ROSA MARÍA MELGOZA ALEMÁN	Aprobado	
DR. JOSÉ ALFREDO RODRÍGUEZ RAMÍREZ	Aprobado	
DR. ANTONIO RODRÍGUEZ MARTÍNEZ	Aprobado	
DR. JOSÉ GONZALO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ	Aprobado	
DR. OSCAR VILLEGAS TORRES	Aprobado	
DR. RENÉ GUARDIÁN TAPIA	Aprobado	
DRA. MARTHA LILIA DOMÍNGUEZ PATIÑO	Aprobado	

PLAZO PARA LA REVISIÓN 30 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTIÓN DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEREMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.



RESUMEN



Dentro de las hortalizas de fruto, el tomate rojo (*Lycopersicon esculentum*) es la de mayor trascendencia en muchos países, en México la mayor producción de las superficies sembradas se encuentra en áreas protegidas o invernaderos, en sistema hidropónico. En la actualidad en el estado de Morelos, se ha diversificado incorporando nuevas técnicas, utilizando invernaderos o agricultura protegida que tiene como finalidad evitar las restricciones que el medio impone al desarrollo de las plantas, ayudando a generar condiciones ambientales óptimas para el desarrollo del cultivo. Para la medición de rendimiento en los cultivos se requiere de modelos matemáticos que simulen un crecimiento y desarrollo de este, lo cual permite reducir costos elevados a los productores. En este trabajo se presenta un análisis de crecimiento de tomate estableciendo tres siembras en alta densidad ($18.16 \text{ plantas m}^{-2}$) con despunte a dos racimos en sistema hidropónico bajo cubierta plástica; debido a que la duración del ciclo es aproximadamente de 4 meses desde el desarrollo de la plántula, en el que se generaron las curvas de crecimiento de los diferentes órganos de la planta. Realizando el estado del arte y dando seguimiento a una siembra prototipo para conocer el comportamiento del crecimiento y desarrollo de fruto de tomate para definir las variables a medir y establecer la metodología; las variables se establecen en tres etapas, la primera que es limpieza del invernadero, la segunda que es la siembra llevando a cabo un muestreo aleatorio simple semanal de área foliar, hasta que da inicio la etapa reproductiva en la cual se midió el diámetro longitudinal y ecuatorial y peso del fruto así como la biomasa de estas variables, en la última etapa se

realiza un análisis estadísticos de los resultados para realizar el modelo matemático y su validación que permita planear, hacia el futuro su producción. En modelo se desarrolla considerando a la temperatura como una variable independiente que está íntimamente relacionada con las demás variables del modelo, lo que posibilita manejar el tamaño del fruto como una variable que determina el rendimiento promedio por planta de 1.531 kg/planta en condiciones óptimas para hacer cálculos por metro cuadrado y por hectárea. Considerando estas variables obtenemos el modelo logarítmico exponencial considerando a la temperatura como el factor más importante en el desarrollo y crecimiento de planta y fruto del tomate, el cultivo se puede llevar acabo en cualquier región lo cual se concluye con la validación del modelo no dejando de ser importantes los demás factores fenológicos y fisiológicos de la planta de tomate. Con este modelo matemático la producción de tomate híbrido tipo saladette reducirá estudios costosos para obtener niveles óptimos de producción, sin embargo, hay mucho que hacer de investigación para ajustar más el modelo.

ABSTRACT



Among the fruit vegetables, red tomato (*Lycopersicon esculentum*) is the most important vegetable in many countries, such as Mexico, where the highest production of the areas planted in greenhouses occurs with the hydroponic system. At present, the systems of production of tomato in the state of Morelos, have diversified incorporating new technologies; Using greenhouses or protected agriculture that have the purpose of avoiding the restrictions that the environment imposes on the development of the plants, helps to generate optimum environmental conditions for the development of crops. For the measurement of crop yields, mathematical models are required to simulate the growth and development of the crop, the models in vegetables allow to test scientific hypotheses, in addition, they have potential applications, both in education and in the practice of horticulture and research. We propose a mathematical model based on the TOMSIM simulator that has been used to generate optimal CO₂ enrichment control strategies in greenhouse grown tomatoes oriented to simulate the weekly production of the tomato crop. The most important stages of performance development are the average transmission of radiation by the greenhouse, the interception of radiation by the vegetation cover (depending on the leaf area index) and its conversion into biomass (which depends in particular on the amount of CO₂ And the distribution of a fraction of this biomass in the fruits) allows to plan, in the future, its production. The development of the fruit is modeled separately from the growth in biomass, which makes it possible to manage the size as a variable in the present work. The variables are measured as: leaf area, dry mass of leaf area, longitudinal diameter, diameter

Fruit length and fruit dry mass, in order to advance in the development of tomato quality, it is necessary to analyze the fruit as a system, making use of the physiological and phenological variables to improve the yield of one Tomato saladette type hybrid, created with characteristics strengthened in the production for use of this region. With this, a mathematical model was developed that will help us to predict the production of hybrid tomato saladette type. The proposed model is adjusted and varies according to the expected yield of the crops, following a sigmoid curve with decreasing yields when approaching the optimal levels; however, there is much research that must be done to further adjust the model.

All this we explain so that the farmer does not take the results emitted by the computer as absolute truths and has the criterion and the capacity to vary what expressed their depending on the behavior of the crops and what he observes in the field. With this mathematical model the production of hybrid tomato type saladette will reduce expensive studies to obtain optimum levels of production, however, there is much research to be done to further adjust the model.

AGRADECIMIENTOS



Dios por darme la fe y la fortaleza para concluir este trabajo.

Al SITUAEM, por su apoyo incansable brindado durante la realización desde el inicio de este proyecto hasta su culminación.

A mi asesora la Dra. Martha Lilia Domínguez Patiño, por sus conocimientos invaluable, su apoyo y paciencia brindada para concluir esta investigación.

A mi comité tutorial, La Dra. Rosa Ma. Melgoza Alemán, el Dr. Oscar Villegas Torres, el Dr. Antonio Rodríguez Martínez, Dr. José Gonzalo González Rodríguez, Dr. René Guardián Tapia, y Dr. José Alfredo Rodríguez Ramírez, por tiempo y dedicación para compartir sus conocimientos y valiosa contribución en este proyecto.

A aquellas personas que hicieron posible en aulas y el Campo Experimental, siempre dispuestos a compartir sus conocimientos a lo largo de este trabajo.

A mis compañeros Nadia Lara y Miguel Aguilar, por su solidaridad, trabajo en equipo y amistad.

A Sócrates por ser apoyo en asesorías, y además por ser un gran amigo.

A la M.E.M. María del Carmen Magadán Salazar por su apoyo y cariño.

A mi hija, Aida Márquez Marín, por su comprensión, apoyo y amor infinito, incondicional e incansable durante este caminar.

A Gabriel Márquez Romero por su apoyo absoluto e incondicional en mis estudios durante este proyecto.

A mi mamá y mis hermanos por creer en mí y en mis expectativas.

ÍNDICE



CAPÍTULO I: ANTECEDENTES	15
INTRODUCCIÓN	15
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.2 JUSTIFICACIÓN	20
1.3 HIPÓTESIS	22
1.4 ORIGEN Y DESCRIPCIÓN DEL TOMATE	22
1.4.1 Hidroponía	30
1.5 OBJETIVOS	34
1.5.1 OBJETIVO GENERAL	34
1.5.2 OBJETIVOS PARTICULARES	34
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	35
INTRODUCCIÓN	35
2.1 MODELOS MATEMÁTICOS	35
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS	37
2.3 FUNCIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS	41
2.4 INVERNADERO	42
2.5 MODELO DE CRECIMIENTO EN TOMATE	45
2.6 ECUACIONES DEL MODELO MATEMÁTICO LOGARÍTMICO- POTENCIAL	50
2.7 ECUACIONES DEL MODELO DE VALIDACIÓN	51
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	53
3.1. MATERIALES Y EQUIPO	55
3.2. MATERIAL VEGETATIVO	62
3.3. TRASPLANTE	63
3.4 VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA EN LAS ETAPAS DE PRODUCCIÓN DE TOMATE.	69

3.5 MUESTREO	76
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	78
INTRODUCCIÓN.....	78
4.1 SISTEMA DE PRODUCCIÓN	78
4.3 VALORES SIMULADOS	86
4.4 COMPARACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO CON VALORES REALES QUE RESULTAN DEL EXPERIMENTO.....	88
4.5 VALIDACIÓN DEL MODELO.....	93
4.6 RENDIMIENTO TOTAL DE TOMATE ROJO TIPO SALADETTE.....	96
4.6.1 Primera siembra	96
4.6.2 Segunda siembra	97
4.6.3 Tercera siembra.....	97
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
ANEXO 1	124

LISTA DE TABLAS



Tabla 3.1 Nomenclaturas y subíndice de los diagramas de flujo	71
Tabla 3.2 Variables consideradas en cada etapa de producción del tomate rojo.	72
Tabla 3.3 Factores abióticos de la planta de tomate.	73
Tabla 3.4 Matriz de relación de variables de crecimiento y variables de componente de respuesta.....	74
Tabla 3.5 Componentes de respuesta	74
Tabla 4.1 Rendimientos por siembra de los diferentes ciclos	98
Tabla Anexo 1.1 Evaluación de las tres siembras de tomate rojo determinado tipo Saladette en invernadero.	124
Tabla Anexo 1.2 Comparación de tres siembras de tomate rojo tipo Saladette de materia seca de área foliar y fruto.....	126
Tabla Anexo 1.3 Peso, diámetro ecuatorial y longitudinal de fruto.	126
Figura Anexo 1. temperaturas de las tres siembras de cultivo.	128
Tabla Anexo 1.4 Máximos mínimos y promedios de temperatura.	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Clasificación taxonómica del tomate tomada de (Garza, 1985 Jones et al., 1997; Hunziker 1979,)	24
Figura 2.1 Esquema para la construcción de un modelo de Mario de Bunge (Bunge,1975)	38
Figura 2.2 Clasificación de los modelos obtenidos.	39
Figura. 3.1 Diagrama de etapas del desarrollo de la metodología de acondicionamiento del invernadero y trasplante y tutorio del proyecto de la investigación.	54
Figura 3.2 Diagrama de etapas III, variables, muestreo, análisis y resultados del desarrollo del modelo.	55
Figura 3.3 a) contenedores de sustrato para trasplante de plántula y b) distribución de riego para 4 contenedores	56
Figura 3.4 Diagrama de actividades para aislar el área de producción plagas e infección.	57
Figura 3.5 Vista frontal de invernadero (a) y cinta polypatch (b).	57
Figura 3.6. Siembra de semillas de tomate Saladette tipo Pony Express F1	58
Figura 3.7. Datalogger es equipo que registra la temperatura durante todo el ciclo de siembra.	59
Figura 3.8. Plántula 30 días después del trasplante presentando un crecimiento uniforme.	59
Figura 3.9 Temporizador (taimer) equipo para programar riegos	60
Figura 3.10 Spab equipo para medir área foliar.	60
Figura 3.11 Estufa de circulación forzada de aire (LUZEREN® DGH9070A)	61
Figura 3.12 Balanza analítica	61
Figura 3.13 Vernier digital con medida en mm.	62
Figura 3.14 Plántula de tomate con 5 hojas verdaderas.	63

Figura 3.15 Diagrama de etapas fenológicas de tomate determinado con despunte a dos racimos.	64
Figura 3.16 Crecimiento vegetativo, primera etapa de tomate después de trasplante.	64
Figura 3.17 Primer racimo floral de tomate Saladette determinado cultivado en invernadero.	65
Figura 3.18 Corte del tercer racimo previo al despunte en tomate Saladette determinado.	65
Figura 3.19 Tutorio con guía para la planta de tomate determinado.	66
Figura 3.20 Raleo de frutos de tomate Saladette determinado a cuatro frutos por racimos, considerando dos racimos por planta.	67
Figura 3.21 Racimo de tomate Saladette determinado en cuatro frutos por racimo.	68
Figura.3.22 Última etapa de experimentación de tomate rojo en estado de maduración de frutos.	69
Figura 3.23. Diagrama de flujo de etapa vegetativa	70
Figura 3.24 Diagrama de flujo de etapa reproductiva	70
Figura 3.25. Diagrama de flujo desarrollo de fruto.	71
Figura 4.1 Secuencia y tiempo de riegos por etapa	79
Figura 4.2. Corte de tallos axilares y brotes laterales (a), y amarre de fruto (b).	79
Figura 4.3 Sistema del modelo con variables de entrada y salida del conjunto de ecuaciones del modelo.	84
Figura 4.4 Modelo simulado del desarrollo y crecimiento del tomate en Simulink	85
Figura 4.5. Número de nodos por planta en la simulación a 90 días	86
Figura. 4.6 Nodos de una planta	87
Figura 4.7 El índice de área foliar en la simulación durante 90 días.	87
Figura 4.8 Desarrollo de área foliar (AF) en crecimiento de la planta para tomate	89
Figura 4.9. Masa seca de área foliar corregir este grafico	90
Figura 4.10 Crecimiento del fruto de tomate.	91
Figura 4.11. Diámetro longitudinal del fruto de tomate	92
Figura 4.12. Diámetro del fruto de tomate	92

Figura 4.13 Número de nodos por planta de TOMGRO	93
Figura 4.14 Índice de área foliar de TOMGRO.....	94
Figura 4.15 Crecimiento del área foliar TOMGRO.....	95
Figura Anexo 1. temperaturas de las tres siembras de cultivo.	128

CAPÍTULO I: ANTECEDENTES



INTRODUCCIÓN

El tomate rojo (*Lycopersicon esculentum* Mill.) es la hortaliza de mayor trascendencia en muchos países, incluyendo México (Velázquez, 2011) que ha adquirido importancia económica en todo el mundo (Nuez y Esquinas, 2001).

Dentro de las hortalizas de fruto, el tomate rojo es de mayor producción en la mayoría de las superficies sembradas en invernaderos con el sistema hidropónico (Espinoza, 2008), el cual requiere de ciertas condiciones y medios para llevarse a cabo (Ortega *et al.*, 2010). Las nuevas tendencias hacia la producción anticipada o fuera de estación, es el uso de invernaderos o agricultura protegida, tienen la finalidad de evitar las restricciones que el medio impone al desarrollo de las plantas, para generar condiciones ambientales óptimas para el desarrollo de cultivos de acuerdo con los requerimientos climáticos que se necesitan (López *et al.*, 2011). Estas tendencias de producción han involucrado las cubiertas plásticas, riego por goteo, fertirriego y sistemas hidropónicos, con el fin de incrementar el rendimiento, siendo el sistema hidropónico, el que ofrece un mayor control de los factores bióticos y abióticos para la producción de hortalizas (Howard, 1998; Robles, 1999).

Para mejorar el rendimiento y calidad de hortalizas cultivadas en invernadero, es necesario controlar y optimizar las variables ambientales. Para la medición de rendimientos en los cultivos se requieren modelos matemáticos que simulen el crecimiento y desarrollo del cultivo (Martínez *et*

al., 2002). Los usos de los modelos matemáticos para hortalizas permiten evaluar estrategias del manejo posible de un invernadero sin necesidad de llevar a cabo experimentos costosos. Bannayan y Crout (1999) describen los modelos como la función de investigar y profundizar el entendimiento de la fisiología del crecimiento y desarrollo, para proponer nuevas estrategias de manejo de cualquier cultivo, mientras que Cruz *et al.*, (1994) mencionan, que los modelos en hortalizas permiten probar hipótesis científicas, además, tienen aplicaciones potenciales, tanto en educación como en la práctica de la horticultura. Los modelos de simulación se clasifican en dos grandes grupos: empíricos y mecanicistas.

- Los modelos empíricos: Son descriptivos, se derivan de datos observados sin involucrar procesos fisiológicos y tienen escasa capacidad explicativa.
- Los modelos mecanicistas: Poseen capacidad explicativa de la fisiología del cultivo, porque consideran aspectos como temperatura, radiación fotosintéticamente activa, índice de área foliar, fotosíntesis, respiración y eficiencia en el uso de la radiación (Peart y Bruce, 1998).

En los últimos años, se han desarrollado modelos matemáticos para hortalizas cultivadas en condiciones de invernadero. Gary *et al.* (1998) reportaron que el número de especies estudiadas por medio de modelos abarcan 25 de frutales,

23 de vegetales cultivadas a campo abierto, 20 ornamentales y 4 especies vegetales cultivadas en invernadero. Una de las hortalizas más estudiadas, es el tomate rojo que representa la mitad de las referencias sobre vegetales modelados en invernadero (Cruz *et al.*, 1994). De Koning (1994) desarrolló un modelo para predecir la distribución de materia seca en tomate con crecimiento indeterminado, cultivado en invernaderos, sin involucrar procesos

fisiológicos. El modelo es capaz de predecir en forma razonable la formación de racimos, periodo de crecimiento del fruto y la distribución de materia seca. Sin embargo, la predicción del número de frutos por racimo no fue aceptable. No obstante, este modelo ha sido usado como base para el desarrollo de modelos simplificados que pueden ser usados en investigaciones de optimización y control óptimo del clima del invernadero (Tap, 2000).

“Tomato Simulator” (Simulador de tomate, TOMSIM) (Heuvelink 1995, 1996,1999) es un modelo tipo explicativo con estructura modular, el cual simula crecimiento y desarrollo de tomate. El modelo fue validado, con diferentes fechas de plantación, densidad de plantas y conjuntos de datos de invernaderos comerciales, es importante este tipo de cultivos ya que cubre una estación completa de crecimiento, mientras que los experimentos sólo se evalúan hasta 100 días después de la plantación. Heuvelink (1996) estudió las respuestas en el crecimiento y producción de tomate en clima de invernadero (radiación, temperatura, concentración de CO₂) y manejo del cultivo (densidad de población y poda de frutos). El modelo TOMSIM predice producción de materia seca de acuerdo con el modelo para cultivos en invernadero propuesto por Gijzen (1992), el cual, a su vez, está basado en el clásico modelo de crecimiento potencial de cultivos SUCROS y un módulo para fotosíntesis foliar desarrollado por Goudriaan y Laar (1994). En TOMSIM la tasa de crecimiento potencial es simulada, basándose en la tasa de fotosíntesis foliar, la intercepción de luz, tasa de respiración de mantenimiento y la eficiencia de la conversión de carbohidratos a materia seca estructural. Las predicciones resultaron aceptables comparadas, con las mediciones; sin embargo, la simulación del área específica de hoja, aborto de flores y frutos no fueron muy precisos (Cruz *et al.*, 1994). Finalmente, TOMSIM ha sido usado para generar estrategias de control óptimo de enriquecimiento de CO₂ en tomates cultivados en invernadero (Chalabi *et al.*, 2002a; Chalabi *et al.*, 2002b).

El modelo “Tompousse” (Modelo simplificado para tomate, TOMPOUSSE) (Gary *et al.*, 1996; Abreu *et al.*, 2000;) está orientado a simular la producción semanal del cultivo de tomate. Las etapas más importantes de elaboración de rendimiento son la transmisión promedio de radiación por el invernadero, la intercepción de radiación por la cubierta vegetal (que depende del índice de área foliar) y su conversión en biomasa (que depende en particular de la cantidad de CO₂ y de la distribución de una fracción de esta biomasa en los frutos). El modelo permite simular en forma adecuada las curvas de producción bajo condiciones climáticas contrastantes como son, la Bretaña Francesa y el Mediterráneo Medio (Gary *et al.*, 1996). “Tompousse” ha sido adaptado a invernaderos de plástico sin calefacción en Portugal y predice, la producción semanal en términos de número y peso fresco de frutos cosechados. Esos datos son importantes para los agricultores porque, ello les permite planear, hacia el futuro, el mercado de su producción. Este modelo requiere poca cantidad de datos climáticos y del cultivo (Cruz *et al.*, 1994).

TOMGRO (Jones *et al.*, 1991) es un modelo mecanicista complejo con 69 variables como temperatura, radiación solar y concentración de CO₂ para tomate, el cual permite la modelación de crecimiento y desarrollo individual de órganos de la planta, logrando, así simulaciones precisas del número y peso de frutos por racimo. También se le han hecho adecuaciones para describir con más precisión la expansión de área foliar y un mejoramiento a su interfaz con el usuario, lo cual especifica valores de parámetros y condiciones iniciales antes de la simulación (Gary *et al.*, 1995). Sin embargo, la última versión de TOMGRO v3.0, está compuesta de 574 variables de estado, simula con gran detalle el desarrollo de los frutos ya que cada fruto tiene posiciones específicas respecto al número de racimo y también la posición del fruto. Se modela el desarrollo del fruto de manera separada del crecimiento en biomasa, lo que posibilita manejar el tamaño como una

variable (Kenig y Jones, 1997). Jones *et al.* (1999) propusieron un modelo relativamente simple para el cultivo de tomate, el cual presenta un comportamiento similar al modelo TOMGRO complejo, pero con gran ventaja, de tener solo cinco variables de estado: número de nodos del tallo principal, índice de área foliar, peso total de la planta, peso del fruto y peso del fruto maduro.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El tomate rojo es la aportación vegetal de México más extendida en el orbe. Su incorporación gastronómica en nuestro país es tan importante como otras hortalizas en otros países. El grado de aceptación que tiene en las diversas culturas del mundo se evidencia, por el hecho de que es el segundo producto hortícola de mayor consumo mundial. Además, de que la agricultura genera empleos constantes y se introduce en cada una de las fases de la cadena agroalimentaria.

La cuantificación de rendimiento del cultivo de tomate ayudará al productor a determinar el aprovechamiento del área cultivada, por esto, es indispensable contar con un modelo matemático que simule y prediga los resultados en la producción. Por lo tanto, en este trabajo se plantea un modelo matemático basado en el simulador de TOMSIM (Heuvelink 1995,1996 y 1999), con el fin de determinar el desarrollo de la calidad del tomate, haciendo necesario analizar el fruto como un sistema y determinando las variables fisiológicas y fenológicas, para mejorar el rendimiento del tomate híbrido tipo saladette, creado con características fortalecidas en la producción para uso de esta región. Los modelos matemáticos en las hortalizas permiten probar hipótesis científicas, teniendo aplicación potencial tanto en la adecuación como en la práctica hortícola; permitiendo evaluar estrategias del manejo de invernaderos sin necesidad de llevar a cabo experimentos costosos.

De acuerdo con las pruebas realizadas en los modelos matemáticos, se toma

la opción de trabajar con el modelo matemático logarítmico-potencial, este muestra un diagrama de dispersión que permite el ajuste de la curva para pronosticar resultados óptimos para una mayor producción y determinar el rendimiento por hectáreas, al evaluar un muestreo aleatorio simple con método destructivo cada semana a partir del inicio del trasplante hasta floración en el desarrollo del fruto del tomate con crecimiento determinado despuntando a dos racimos por planta. Como no existe una metodología para el desarrollo de cultivo de acuerdo con observaciones previas en una producción prototipo se realizará un diagrama de acondicionamiento de invernadero y otro de proceso de producción, lo cual facilitará el trabajo a los operarios que estén inmersos en esta actividad, hacerlo de manera secuencial, verificando el avance tomando decisiones para un crecimiento de calidad del fruto.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Los modelos matemáticos, hoy en día permiten la optimización de procesos de producción con base en el conocimiento de las variables de mayor relevancia y los mecanismos de mejora. En la agricultura, estos modelos son poco utilizados en la mayoría de los casos por la poca información sobre su uso. Son una herramienta disponible que permite traducir ciclos biológicos, estos realizan análisis de crecimiento, evaluando las estrategias productivas y los pronósticos del rendimiento de los cultivos.

Los modelos son herramientas poderosas, para probar hipótesis, sintetizar conocimiento y entender complejos sistemas, así como comparar diferentes escenarios; además, han sido empleados en sistemas de apoyo en toma de decisiones, control de clima y fertirriego, asimismo para la predicción y planeación de la producción (Heuvelink *et al.*, 2008; Marcelis *et al.*, 2009). Los procesos fisiológicos como la fotosíntesis permiten conocer el

comportamiento de los cultivos bajo ciertas condiciones ambientales de forma efectiva, se cuenta con modelos que llevan a cabo la predicción de manera precisa del comportamiento del proceso (Marcelis *et al.*, 2009).

Se plantea un modelo matemático basado en modelos de TOMSIN y algunos otros para determinar el rendimiento del fruto con plantas de alta densidad fortaleciendo las características de peso del tomate, a dos plantas por contenedor, este modelo es un híbrido de las características de los modelos como: modelos matemáticos, de alta densidad y de forma razonable de tres o más racimos, con la confianza de obtener mayor rendimiento, en el área cultivada, para medir la eficiencia en el pronóstico de resultados, a nivel científico, para describir la realidad y hacer predicciones a futuro. En la agricultura estos pueden ser utilizados para anunciar la conveniencia de trasplantar dos o tres plántulas por contenedor. En este trabajo se describen los retos que se nos presentan al definir modelos matemáticos para su uso en la agricultura y las previsiones que debemos tomar al utilizar estos modelos.

En el presente estudio se diseñar un modelo matemático con predicción al rendimiento de un cultivo de hortaliza. El tomate rojo (*Lycopersicon esculentum* Mill.) es la hortaliza de mayor comercialización y de gran importancia en México, además de ser uno de los cultivos más estudiados como se ha ido mencionando. El plantear un modelo matemático óptimo para tomate rojo conlleva una serie de variables adaptables y evaluadas específicamente bajo las condiciones climáticas en las que se encuentra. En México, se puede decir que no existe un control climático dentro de los invernaderos, esto logra dar respuesta a la problemática de los factores ambientales, existen factores que logran predecir determinados rendimientos de un cultivo. La selección de variables nos predice un acercamiento. A la mejora de producción del cultivo en el desarrollo de la planta al evaluar su rendimiento. Un modelo logarítmico-potencial podría predecir el rendimiento

del cultivo, analizado por distintas variables morfológicas al fin de lograr una correlación entre variables que establezcan el crecimiento de la planta desde semillero hasta fructificación.

1.3 HIPÓTESIS

Mediante el desarrollo de un modelo matemático es posible estimar la producción de tomates en un sistema hidropónico.

1.4 ORIGEN Y DESCRIPCIÓN DEL TOMATE

El tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) es una planta perenne, pertenece a la familia Solanáceae (Espinoza, 2008), que incluye otras plantas comestibles domesticadas (chile, papa, berenjena), poco domesticadas (miltomates), no domesticadas, pero de uso tradicional y otras sin ningún uso actual (Catie, 1990). La planta es adaptable a una gama de diversidad de condiciones ambientales, pero también es sensible a heladas, lo que determina su ciclo anual, de distinta duración según la variedad (Rodríguez *et al.*, 2001).

Se desarrollan en un amplio rango de latitudes, tipos de suelos, temperaturas, métodos de cultivo y es moderadamente tolerante a la salinidad (Chamarro, 2001). El tomate cultivado como fruto comestible, se puede consumir fresco o cocinado. Los tomates son muy utilizados como condimentos en la cocina y en la industria como enlatados, en pasta, jugo, polvo, etc. (Nuez, 1995). En su estado verde, son usados para encurtidos y conservas (INTA, 1999; Jarquin, 2004). El origen del tomate se localiza en la región de los andes integrada por Colombia, Bolivia, Chile y Perú, donde existen mayores cambios en genética y abundancia de variedades (INTA, 1999; Espinoza, 2008). En México el tomate, es una de las hortalizas más cultivadas, es conocido por ser el centro más importante de domesticación

(Espinoza, 2008). Sin embargo, se consideraba, como mala hierba entre los huertos (de León, 2009). Sus frutos eran conocidos y empleados como alimento por culturas indígenas que habitaban en el centro y sur de México, la lengua náhuatl lo nombro “tomatl” (Esquinas y Nuez, 2001, Rodríguez *et al.*, 2001), vocablo que se aplicaba genéricamente para plantas, con frutos globosos o bayas, con muchas semillas y pulpa acuosa (Montes y Aguirre, 1992). Actualmente, en el centro del país sigue utilizándose la palabra jitomate, quizás porque los aztecas lo nombraban "Xic-tomatl", para aludir al fruto de *Lycopersicon esculentum* (Cruces, 1990). En 1532, fue introducido, en la lengua castellana el término “Tomate” (Corominas, 1990). Durante el siglo XVI, se consumían en México tomates de distintas formas y tamaños e incluso rojos y amarillos, pero para entonces ya habían sido traídos a España y servían como alimento en España e Italia (Esquinas y Nuez, 2001). En otros países europeos solo se utilizaban para uso medicinal. Los españoles y portugueses difundieron el tomate a Oriente Medio y África, de ahí a otros países asiáticos de Europa a Estados Unidos y Canadá (Ramírez y Sainz, 2006). La clasificación taxonómica del tomate se representa en la figura 1.1

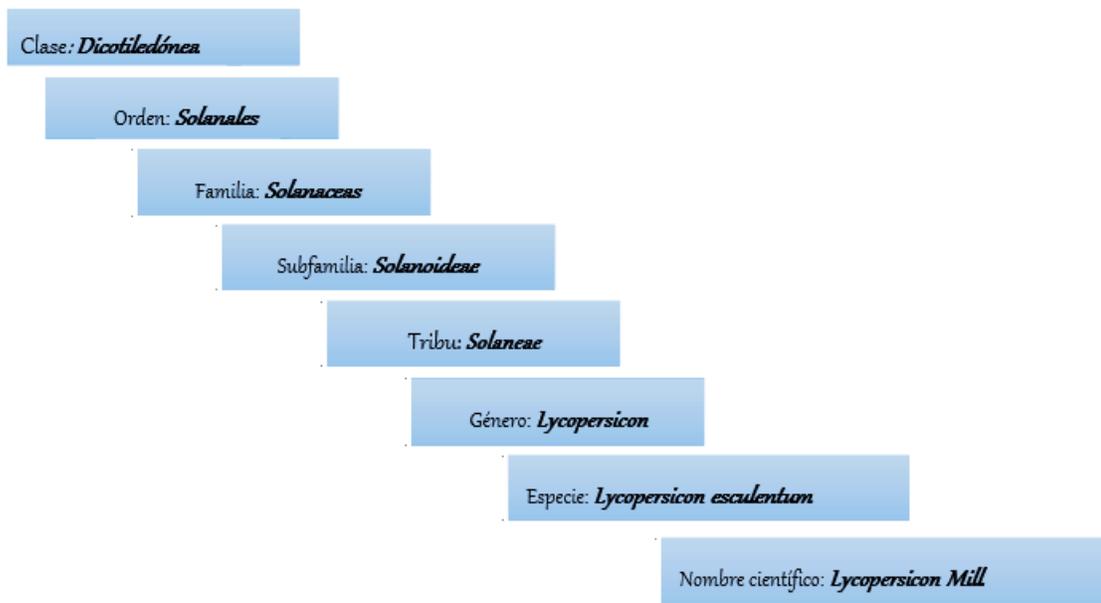


Figura 1.1 Clasificación taxonómica del tomate tomada de (Garza, 1985 Jones *et al.*, 1997; Hunziker 1979,).

El tomate es una especie dicotiledónea pertenecientes a las familias Solanaceas. Esta familia es de las más grandes e importantes entre las angiospermas, comprende unas 2,300 especies agrupadas en 96 géneros (D´ Arcy, 1991). El tomate puede presentar dos hábitos de crecimiento: determinado e indeterminado. La planta indeterminada se caracteriza por tener un crecimiento extensivo, postrado, desordenado y sin límite. A diferencia de la planta determinada que mantiene un crecimiento limitado. El sistema radical del tomate está compuesto por una raíz principal o pivotante (Cardona Martínez, N. 2013), es superficial y está constituido por la raíz principal (corta y débil), raíces secundarias (numerosas y potentes) pelos absorbentes especializados en tomar agua y nutrientes, ocupando los primeros 20 a 25 centímetros del suelo (Flores, 1986). El tallo principal de la planta del tomate es de forma cilíndrica y erecta en sus primeras fases de

crecimiento (De León, 2009) tiene de 2 a 4 cm de diámetro en la base y está cubierto, por pelos glandulares y no glandulares que salen de la epidermis. Sobre el tallo se van desarrollando hojas, tallos secundarios e inflorescencias (Zeidan, 2005); además, tiene la propiedad de emitir raíces dándole mayor anclaje a la planta. La planta presenta hojas compuestas, con un foliolo terminal y de ocho a nueve foliolos laterales, los cuales generalmente son peciolados, lobulados, con borde dentado y recubiertos de pelos glandulares. Las hojas compuestas se insertan sobre los diversos nudos en forma alterna (Jaramillo y Lobo, 1984; Flores, 1986; Zeidan, 2005). Las flores del tomate son perfectas o hermafroditas, constan de cinco o más sépalos y de seis o más pétalos. Son pequeñas y de color amarillo (De León, 2009). Tienen un pistilo con cinco estambres, unidos en sus anteras y formando un tubo que lo encierra, conformación que favorece la autopolinización. Se agrupan en racimos simples, ramificados, el número de flores por racimos es variable (Huerres y Carballo, 1988). Cuando se inicia la floración y las temperaturas son muy altas, se pueden presentar pocas flores por inflorescencia, lo contrario sucede a cuando las temperaturas son bajas, pues pueden presentarse más flores por inflorescencia (Flores, 1986; Zeidan, 2005).

La semilla es pequeña, con dimensiones de 5x4x2 mm (longitud, ancho y grosor). Su coloración es amarillenta con matiz grisáceo; su forma puede ser aplanada, alargada, en forma de riñón, redondeada y pubescente (INTA, 1999). Los procesos fisiológicos de crecimiento y desarrollo de la planta de tomate dependen de las condiciones del clima, del suelo y de las características genéticas de la variedad (Haeff, 1983). La planta se desarrolla bien en un amplio rango de altitudes, tipos de suelos, temperaturas y métodos de cultivo; además, es moderadamente tolerante a la salinidad. El cultivo se desarrolla preferentemente en ambientes cálidos, con buena iluminación y drenaje. La exposición prolongada a temperaturas inferiores a

10 °C, la escarcha, una iluminación diurna inferior a las 12 h, la presencia de un drenaje deficiente en el medio de enraizamiento o un abonado nitrogenado excesivo le afectan desfavorablemente (Nuez, 2001). La fase inicial del tomate comienza con la germinación de semillas, ésta requiere temperaturas entre 18°C y 24°C y extremas entre 8,5°C y 35°C. Emergencia de las plántulas ocurre entre 8 y 10 días después de la siembra; algunas variedades pueden germinar en menos tiempo, dependiendo de las condiciones ambientales (Nounecke, 1998). Desde la emergencia hasta el momento de trasplante ocurren entre 30 y 40 días. El tiempo que las plantas permanecen en el semillero depende de la variedad de tomate, las técnicas de cultivo y de los requisitos de crecimiento (Van Haeff, Mondoñedo, Parsons., & Medina, 1990). En esta fase, la planta invierte más energía en la síntesis de nuevos tejidos y fotosíntesis, además del rápido aumento de materia seca. (Pérez, Hurtado, Aparicio, Argueta, & Larín, 2013)

En la etapa vegetativa, el aumento de materia seca ya es un proceso más lento. Esta etapa termina en floración con una duración de 22 a 40 días aproximadamente. El suministro de nutrientes es más elevado para compensar las necesidades en las hojas, ramas en crecimiento y expansión. La floración se da a partir de los 51 a 80 días después de la fase inicial. Es importante cuidar la etapa de floración en el tomate, ya que las irregularidades en cuanto a temperatura podrían afectar este proceso. La temperatura mínima y un crecimiento exuberante retardan la floración y provocan flores de difícil fecundación (Bolaños, 2001).

También conocida como etapa de fructificación por la obtención de frutos en desarrollo. Se caracteriza por el crecimiento de la planta, donde los frutos absorben los nutrientes necesarios para su crecimiento y maduración. En

esta etapa, la cosecha es el punto determinado de producción. Las distintas variedades de tomate ofrecen plantas donde el primer corte o cosecha de una variedad precoz es aproximadamente a los 70 días después del trasplante; en el caso de una variedad tardía, bajo condiciones de crecimiento lento, se obtiene la primera cosecha o corte 100 días después del trasplante (Shagñay, 2016). Por otro lado, el cultivo del tomate se desarrolla en climas con temperaturas entre 18°C a 26°C, siendo el óptimo 22 °C (INTA, 1999). León (2001) estima que la temperatura mínima para la germinación es de 10°C, la máxima de 35°C y la óptima varía entre 25°C y 29°C; en desarrollo la temperatura diurna debe estar entre 18°C y 23°C, mientras que la nocturna entre 16°C y 18°C y la temperatura de las raíces debe mantenerse entre 22°C a 25°C. El tomate no resiste heladas en ninguna etapa de su desarrollo, los climas húmedos con temperaturas altas con humedad relativa superior al 75 % son poco apropiados para este cultivo, debido a que esto favorece la aparición y severidad de enfermedades fungosas.

El factor temperatura es importante tomarlo en cuenta, ya que influye en todos los aspectos de producción de tomate. Nuez (1995) y Carpeño (2004) mencionan que cuando la temperatura se encuentra en límite a más de 35°C y menos de 10°C, la temperatura ya no es favorable para el cuajado del fruto o las flores. Las casas productoras de semillas, año con año, mejoran estos aspectos a nivel genético, por lo que hoy en día se encuentran variedades que cuajan perfectamente a temperaturas altas (Carpeño, 2004). En este sentido el tomate es un cultivo que no responde al fotoperiodo, pero sus necesidades de luz oscilan entre las 8 y 16 horas, aunque requiere buena iluminación. Los días soleados y sin interferencia de nubes, estimulan el crecimiento y desarrollo normal del cultivo. En la práctica se ha observado que los distanciamientos de siembra pueden afectar el desarrollo de las

primeras flores por falta de luz, principalmente en aquellas variedades que tienden a producir mucha ramificación o crecimiento de chupones laterales, lo cual impide que la luz penetre hasta donde se lleva a cabo el desarrollo de los primeros racimos florales, afectando el cuaje y crecimiento de los frutos. Esta desventaja se puede solucionar haciendo podas de los chupones que crecen por debajo de los primeros racimos florales, o dando más distanciamiento entre plantas (Carpeño, 2004). La exposición del fruto al sol puede provocar un blanqueo o quemazón de la piel. Por esta razón se requiere suficiente follaje para la protección de los frutos y favorecer una coloración pareja (Haeff, 1983). En contraparte, la humedad relativa (HR) óptima para el buen desarrollo del cultivo de tomate es de aproximadamente 70 - 80%, aun en temperaturas bajas. En humedad relativa mayor a 90% favorece el desarrollo de enfermedades foliares, sobre todo bajo condiciones de poca iluminación (González, 2007).

La HR óptima para el cultivo de tomate oscila entre 65 - 70%; dentro de este rango se favorece, el desarrollo normal de la polinización, garantizando así una buena producción; en condiciones de baja HR (< 45%) la tasa de transpiración de la planta crece, lo que puede acarrear estrés hídrico, cierre estomático y reducción de fotosíntesis, afectando directamente la polinización especialmente en la fase de fructificación cuando la actividad radical es menor. Valores extremos de humedad reducen el cuajado de los frutos; valores muy altos, especialmente con iluminación baja, reducen la viabilidad del polen; puede limitar la evapotranspiración (ET), reduce la absorción de agua y nutrientes, puede generar déficit de elementos como el calcio, induciendo desórdenes fisiológicos (producción apical del fruto), esta condición es favorable para el desarrollo de enfermedades fungosas (González, 2007). Los valores bajos, producen grandes exigencias en la evapotranspiración, lo que puede generar que la planta aumente el consumo

de agua y deje de consumir nutrientes, limitando su crecimiento y acumulando sales en el medio, aumentando posibles problemas para el buen desarrollo del cultivo (Carpeño, 2004). La importancia de la radiación solar en un invernadero es la energía proporcionada para la formación del efecto invernadero, siendo esta la fuente de energía para el crecimiento y desarrollo de las plantas. La radiación puede ser mayormente captada por la densidad de siembra, sistema de poda, tutorado y prácticas culturales que optimizan la recepción de los rayos solares especialmente en época lluviosa, cuando la radiación es muy limitada (Giacomelli, 1998; Hernández, 2001).

El cultivo principal que se produce en invernadero en México es el tomate cuya superficie representa 75% (Muñoz, 2003; Castellanos y Borbón, 2009). Entre las principales tecnologías que comprende destacan los invernaderos y la hidroponía. En conjunto ambas permiten un alto grado de control y manejo de los factores limitantes de la producción; debido a la alta inversión de su implementación, se restringen, al cultivo de especies de alto valor comercial cuya rentabilidad económica esté comprobada (Sánchez *et al.*, 1991). El tomate en invernadero puede ser un negocio de alta rentabilidad, pero, es especulativo; por ello es necesario combinar altos rendimientos con buenos precios para lograr el éxito de este sistema de producción (Muñoz, 1995). Los invernaderos tienen la ventaja de crear condiciones climáticas óptimas para el crecimiento de los cultivos y los protege de las enfermedades y plagas (Martínez *et al.*, 2013). La producción en invernadero incrementa la eficiencia del uso del agua y posibilita tener una producción integrada y protegida (Von, 2011). Entre otras ventajas, permite el desarrollo de cultivos agrícolas fuera de su ciclo natural en menor tiempo, se enfrenta con éxito a plagas y enfermedades, con mejores rendimientos en menor espacio, obteniendo frutos sanos y con un mejor precio en los mercados, generando, un mejor ingreso para los productores (FAO-SAGARPA, 2007). El tomate ha

experimentado cambios rápidos y notables cuando se produce en invernadero, sobre todo en la calidad del fruto. Los invernaderos con cubierta plástica ayudan a los sistemas de control climático, equipos de riego y fertilización automatizada, se han difundido ampliamente a fin de mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas de tomate para aumentar la productividad. Estos cambios tecnológicos han llevado un cambio del cultivo tradicional en el suelo, para cultivar tomate en sustratos, podemos encontrar frutos altamente salinos o enfermos (García y Urrestarazu, 1999) que ya limitan una producción sana en desarrollo del cultivo.

1.4.1 Hidroponía

Hidroponía es una palabra derivada de dos palabras griegas: hydro (agua) y ponos (trabajo), por lo que etimológicamente significa “trabajo en agua” (Bastida, 2012). Un cultivo sin suelo o hidroponía es cualquier sistema que no emplea el suelo para el desarrollo de las plantas, pudiéndose cultivar en una solución nutritiva, o sobre cualquier sustrato con adición de solución nutritiva (Baixauli y Aguilar, 2002). Actualmente se define como la técnica del cultivo sin suelo, donde las plantas se riegan con una mezcla de elementos nutritivos disueltos en agua (solución nutritiva) con ciertos sustratos inertes y estériles, o en algunos casos por la misma solución nutritiva (Bastida, 2012). El objetivo de la hidroponía es eliminar o disminuir los factores limitantes del crecimiento vegetal relacionados con las características del suelo (Resh, 1992). La hidroponía ofrece mejor control de problemas fitosanitarios y nutricionales de la planta, como ahorro de agua, mayores rendimientos, mejor calidad con respeto al medio ambiente (García y Urrestarazu, 1999; Baixauli y Aguilar, 2002; Pallares y Duran, 2006) en muchos casos la contaminación de los suelos por patógenos, es un problema difícil de erradicar, que ha provocado que los productores opten por cambiar del cultivo en suelo por el uso de sustratos hidropónicos, los cuales son más

fáciles de esterilizar (Resh,1992). La hidroponía ofrece ventajas si se implementa de la manera correcta. Dentro de los beneficios principales destacan los siguientes:

- Cultivar en condiciones climáticas adversas en lugares donde el suelo tiende a ser poco productivo o escasos debido a la erosión.
- Obtener productos de calidad superior a los cultivados a campo abierto.
- Es un sistema adaptable a distintas condiciones.
- Se pueden controlar los aspectos de la producción.
- Buen uso sobre la solución nutritiva; control del pH, la conductividad eléctrica y excedentes.
- Altos rendimientos comparados con el cultivo en suelo, necesario para el éxito de los sistemas hidropónicos de una adecuada atención a detalle del cultivo.

El "sustrato" se aplica a todo material sólido, natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, distinto del suelo (in situ), que colocado en un contenedor puro o en forma de mezcla, permite el anclaje del sistema radicular desempeñar el soporte de la planta (Teres, 2001; Abad *et al.*, 2004; Abad *et al.*, 2005). El sustrato puede intervenir o no en el proceso de nutrición mineral de la planta, se pueden clasificar químicamente activos (turberas, cortezas de pino, etc.) o químicamente inertes (perlita, lana de roca, roca volcánica, etc.)

(Pastor, 1999; Teres, 2001; Urrestarazu, 2004; Cadahia, 2005). En México hay una amplia variedad de materiales para uso agrícola (polvo de coco, tezontle, perlita, pumacita, tepezil, compostas, turba, corteza de pino, cascarilla de arroz, entre otros) que se emplean como sustratos (Vargas *et al.*, 2008). Otros materiales también utilizados son la cascarilla de arroz cruda y quemada, grava, arenas, piedra pómez, aserrines, arcillas expandidas, carbones, cáscara de coco, lana de roca, espumas sintéticas, etc. El sustrato tiene la función de asegurar el mantenimiento mecánico del sistema radical, estabilidad de la planta, llevar los nutrientes necesarios a su destino, transferencias de O₂ y CO₂ del entorno radical (Lemaire *et al.*, 2005; Masaguer y Cruz, 2007). Abad y Noguera (2000) reportaron que un sustrato proporciona un medio ambiente ideal para el crecimiento de las raíces (aportar agua, aire y nutrimentos), una base adecuada para el anclaje y soporte a la raíz. Mientras que Abad *et al.*, (2005) sugieren que la finalidad de los sustratos en cualquier cultivo es producir una planta/cosecha de calidad, en periodo corto de tiempo, con bajos costos de producción sin provocar un grave impacto ambiental. Para la elección de un determinado material como sustrato hidropónico depende de la disponibilidad de este, con la finalidad del mejoramiento de la producción de la especie a cultivar con sus propiedades físico-químicas, la homogeneidad, entre otros factores (Ojodeagua *et al.*, 2008). El sustrato puede ser químicamente inerte en el proceso de nutrición de la planta (Abad, *et al.*, 2004) o en sistemas de cultivo en agua (Baixauli y Aguilar, 2002). En México, la roca volcánica conocida como tezontle, es utilizado como sustrato para la producción de hortalizas y flores en cultivos sin suelo. Es un material inerte, proveniente de la erupción de volcanes y está constituido por silicatos de aluminio, formando fragmentos de lava porosa, redondos e irregulares (Castellanos y Vargas, 2009). Las propiedades del tezontle son las siguientes: tiene un pH próximo a la neutralidad, capacidad de intercambio catiónico muy baja, buena aireación y retención de humedad que varía con el diámetro de las partículas;

generalmente está libre de sustancias tóxicas y tiene buena estabilidad física (Ojodeagua *et al.*, 2008). En este sentido una fertilización eficiente, se basa en los requerimientos nutricionales del cultivo y el estado nutricional del suelo (CATIE, 1990), en los sistemas hidropónicos se usa una solución nutritiva, como el agua con oxígeno (O₂) y todos los nutrientes esenciales para las plantas, disueltos en una forma inorgánica completamente disociada, aunque en la solución pueden existir formas orgánicas disueltas, procedentes de los microelementos en forma de quelato (Baixauli y Aguilar, 2002).

Castellanos y Ojo de agua (2009) definen la solución nutritiva como una mezcla de elementos en la solución con una cierta concentración y relación entre los elementos, de tal forma que favorecen la absorción nutrimental por parte del cultivo. En hidroponía, el uso de riego se clasifica en sistemas abiertos y cerrados. En los sistemas abiertos, la solución nutritiva sobrante drena, se infiltra en el subsuelo o simplemente sufre escorrentía fuera del suelo o contenedor de cultivo. En los sistemas cerrados, la solución nutritiva vuelve a incorporarse total o parcialmente, como suministro a la fertirrigación del mismo cultivo, en los sistemas abiertos, la solución nutritiva representa una pérdida total de agua y nutrientes mientras que en los sistemas cerrados es reutilizada (García y Urrestarazu, 1999); el sistema abierto puede dispersar fitopatógenos fácilmente a través de la solución nutritiva (Os, 2010).

Todos los cultivos en agua responden en realidad al concepto de sistemas cerrados, estos sistemas de cultivos sin suelo podrían ser agrupados en cultivos con agua y cultivos en sustratos con reutilización del drenaje (García y Urrestarazu, 1999).

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar y evaluar un modelo matemático que describa el óptimo desarrollo del fruto (Tomate tipo Saladette), con el fin de alcanzar el nivel óptimo, identificar, diseñar e implementar los procesos de mejora correspondientes y determinar el rendimiento de los cultivos por plantas a dos racimos bajo cubierta plástica a alta densidad poblacional.

1.5.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Realizar un análisis del crecimiento del cultivo de tomate (Tipo Saladette) bajo condiciones de invernadero para obtener las variables que intervienen en el proceso de crecimiento de este en una siembra prototipo.
- Diseño y desarrollo del modelo matemático con base en las variables del crecimiento del sistema hidropónico.
- Efectuar muestreo de las variables en la producción del tomate (Tipo Saladette) para realizar las correlaciones de estas en el desarrollo del modelo matemático.
- Evaluar el modelo de crecimiento del fruto de tomate a 2 racimos por planta a alta densidad.
- Determinar el rendimiento de producción a alta densidad con el modelo matemático y validarlo con las siembras de otra región.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO



INTRODUCCIÓN

En la agricultura como en la vida real muchos de los sucesos o situaciones que ocurren se ajustan a una serie de modelos matemáticos. Estos modelos matemáticos resultan de mucha utilidad a la hora de predecir situaciones futuras.

En este capítulo se habla de los diferentes tipos de modelos que no es más que una representación simplificada de un sistema, en otras palabras, un modelo es una representación explícita y externa de parte de la realidad como es visualizada por las personas que desean usar el modelo para entender, cambiar, gestionar y controlar alguna parte de la realidad” (Pidd 1996).

Las investigaciones científicas permiten guiar la investigación y examinar hipótesis (Jones, 1998), cuando están contruidos de una manera razonable constituyen herramientas heurísticas importantes con aplicación en la enseñanza, investigación y manejo agrícola (Bugarín, 2002).

2.1 MODELOS MATEMÁTICOS

El campo de las matemáticas aplicadas ofrece una valiosa herramienta para describir y modelar la naturaleza detalladamente (Torres *et al.*, 2010).

Según Lee (1972) menciona que un “Modelo es una representación de la realidad”, Witt y Penning de Vries (1983) mencionan que un modelo es una representación simplificada de un sistema. Mientras que Pidd (1996) propone “Un modelo es una representación explícita y externa de parte de la realidad como es visualizada por las personas que desean usar el modelo para entender, cambiar, gestionar y controlar alguna parte de la realidad”. En otras palabras, Montgomery (1991) plantea que los modelos matemáticos son más concisos, menos ambiguos con la disponibilidad de reglas, que se pueden usar mecánicamente, permitiendo describir situaciones más complejas, con menos esfuerzo y menos riesgo de confusión.

En el estudio de hortalizas se registran distintos modelos que predicen el crecimiento de los cultivos de una forma organizada de crecimiento en distintas variables. Los modelos matemáticos han llegado a ser una herramienta de investigación importante tanto en la horticultura como en otras áreas de la producción agrícola (Bugarín, 2002). Un modelo aplicado a la agronomía es una representación ordenada y lógica en lenguaje matemático de las relaciones que existen entre los componentes de un sistema agronómico y se compone de uno o más algoritmos (Galvis, 1998). Gary *et al.*, (1998) reporta que los modelos tienen muchas aplicaciones: pueden ser utilizados como ayuda para tomar decisiones en la producción de invernaderos, políticas de desarrollo e investigación agrícola y hortícola.

Stockle *et al.*, (1994) señalan que los modelos se han desarrollado para simulación del crecimiento, es una aproximación que permite diseñar prácticas de manejo e incrementar la productividad minimizando el impacto ambiental ocasionado por la actividad agrícola. Para Lentz (1998), los modelos de simulación pueden utilizarse como fuente de información sobre

el crecimiento del cultivo, que sirve de apoyo en tomar decisiones sobre la conveniencia de realizar prácticas de manejo específicas.

Cruz *et al.*, (1994) determinaron que los modelos matemáticos son utilizados en la agricultura para evaluar estrategias del manejo de hortalizas sin la necesidad de llevar a cabo experimentos costosos. Elizalde *et al.*, (2009) indica que, debido al impacto económico del crecimiento de cultivos en invernadero, se debe contar con herramientas de modelación sólidas y relativamente simples. El tomate es uno de los cultivos de invernadero que posee gran productividad y un uso eficiente”. López *et al.*, (2006) mencionan que los modelos permiten tener una forma cuantitativa de la interacción de procesos simultáneos, en el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Mientras que Lacointe (2000) reitera que los modelos de crecimiento empíricos de los cultivos se aplican sin considerar procesos fisiológicos que funcionan de manera eficiente para predecir el rendimiento o algunos rasgos del desarrollo, ciertas especies en particular requieren condiciones como un lugar específico.

2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

Los modelos matemáticos comprenden distintas características de simulación. Una de ellas, es facilitar la comprensión de la teoría (para mostrar aspectos más relevantes). El modelo describe una zona restringida, que representa la referencia de la teoría a la realidad, se muestra en la figura 2.1.

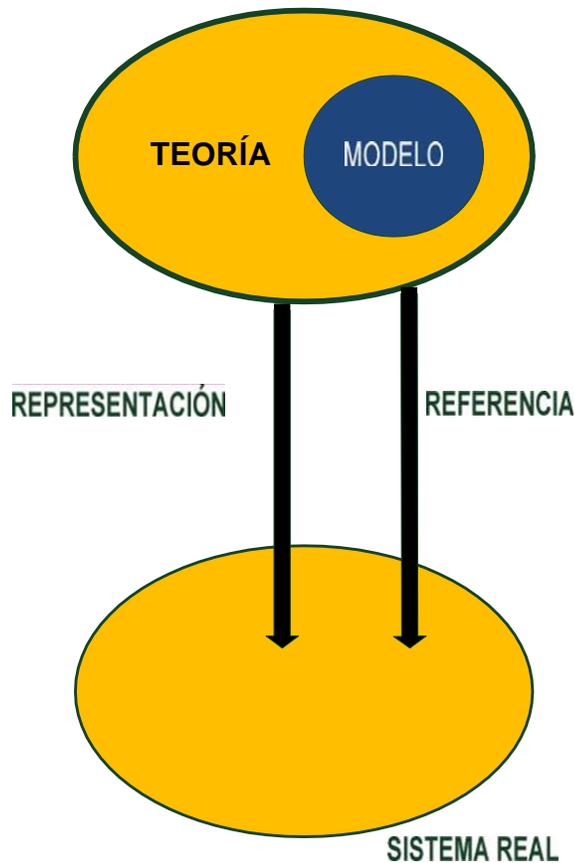


Figura 2.1 Esquema para la construcción de un modelo de Mario de Bunge (Bunge,1975)

Los modelos son los medios para comprender la teoría que explica lo abstracto, con lo concreto. Al hacer referencia a lo concreto, el modelo presenta la imaginación, ayuda a comprender mejor y acerca a la experiencia. Gracias a los modelos, las teorías pueden someterse a comprobaciones empíricas con mayor facilidad. La construcción de modelos es una de las tareas esenciales de labor científica. La finalidad de la ciencia es obtener conocimientos sobre los fenómenos de la naturaleza y lograr su control, la realidad es demasiado compleja para poder modelar todos sus aspectos, algunas características se tienen que aislar (mediante la abstracción) para poderlos estudiar.

Que no es más que una parte de la estructura de la realidad, explica mediante leyes y teorías, la representación mediante modelos. Cuando se tiene un modelo que representa un cuerpo de conocimiento, se compara con la realidad mediante la observación y experimentación. Los modelos se clasifican en teóricos o formales y materiales o reales. Un modelo formal es la expresión simbólica (en términos lógicos) de un sistema idealizado, con las propiedades esenciales del sistema original y el modelo material es la sustitución de un sistema real por otro más simple, que tiene algunas propiedades más simples que el modelo original. En la figura 2.2 se especifican los modelos y pasos que se siguen para realizarlo.

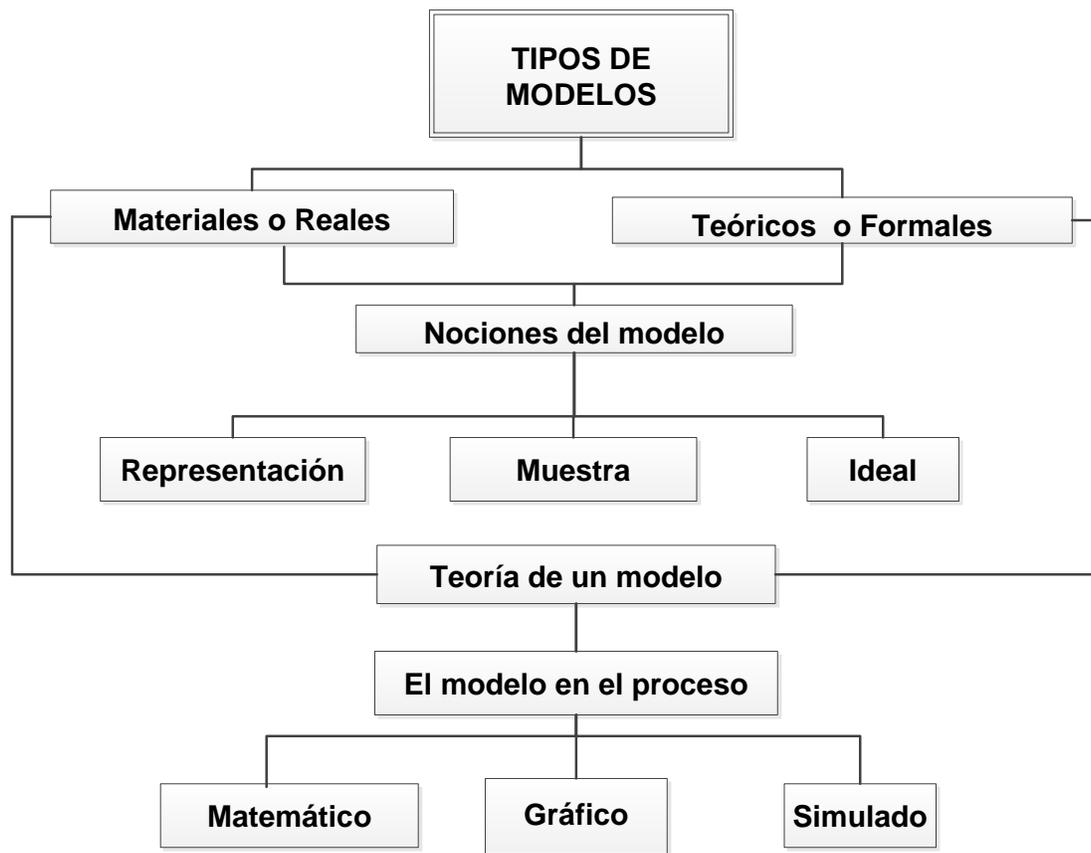


Figura 2.2 Clasificación de los modelos obtenidos.

En agronomía, los modelos han sido usados como una herramienta para examinar estrategias de manejo en la producción de cultivos y para optimizar prácticas bajo condiciones de campo (Bugarín, 2002). Las investigaciones científicas permiten guiar la investigación y examinar hipótesis (Jones, 1998). Los modelos de simulación de cultivos agrícolas no pueden dar respuesta a todos los problemas que allí acontecen, cuando están contruidos de una manera razonable constituyen herramientas heurísticas importantes con aplicación en la enseñanza, investigación y manejo agrícola (Bugarín, 2002).

El uso de modelos también tiene sus limitantes dependiendo el propósito y si las variables son compatibles con el medio ambiente. Surge la necesidad de desarrollar modelos simples y modelos complejos. Los modelos simples no permiten obtener una representación apropiada de algún fenómeno. En cambio, los modelos complejos no son apropiados porque requieren un sinnúmero de datos difíciles de obtener en la práctica (Boote *et al.*, 1998). La mayor diferencia entre los modelos complejos (mecanísticos) y simplificados (empíricos) no es el número de procesos simulados sino el nivel de detalle con que es considerado cada proceso (Angus *et al.*, 1993).

Los modelos simples son sencillos de predecir, tienen un menor número de variables que pueden ser entendidas a diferencia de los modelos mecánicos que incluyen más datos de entrada y dificultan el entendimiento. Por ello en las hortalizas se recomiendan realizar modelos simples que sean sencillos de entender y más seguros para predecir el crecimiento de las plantas de manera organizada (Whitmore *et al.*, 1991).

2.3 FUNCIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

Los modelos matemáticos, son utilizados para la ciencia agrícola ya que ofrece predicciones y estimaciones sobre distintas variables a estudiar, principalmente variables fisiológicas de las plantas. Los modelos matemáticos ofrecen distintas ventajas como:

- Investigar, profundizar el entendimiento de la fisiología del crecimiento y desarrollo, para proponer nuevas estrategias de manejo (Bannayan y Crout, 1999).
- Permiten probar hipótesis (Cruz *et al.*, 1994) o hacer otros planteamientos a través del surgimiento de nuevas hipótesis o conocimiento científico (Sinclair y Seligman, 1996).
- Mejorar el rendimiento y calidad de hortalizas cultivadas en invernadero, para controlar y optimizar las variables ambientales. Se requieren modelos matemáticos que simulen el crecimiento y desarrollo del cultivo (Martínez *et al.*, 2002).
- Describe adecuadamente el comportamiento del cultivo en función del clima dentro del invernadero (Cruz *et al.*, 2004)
- Los modelos en hortalizas permiten probar hipótesis científicas y aplicación potencial tanto en educación como en la práctica de la horticultura. Evalúan estrategias del manejo potencial de un invernadero sin necesidad de llevar a cabo experimentos costosos (Cruz *et al.*, 2004).

- Un modelo ayuda a mejorar el control del ambiente de un invernadero, la dosificación, aplicación de fertilizantes, agua, permite la predicción de la aparición de plagas, enfermedades, para planeación y predicción de la producción (Lentz, 1998).
- Los modelos son indispensables para la toma de decisiones en sistemas agrícolas en los cambios climáticos, erosión, uso del agua, nutrientes y plaguicidas (Boote *et al.*, 1996).
- Para determinar la producción de biomasa en cultivos de importancia económica y social como las hortalizas en fertirriego o en invernadero (Heuvelink, 1995; Gary *et al.*, 1998).

2.4 INVERNADERO

Los modelos son una herramienta importante para facilitar entender el comportamiento fisiológico de las plantas (Casanova, 2008), así como la afectación de los cambios climáticos, físicos o mecanicistas (Bot, 1983; Deltour *et al.*, 1985; Boulard y Wang, 2000), la biomasa, nutrición, plagas, enfermedades, el mejoramiento genético y el rendimiento, entre otras. Existe un gran número de modelos desarrollados con el objetivo de conocer el comportamiento de las plantas en distintas hortalizas.

En lechuga (*Lactuca sativa* L.), Sweeney *et al.*, (1981) proponen un modelo que predice la materia seca total, área foliar y área foliar efectiva. El modelo incluye funciones algebraicas no-lineales de funciones exponenciales de crecimiento para la materia seca estructural y una función exponencial para la tasa de fotosíntesis con el objetivo de predecir el comportamiento de producción de materia seca total del cultivo. Otro modelo fue realizado por

Henten (1994a, 1994b) que propone un modelo para conocer las predicciones de materia seca no – estructural a materia seca estructural y eficiencia del uso de la luz en lechuga. Este modelo es utilizado para conocer el crecimiento de lechuga en un clima templado (Ramírez *et al.*, 2001). Seginer *et al.*,(1998) proponen un modelo para lechuga nombrado NICOLET que ha sido usado para generar estrategias de control óptimo de los niveles de nitratos (Loslovich y Seginer, 2002; López *et al.*, 2003).

En frijol, Higuera (1992) realiza un experimento de cruzas de variedades de frijol evaluados por dos modelos: modelo de Gardner-Eberhart y modelo de Griffing. Gardner y Eberhart, es un modelo para la estimación de efectos genéticos para el cruzamiento aleatorios o de líneas homocigotas usadas como padre. Mientras que el modelo de Griffing estima la capacidad combinatoria de las líneas y comparar el comportamiento de estas en combinaciones híbridas. La finalidad del estudio fue la selección de cruzas para obtener mejores resultados en cuanto a rendimiento. El modelo de Griffing fue el que permitió detectar cuáles líneas transmiten uniformemente la característica de alto rendimiento a la descendencia o a los cruces donde ellas participan, resultando el modelo más apropiado para la selección de cruzas en frijol. Otro estudio sobre frijol fue el de Ávila-Serrano *et al.* (2010) que realizaron un modelo de regresión lineal para predecir el rendimiento de cinco cultivares de frijol yorimón. Los resultados arrojaron que las ecuaciones de predicción de los modelos de regresión lineal se sustentan con coeficientes de correlación y de determinación altamente confiables para estimar el rendimiento en frijol en distintas variables. Torres *et al.* (2010) utilizaron un modelo simple para predecir el crecimiento en frijol por medio de ecuaciones de Jones y Luyten (1998). El modelo es viable si las variables comparten características como temperatura, tiempo de vida, respiración de mantenimiento de tipo CO₂, tiempo de floración y fruto, en el futuro es

posible simular una gran variedad de cultivos con tan solo modificar sus variables y constantes necesarias.

En el pepino (*Cucumis sativus* L.), Marcelis, (1994a, 1994b) propone un modelo de crecimiento 'Fruit Growth' para describir el nivel de asimilados disponibles para el crecimiento y partición de materia seca de la planta. Gijzen (1992) utiliza un submodelo SUKAM para calcular la tasa total de crecimiento diario de la planta. Tiempo después Marcelis y Gijzen (1998) mejoraron el modelo para invernaderos de producción comercial.

En la cebolla (*Allium cepa* L.), se propone un modelo de simulación desarrollado por Visser (1994) para estudiar el crecimiento de área foliar y materia seca de hoja, además de realizar mediciones en bulbos de cebolla para determinar la optimización de condiciones ambientales en situaciones de estrés.

En el chile manzano, Rojas-Lara *et al.*, (2008) sugieren realizar un modelo matemático con variables no destructivas, mediante modelos de regresión lineal simple, regresión lineal múltiple y cuatro modelos no lineales. Los modelos que mejor explicaron el crecimiento del fruto, fue la regresión lineal simple en volumen de agua desplazada y el volumen de fruto; el modelo de regresión lineal múltiple describe el crecimiento de las variables anteriormente mencionadas, el tiempo de crecimiento, la longitud y el ancho promedio, estimando de una manera sencilla y precisa el peso fresco del fruto utilizando una sola variable no destructiva, el volumen de agua desplazada o el volumen, por lo que este modelo fue el más práctico para la descripción del crecimiento del fruto del chile manzano.

En la rosa (*Rosa híbrida* L.), Dayan *et al.*, (2001) presentaron un modelo de crecimiento llamado Rose Grow, que describe el crecimiento del dosel y el desarrollo de brotes florales de rosas en invernadero. Este modelo registra la aparición de brotes y muerte de ramas que desarrollan flores, la acumulación de biomasa es una función de fotosíntesis, respiración y eficiencia de conversión de carbohidratos a materia seca y se incluyen los efectos de índice de área foliar, luz, CO₂ y temperatura. El modelo utiliza incrementos de tiempo basados en una dinámica diaria y lazos de trabajo rápidos ocurriendo en un lapso de 30 minutos. En esta dinámica se calculan las variables temperatura, CO₂, y radiación fotosintética activa, así como los procesos de fotosíntesis y respiración

2.5 MODELO DE CRECIMIENTO EN TOMATE

Los modelos de crecimiento requieren definir un conjunto de expresiones matemáticas de los procesos básicos del desarrollo de las plantas como son la producción, distribución y acumulación de la biomasa. Para poder definir un modelo matemático de crecimiento de fruto de tomate, es relevante el análisis bibliográfico de diferentes autores, para la revisión de la metodología, variables dependientes e independientes, factores de entrada, salida y respuesta para dicho crecimiento.

La selección de los procesos y el detalle de descripción dependen del objetivo del modelo. Jones *et al.*, (1991), propusieron un modelo mecanicista complejo nombrado 'Tomato Growth' (Crecimiento de Tomate, TOMGRO) con 69 variables de estado, para tomate, el cual predice desarrollo y producción. El modelo tiene variables ambientales como temperatura, radiación solar y concentración de CO₂ en invernadero. Las variables de estado fueron número de hojas, número de nodos, número de frutos, peso seco de hojas, peciolo, peso seco de segmentos principales de brotes, peso seco de frutos y área foliar. El modelo utilizó una fuente- demanda para

dividir los carbohidratos para el crecimiento de los diferentes órganos. Dayan *et al.* (1993a, 1993b) realizaron un detallado análisis del modelo TOMGRO, mediante su calibración y validación para condiciones climáticas de Israel, pero con la falta análisis de sensibilidad.

Enríquez *et al.*, (2003), desarrollaron un modelo dinámico-funcional para predicción y distribución de la materia seca (MS) de tomate, cultivado en invernadero sin restricciones en el agua, nutrientes, plagas y enfermedades; establecido por un conjunto de relaciones empíricas entre la temperatura, la radiación incidente y la distribución alométrica de MS con la eficiencia en uso de la radiación fotosintética activa en los órganos de la planta, obteniendo valores confiables en los coeficientes de distribución de MS entre los órganos de la planta.

Cota *et al.*, (2004) realizaron un análisis estadístico evaluando el rendimiento de tomate en altas densidades de población de crecimiento, podando a tres racimos por planta, en dos sistemas de producción, a campo abierto y en invernadero determinando la biomasa /m², utilizando fertirriego. Se realizó un ajuste en los coeficientes de determinación de 96% entre datos predichos y observados, en cada una de las densidades y en tres variedades de crecimiento como peso seco total, peso seco de hojas y peso de fruto utilizando la función de Gauss.

Casierra-Posada *et al.*, (2007) utilizaron un modelo de simulación de crecimiento en tomate para los cultivares de Sofía, Bravona y Granitio, en Villa de Leyva (Boyacá), en un cultivo comercial. Evaluando muestreos semanales del diámetro polar, diámetro transversal, peso seco del fruto, sólidos solubles, a partir de la floración, obteniendo una alta correlación entre variables en función al tiempo de los datos observados para el crecimiento

del fruto. Con la información obtenida semanalmente se calcularon las tasas de crecimiento absoluto y relativo de acuerdo con la metodología propuesta por Hunt (1990) mediante un análisis de regresión para obtener el modelo de crecimiento.

Sánchez *et al.*, (2008) formulan un modelo de transpiración para invernadero, para el cultivo de tomate considerando como parte elemental una arquitectura de control jerárquico de riegos basada en la ecuación de Penman-Monteith, en tres variables principales: radiación solar, DPV (déficit de presión de vapor) y LAI (índice de área foliar), que permite predecir en forma aceptable el comportamiento de las tasas de transpiración de un cultivo de jitomate bajo condiciones de invernadero y condiciones de clima templado.

Bojacá *et al.*, (2009) evaluaron diferentes estrategias de manejo de densidad de plantación y poda de fruto y su efecto sobre la productividad del cultivo de tomate por medio de la técnica de modelación de estadística denominada por modelos mixtos. Estos modelos incluyen efectos fijos y efectos aleatorios para cada uno de los individuos de la población estudiada. La productividad acumulada por planta en función de los días después del trasplante para nuevas combinaciones de densidad de plantación y poda de fruto. Los resultados fueron establecidos por un criterio de ajuste para todas combinaciones posibles entre efectos fijos y aleatorios incluyendo los tres efectos aleatorios.

Casierra-Posada y Cardozo (2009) mejoraron el crecimiento de fruto de tomate, aplicando un modelo básico de análisis de regresión, para determinar la productividad en el cultivo; evaluando cada siete días el peso

seco, el diámetro transversal, polar y los sólidos solubles totales, se calculó la tasa de crecimiento absoluto y relativo en materia seca con relación del diámetro polar/diámetro transversal, días después de la floración; obteniendo resultados aceptables en cada una de las variables. Se concluye que la regresión polinomial y con el programa SPSS versión 11.5. El comportamiento de la curva obtenida para el diámetro polar, transversal fue de tipo sigmoide. La variable alcanzó un valor máximo a los 57 días después de la floración (ddf) y empezó a estabilizarse a los 50 ddf, mostrando un descenso a partir del día 57.

Sállago *et al.*, (2013) encontraron que con el uso de modelos de redes neuronales es posible hacer predicciones precisas (hasta con 5 y 10 min de anticipación) tanto de la temperatura dentro del invernadero, como de la fotosíntesis foliar de plantas de tomate. Este modelo simuló la tasa de fotosíntesis foliar de plantas de tomate, mediante redes neuronales artificiales, aplicando las condiciones climáticas al interior del invernadero: radiación fotosintéticamente activa, temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂ y déficit de presión de vapor, sin emplear la tasa de fotosíntesis, como parte de las variables de entrada del modelo. El comportamiento de las redes neuronales artificiales se contrastó con los valores de intercambio de CO₂, usando un sistema de fitomonitorio. Utilizando el mejor modelo de red neuronal se generaron superficies en tres dimensiones para explicar de forma más sencilla el efecto de la interacción entre variables climáticas y su efecto en la tasa de fotosíntesis.

Solorio *et al.*, (2008) determinaron un modelo expo-lineal de planta de tomate en etapa vegetativa por medio de un esquema de crecimiento con un modelo Semi- empírico aplicando datos experimentales en cultivo de invernadero

sujeto a diferentes combinaciones de estrés hídrico, para el área foliar y masa seca, optimizando la productividad. El modelo expo-lineal muestra el rendimiento de productividad, de crecimiento con la materia área seca y área foliar respecto a la etapa vegetativa.

Ardila *et al.*, (2011) realizaron un análisis funcional de crecimiento, en tres híbridos de tomate de larga vida de anaquel, para determinar la velocidad dinámica del proceso, en tiempos fisiológicos bajo cubierta plástica. Utilizaron diseño bloques completamente al azar con cuatro repeticiones y seis tratamientos; el muestreo cada 15 días pertenecía a la ubicación del primer racimo de fruto, desde la formación de los primeros frutos hasta la cosecha. Se utilizó un modelo de crecimiento no lineal tipo logístico siguiendo la metodología descrita por Carranza *et al.*, (2009) empleando el enfoque funcional para dicho modelo. Mediante un análisis de varianza con una confiabilidad de 95%, en los tres híbridos siendo mucho menor la del híbrido Benverly.

Martínez *et al.*, (2013) ajustaron un modelo de calibración evaluando la tasa transpiración considerando las variables climáticas más influyentes en el proceso fotosintético, el cual es afectado por la luz y la cantidad disponible de CO₂; como lo propone Baille *et al.* (1994), a partir de la simplificación de la ecuación de Penman- Monteith, para su aplicación en la gestión de riegos de tomate cultivado en invernadero.

2.6 ECUACIONES DEL MODELO MATEMÁTICO LOGARÍTMICO- POTENCIAL

Vore (2006) dogmatiza que la regresión logarítmica-potencial se establece con mínimos cuadrados para regresión no lineal como se muestra a continuación siendo este el modelo (ecuación) de Taylor dado por:

$$y = \alpha x^\beta \quad (1)$$

Y la regresión recíproca es:

$$y = \frac{1}{\alpha + \beta x} \quad (2)$$

Los valores siguen una ley potencial. Si la ecuación predictora está dada por:

$$y = \alpha x^\beta \quad (3)$$

Tomando logaritmos en ambos miembros, la ecuación es:

$$\log y = \log \alpha + \beta \log x \quad (4)$$

Donde las constantes α y β quedan fijadas al resolver simultáneamente las ecuaciones:

$$\sum \log y = \log \alpha N + \beta \sum \log x \quad (5)$$

La ecuación matemática para el modelo propuesto se establece como:

$$\sum \log x \log y = \log \alpha \sum \log x + \beta \sum (\log x)^2 \quad (6)$$

2.7 ECUACIONES DEL MODELO DE VALIDACIÓN

Los modelos de validación propuestos fueron dos, mediante ecuación de Regresión Polinomial y Gauss Newton. Miller y Freund (1963) describen las ecuaciones de Regresión Polinomial que son utilizadas para ajustar polinomios a los datos presentados mediante regresión curva Polinomial, mientras que Castillo (2007) menciona que el método de Gauss Newton es un modelo no lineal, donde se utiliza para resolver problemas no lineales de mínimos cuadrados. Esta atribución se debe a Carl Friedrich Gauss que desarrolló una modificación del método de optimización que no usa segundas derivadas.

Las ecuaciones de Regresión Polinomial son el procedimiento de mínimos cuadrados, se puede entender fácilmente y ajustar mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sum y = nb_0 + \sum xb_1 + \sum x^2b_2 \quad (7)$$

$$\sum xy = xb_0 + \sum x^2b_1 + \sum x^3b_2 \quad (8)$$

$$\sum x^2y = \sum x^2b_0 + \sum x^3b_1 + \sum x^4b_2 \quad (9)$$

$$\tilde{y} = b_0 + b_1x + b_1x^2 \quad (10)$$

Las ecuaciones de Gauss- Newton son las siguientes:

$$\frac{\delta y}{\delta \beta_0} = e^{\frac{\beta_1}{x}} \quad (11)$$

$$\frac{\delta y}{\delta \beta_1} = \frac{\beta_0 e^{\frac{\beta_1}{x}}}{x} \quad (12)$$

$$y = \beta_0 e^{\frac{\beta_1}{x}} \quad (13)$$

Los cuales son de gran aplicación en el crecimiento y desarrollo para el rendimiento de fruto de tomate tipo Saladette.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación se efectuó en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agropecuarias en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (18° 55' LN y 99° 44' LO, a una altitud de 1871 m), en Cuernavaca, Morelos, Campus Chamilpa, en un invernadero tipo túnel. El clima es semicálido-subhúmedo [A(C)w2(w)ig] con temperaturas entre 9°C y 32°C y una precipitación media anual de 1500 mm; lluvias intensas en verano, precipitaciones menores en invierno de 5% (García, 1985).

Con la búsqueda bibliográfica del estado del arte y la realización de siembras prototipo, se conoce todo el proceso de producción lo cual es necesario definirlo en etapas las cuales son:

1. La primera etapa fue el acondicionamiento del invernadero.
2. La segunda etapa se lleva acabo el trasplante de plántula y tutoreo durante las etapas de crecimiento de la planta de tomate.
3. Y por último se definen las variables y se realiza el muestres de estas para el del modelo matemático.

En la figura 3.1 se presentan los diagramas de flujo de la metodología del proyecto de investigación. En la etapa I se describe cómo se lleva a cabo el acondicionamiento del invernadero, en la etapa II se detallan las actividades que se realizan durante el cultivo de la planta de tomate así como el muestreo de variables y análisis de la siembra.

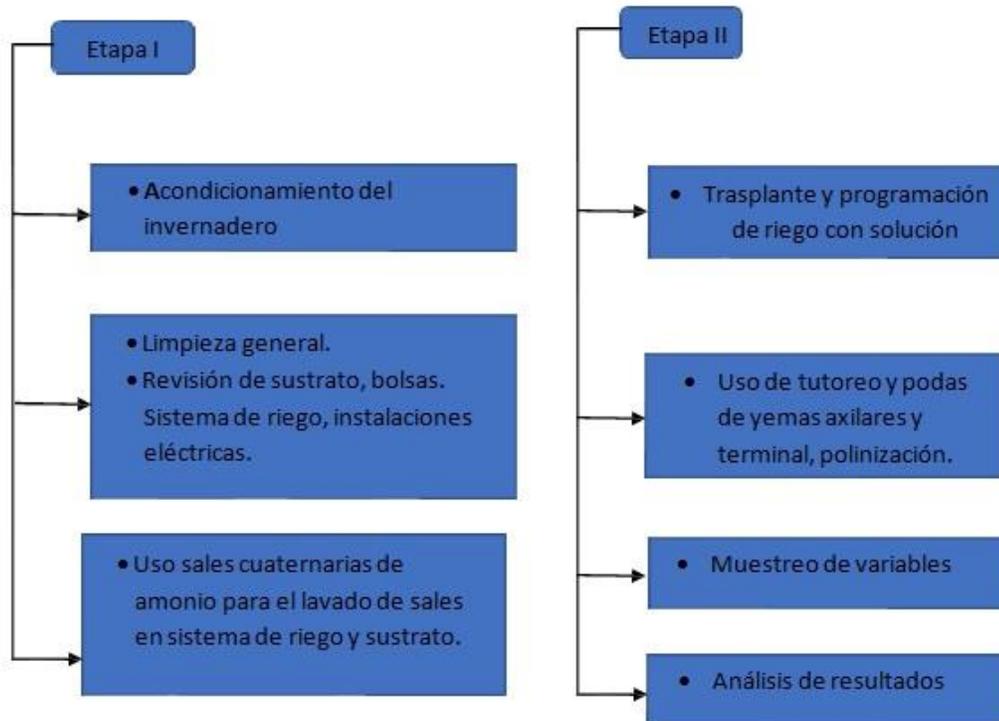


Figura. 3.1 Diagrama de etapas del desarrollo de la metodología de acondicionamiento del invernadero y trasplante y tutorio del proyecto de la investigación.

En figura 3.2 corresponde a él diagrama de flujo de la etapa III se definen las variables para la realización del modelo matemático efectuando los muestreos de estas, y se realiza el análisis estadístico de resultado, además se establecen las ecuaciones y desarrollo del modelo.

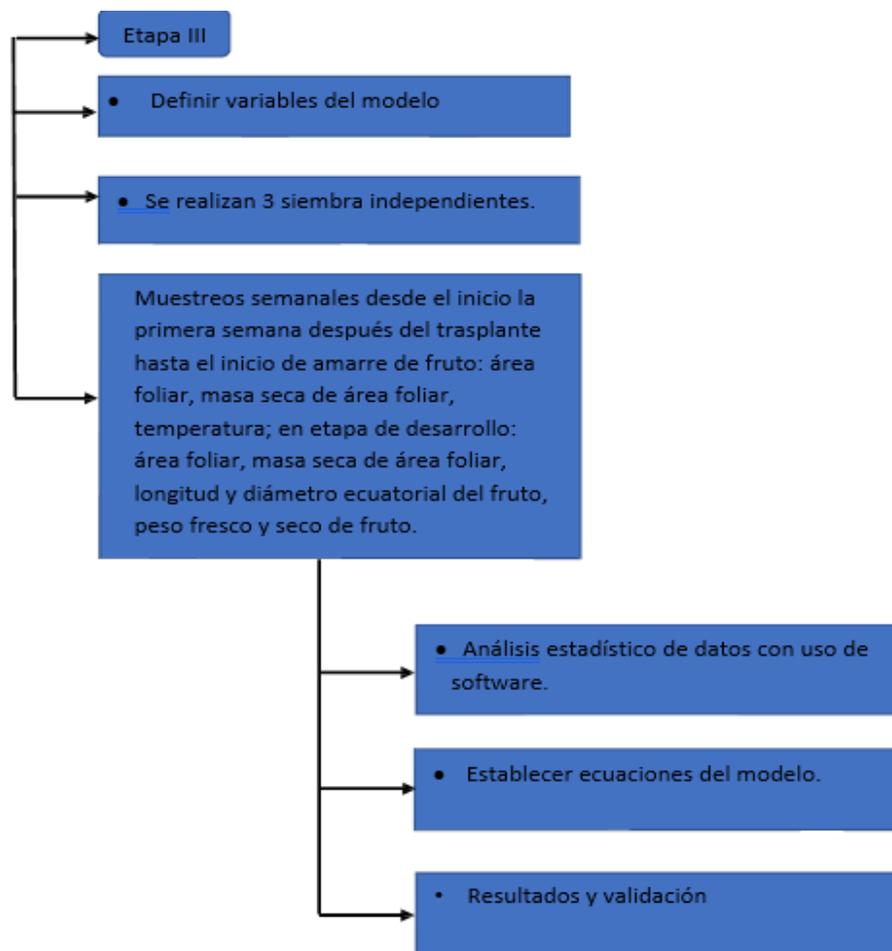


Figura 3.2 Diagrama de etapas III, variables, muestreo, análisis y resultados del desarrollo del modelo.

Cada una de las etapas se realizó en cada una de las siembras siendo estas de suma importancia ya que una depende de la otra y solo así se tiene éxito en el desarrollo de fruto de tomate.

3.1. MATERIALES Y EQUIPO

Para realizar el acondicionamiento del invernadero primero se retira todo lo de la siembra anterior, se revisan las bolsas dañadas de polietileno, como se muestra en la figura 3.3 a), que contienen el sustrato de tezontle rojo de 0.5

milímetros aproximadamente, de la igual forma se revisa toda la instalación de riego como se ve en la figura 3.3 b), en caso de que las mangueras de 16 o 20 milímetros, se encuentren dañados se sustituyen, así mismo tubo conector de 1 pulgada como se observa en la figura.



a)

b)

Figura 3.3 a) contenedores de sustrato para trasplante de plántula y b) distribución de riego para 4 contenedores.

Para evitar la entrada de insectos o plagas al invernadero que pueden enfermar a las plantas, ocasionando detener el desarrollo y crecimiento de los frutos de tomate, se lleva a cabo cada una de las actividades como se expresan en las figuras 3.4 lo cual es útil para aislar completamente de plagas que pueden enfermar a la planta en desarrollo.



Figura 3.4 Diagrama de actividades para aislar el área de producción plagas e infección.

En la figura 3.5 (a) se observa la parte frontal de invernadero, tipo túnel o arco, al antes de iniciar la siembra se revisa cuidadosamente y en caso de tener un orificio o abertura en el plástico o maya se parcha con la con cinta poypatch la cual se ve en la figura 3.5 (b), la cual es necesaria en caso de tener alguna incidencia durante el desarrollo del fruto de tomate.



Figura 3.5 Vista frontal de invernadero (a) y cinta polypatch (b).

Se utilizaron semillas de tomate Saladette tipo Pony Express F1. Se distingue por su muy buena adaptabilidad, de excelente vigor, calidad en frutos de color rojo brillante, firmes y de larga vida de anaquel, figura 3.6. Es una planta de amplio rango de altitudes, suelos, temperaturas, métodos de cultivo y tolerante a salinidad (Chamarro, 2001). Siendo el tomate la segunda hortaliza más cultivada durante todo el año que se consume en fresco como procesado, siendo una rica fuente rica en vitaminas y minerales (Ojo de agua, 2007).



Figura 3.6. Siembra de semillas de tomate Saladette tipo Pony Express F1

Se realizaron tres siembras de tomate rojo tipo Saladette en charolas de polipropileno de 200 cavidades con un volumen de 11 ml por cavidad.

Se desinfectaron las charolas con cloro al 1%; se manipula el sustrato con mezcla Sunshine 3 humedecido con agua. Se utilizó una semilla por cavidad a una profundidad de 0.5 mm, (figura 3.6). Después de realizar la siembra, las charolas se introducen en una germinadora en la que permanecieron por un periodo de 72 h, siendo el periodo de tiempo de germinación, durante el cual se registraron las temperaturas en °C Datalogger figura 3.7.



Figura 3.7. Datalogger es equipo que registra la temperatura durante todo el ciclo de siembra.

Posteriormente las charolas se llevaron a invernadero para que las plántulas continúen su desarrollo. La nutrición se realizó conforme a su fenología de la plántula figura 3.8, se nota cual termina esta etapa que es presenta la quinta hoja verdadera, aproximadamente a los 30 días después de la siembra.



Figura 3.8. Plántula 30 días después del trasplante presentando un crecimiento uniforme.

Como la plántula ya está lista para el trasplante, a la vez el invernadero esta acondicionadas adecuadas, se procede a realizar el trasplante y se programan 8 riegos por día con un temporizador (taimer), ver figura 3.9, estos riegos tienen una duración de 2, 3 y 4 minutos durante todo el ciclo.



Figura 3.9 Temporizador (taimer) equipo para programar riegos

A partir del trasplante se realizan muestreos semanales del área foliar con el spab que se muestra en la figura 3.10, que la mide está en cm².



Figura 3.10 Spab equipo para medir área foliar.

Después de medir a el área foliar de introduce el área foliar en bolsas de estraza a una estufa de circulación forzada de aire (LUZEREN ® DGH9070A) figura 3.11, a una temperatura de 60° C durante 72 horas para realizar su secado.



Figura 3.11 Estufa de circulación forzada de aire (LUZEREN ® DGH9070A)

Des pues de este tiempo se continua a pesar la masa seca de área foliar en una balanza analítica digital de gramos con sensibilidad de 0.0001 g que se distingue en la figura 3.12.



Figura 3.12 Balanza analítica

Otro equipo utilizado durante todo el proceso de crecimiento y desarrollo de fruto de tomate fue el Vernier figura 3.13 para medir las longitudes en mm y cm.



Figura 3.13 Vernier digital con medida en mm.

Todos los equipos mencionados son de gran utilidad en caso de que uno de ellos no esté disponible no es posible realizar el proceso de muestreo apropiadamente.

3.2. MATERIAL VEGETATIVO

Se utilizaron semillas de tomate Saladette híbrido Pony Express F1. Como ya se mencionó anteriormente ya que esta proporciona mejor calidad, mayor productividad, mejor resistencia a enfermedades, crecimiento vigoroso, alta adaptabilidad y maduración más temprana (Villa Real, 1982). Contienen en

sus genes resistencia a diversas enfermedades, mejor color y la calidad de frutos (Depestre y Gómez. 1999).

3.3. TRASPLANTE

El trasplante de la siembra I se realizó el día 10 de noviembre del año 2014; la siembra II fue el día 02 de junio de 2015 y de la siembra III se efectuó el trasplante el 13 de octubre de 2015. El trasplante se hizo cuando el 50 % de las plántulas presentaron la quinta hoja verdadera con una longitud de 10 ± 1 mm con una altura promedio de 10 cm, ver (figura 3.14).



Figura 3.14 Plántula de tomate con 5 hojas verdaderas.

Es recomendable que el tomate se trasplante por la tarde o bien en días nublados, para asegurar que las plantas no sufran estrés hídrico y se desarrollen sin ningún problema. Rodríguez y Morales (2007). Se colocaron dos plantas por contenedor al centro de la bolsa de polietileno con capacidad de 5 litros (dos Galgas), con sustrato de tezontle rojo y un sistema de fertirriego con solución nutritiva, programada a 8 riegos por día. En base a

su crecimiento serán sostenidas verticalmente con hilo de ixtle rafia jitomatera, se colocan a una distancia de 25 cm para mantener una densidad de 8.33 plantas por metro cuadrado. Para el cultivo de tomate se consideran tres etapas fenológicas como se describen en el diagrama de la siguiente figura 3.15, en el esquema de la figura 3.16 la planta está en la primera etapa de crecimiento que es la vegetativa.

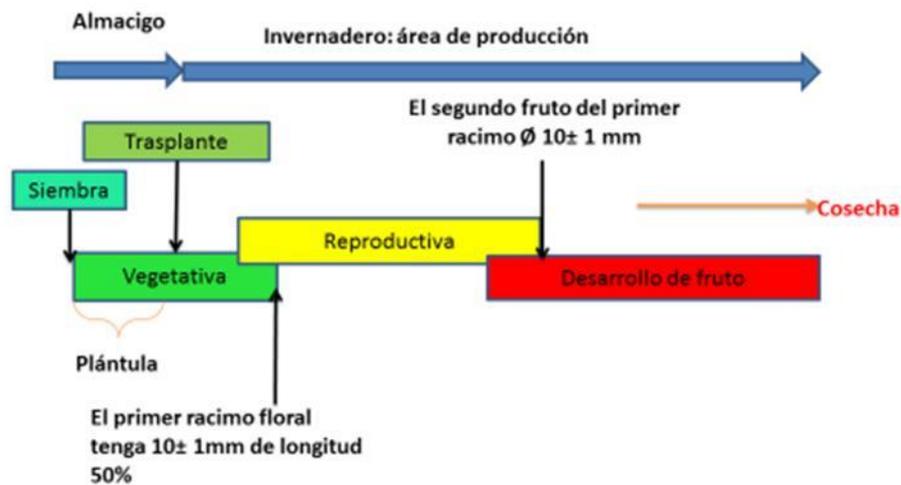


Figura 3.15 Diagrama de etapas fenológicas de tomate determinado con despunte a dos racimos.



Figura 3.16 Crecimiento vegetativo, primera etapa de tomate después de trasplante.

Cuando comienzan a aparecer las primeras flores, da inicio la segunda etapa reproductiva como se exhibe en la figura 3.17, estas se encuentran en el primer racimo.



Figura 3.17 Primer racimo floral de tomate Saladette determinado cultivado en invernadero.

En la etapa de floración (etapa reproductiva) que define la figura 3.18, se da inicio a la eliminación de los brotes axilares del tallo principal durante todo el tiempo restante del ciclo de cultivo; esta práctica se hace manualmente y se inicia a los 20 días después del trasplante conforme aparecen (Zárate, 2007).



Figura 3.18 Corte del tercer racimo previo al despunte en tomate Saladette determinado.

En la etapa reproductiva (floración) diariamente se realizó la polinización hasta el amarre de fruto, de la planta el despunte o corte de un tercer racimo de flores cuando ya se tiene todos los frutos de los dos racimos anteriores. Como se ve en la figura 3.18).

El tutoreo consiste en guiar a la planta de tomate con un solo tallo y mantenerla en posición erguida con una rafia (Zárate, 2007). La altura de los tutores depende de la variedad tanto del crecimiento indeterminado en la altura en comparación con el crecimiento determinado como se muestra en la figura 3.19 (Rodríguez y Morales, 2007).



Figura 3.19 Tutoreo con guía para la planta de tomate determinado.

Con la finalidad de favorecer el amarre de frutos, se promovió la polinización de los frutos generando vibraciones en las plantas a través de los tutores. El raleo de frutos se realizó cuando se despuntó la yema terminal de las plantas con cada racimo se consideraron los primeros cuatro frutos de amarre como de ver en la figura 20. Diferentes trabajos de investigación han validado

paquetes tecnológicos de tomate rojo en hidroponía para aumentar rendimientos por unidad de superficie y calidad en fruto. Cancino et al. (1990), al igual que Sánchez y Corona (1994) proponen conducir la planta a un solo tallo y despuntar para dejar solo uno, dos, o tres racimos por planta con el objetivo de producir frutos de gran tamaño y calidad.

Sánchez y Ponce (1998) mencionan que dejar dos a tres racimos por planta tiene dos ventajas: la primera es evitar las enfermedades por el acortamiento del ciclo y la segunda para concentrar toda la cosecha de un ciclo en un corto intervalo de tiempo, con fechas óptimas de comercialización para el productor. Mientras Veliath y Ferguson (1972) indicaron que los frutos en crecimiento tienen gran actividad de fotoasimilados, que influyen negativamente en el peso en los que están iniciando su crecimiento simultáneamente. En esta investigación sólo se consideraron cuatro frutos por racimo para favorecer al peso de cada fruto, color y uniformidad (figura 3.20 y 3.21).



Figura 3.20 Raleo de frutos de tomate Saladette determinado a cuatro frutos por racimos, considerando dos racimos por planta.

En tomate, McAvoy *et al.*, (1989), Cancino *et al.*,et (1990) y Sánchez y Corona (1994) mencionan que, realizando prácticas como podas, despuntes, tutoreo y manejo de densidades de población se obtienen rendimientos considerables de fruto cosechado en condiciones protegidas ver figura 3.21.



Figura 3.21 Racimo de tomate Saladette determinado en cuatro frutos por racimo.

Para el crecimiento del fruto es indispensable considerar una formulación química de la solución nutritiva utilizada. La mezcla se originó a partir de la solución descrita por Steiner (1984), que consiste en restar los aniones y cationes detectados con base al análisis de agua previamente realizado. La preparación de la solución nutritiva se realizó de acuerdo con las recomendaciones de Sandoval (2003). Los fertilizantes utilizados para la mezcla nutritiva fueron: nitrato de calcio, nitrato de potasio, sulfato de potasio, sulfato de magnesio, fosfato mono potásico y micronutrientes; obteniendo una coloración y maduración del fruto adecuada como se percibe en la figura 3.22 que se muestra a continuación.



Figura.3.22 Última etapa de experimentación de tomate rojo en estado de maduración de frutos.

Todos los frutos están listos para la cosecha siendo esta la última actividad que para hacer la venta del fruto.

3.4 VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA EN LAS ETAPAS DE PRODUCCIÓN DE TOMATE.

Para definir las variables es importante tomar en cuenta los factores que intervienen en la producción de tomate la cual depende principalmente de dos factores: las condiciones fisiológicas de la planta y las condiciones externas de ella. Entre las condiciones externas se encuentran la humedad relativa, la radiación solar y la temperatura las cuales ya se mencionaron en el capítulo 1, observándose que estas tienen influencia sobre las condiciones fisiológicas de la planta. Se considera que el desarrollo del racimo, la flor, la viabilidad del polen, la forma del fruto, el crecimiento de la planta y el cuajamiento del fruto, son afectados por la temperatura y por tanto afectan la producción (Flores, 1986). Para ello se realizaron diagramas de flujo por cada una de las etapas, figura 3.23 se encuentra la etapa vegetativa, y al

sistema entra solución nutritiva, flujo de agua y luz solar, y solo hay una salida que es el área foliar.

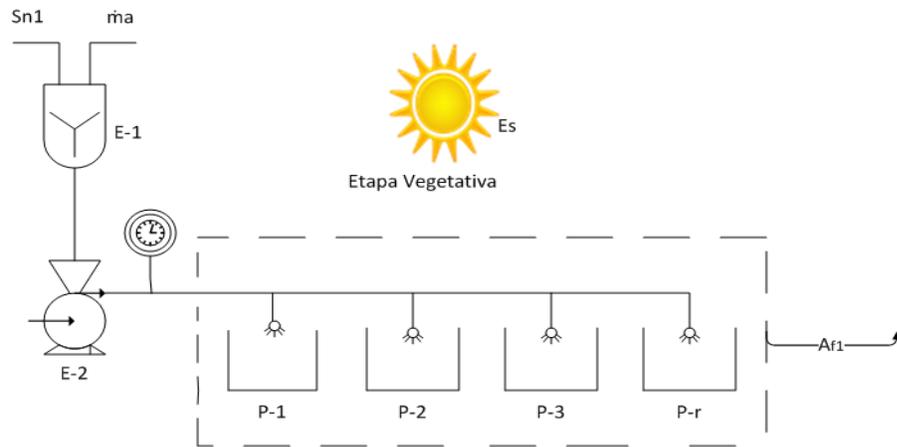


Figura 3.23. Diagrama de flujo de etapa vegetativa

En el diagrama de la figura 3.24 se detalla la etapa reproductiva que es la durante toda la floración, y tenemos dos variables de entrada que son solución nutritiva, flujo de agua y luz solar, da inicio el amarre de frutos y están de tamaño canica; es por ello por lo que la salida se marca como área foliar y ruto.

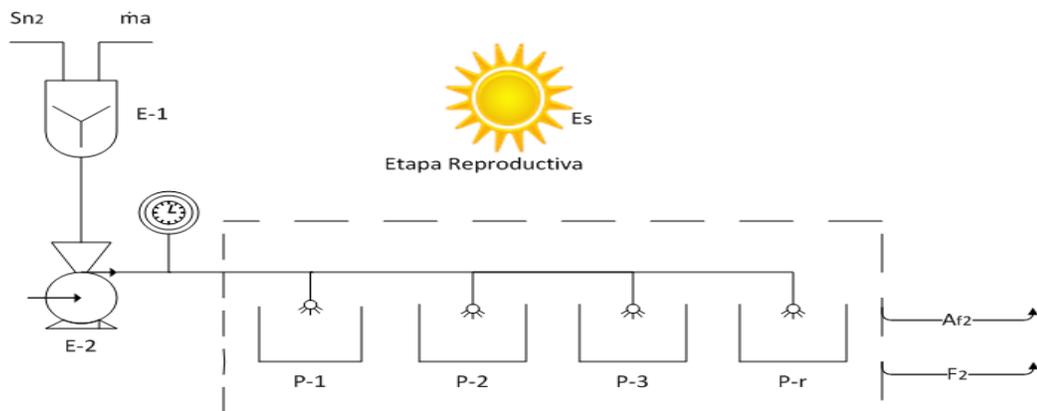


Figura 3.24 Diagrama de flujo de etapa reproductiva

En el diagrama de la figura 3.25 se refiere a la etapa de desarrollo y se debe tiene las mismas variables de entrada y solo una de salida que es el fruto de tomate.

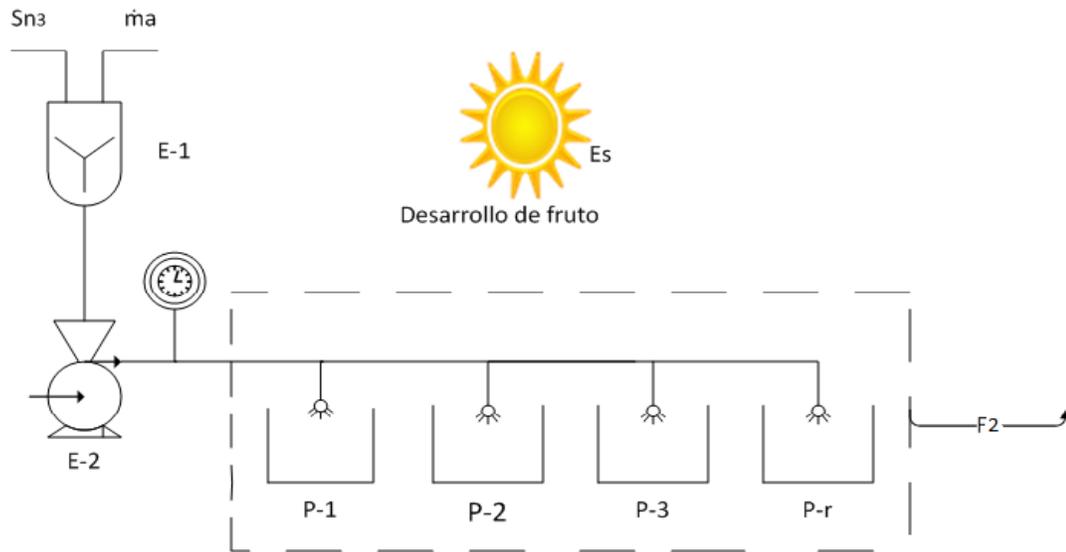


Figura 3.25. Diagrama de flujo desarrollo de fruto.

En la tabla 3.1 se describe la nomenclatura y subíndice usados en los diagramas

Tabla 3.1 Nomenclaturas y subíndice de los diagramas de flujo

Nomenclatura en los diagramas de flujo	Subíndice
\dot{m} flujo [l/s]	a = agua
E energía [W/m ²]	s = solar
P Planta [--]	n = nutritiva
S sustancia [Kg]	f = foliar
A área [m ²]	1 = etapa vegetativa
F Fruto [Kg]	2 = etapa reproductiva
-----	3 = etapa desarrollo

De acuerdo con el párrafo anterior y diagramas de flujo el crecimiento y desarrollo de la planta de tomate existen tres etapas fenológicas (vegetativa, reproductiva y fructificación) que se representan en diagramas anteriores, en cada situación fisiológicas dependen directamente de la temperatura la cual está íntimamente ligada con los otros factores ambientales; para hacer un análisis definiremos en la Tabla 3.2 las variables de entrada y de salida de cada una de las etapas fenológicas.

Tabla 3.2 Variables consideradas en cada etapa de producción del tomate rojo.

Variables de entrada	Variables en el proceso	Variables de Salida	
		Inicial	Final
Plántula Agua Temperatura Radiación solar Solución nutritiva	Etapla vegetativa: Contenido de Clorofila Área foliar (AF)		Etapla vegetativa: Materia seca de hojas
	Etapla reproductiva: Contenido de clorofila Área foliar Racimos por planta	Área foliar Materia seca de hojas	Área foliar Materia seca de hojas Fruto
	Etapla de desarrollo de fruto o fructificación: Fruto Diámetro longitudinal de fruto Diámetro ecuatorial de fruto Peso de materia fresca del		Fruto Materia seca de fruto

Descripción de las etapas productivas con relación a las variables que se consideran al inicio y al final de la cada etapa (vegetativa, reproductiva y fructificación) para describir las variables importantes tanto en estado fresco, como mediciones en materia seca de la planta completa.

En la tabla 3.3 se describen los factores abióticos que intervienen el crecimiento y desarrollo de la planta y fruto de tomate.

Tabla 3.3 Factores abióticos de la planta de tomate.

EFECTO QUE PRODUCE EN LA PLANTA	
Radiación solar	
<p>Puede actuar como una limitante. La reducción del 1% de radiación suspende en 1% en la producción.</p> <p>No es independiente de la temperatura o presencia de CO₂.</p> <p>La polinización será insuficiente y el tamaño de fruto menor influye directamente en la coloración del fruto.</p> <p>El exceso produce quemaduras en el fruto e incluso de la planta y desarrollo anormal está directamente relacionado con la temperatura del invernadero.</p>	
Temperatura	Mínima 8-12°C
	Óptima 21-27°C
	Máxima 32-36°C
<p>Los procesos de toma de nutrientes y crecimiento alcanzan una intensidad mínima o se detienen; si la temperatura mínima se prolonga por varios días la planta se debilita, y si ocurren temperaturas por debajo de este nivel la planta sufre una progresiva decadencia o muerte (Martínez, 2001; Zeidan, 2005).</p> <p>Todos los procesos bioquímicos se desarrollan normalmente; el crecimiento vegetativo, floración y fructificación son adecuados (Martínez, 2001; Zeidan, 2005).</p> <p>Los procesos bioquímicos y de toma de nutrientes están al máximo, son excesivos y agotadores para la planta, se presentan desórdenes fisiológicos y se detiene la floración; cuando estas temperaturas se prolongan ocurre muerte de la planta. En la apertura floral y cuajada de fruto provoca su caída (Martínez, 2001; Zeidan, 2005).</p>	
Humedad relativa (HR)	
<p>La óptima de estar entre 50% - 65% para su óptimo crecimiento y fertilidad (Zeidan, 2005).</p> <p>Cuando es mayor a la óptima se generan enfermedades fúngicas (hongos, manchas en área foliar), estrés hídrico, impide la producción de granos de polen, disminución clara en la producción (Liptun, 1970, Bakker, 1990).</p> <p>La baja HR reduce la actividad fotosintética, dificulta la fecundación del polen, produciendo frutos pequeños y huecos.</p> <p>Esta cambia en función del clima de cada región y es controlada por la ventilación de invernadero.</p>	
Dióxido de Carbono	
<p>La concentración normal del CO₂ en la atmósfera del 0.03%</p> <p>Este se debe duplicar o triplicar cuando la producción vegetal sea óptima.</p> <p>Este es muy variable durante el día y va ligado a la infraestructura disponible.</p> <p>Este factor está ligado directamente con la temperatura ambiental.</p>	

Efecto de los factores abióticos en un invernadero, provocan en la planta una intensificación de todos los procesos biológicos y térmicos bien definidos, que son necesarios en las plantas cultivadas bajo condiciones protegidas.

Tabla 3.4 Matriz de relación de variables de crecimiento y variables de componente de respuesta.

VARIABLES DE ENTRADA	VARIABLES DE CRECIMIENTO								VARIABLES DE RESPUESTA DE CRECIMIENTO				OBSERVACIONES – INFLUENCIA
	Contenido de clorofila	Área Foliar	Longitud de tallo	Diámetro de tallo	Volumen de raíz	Diámetro longitudinal	Diámetro ecuatorial	Peso de fruto	Masa se de hojas	Masa seca de tallo	Masa seca de raíz	Masa seca de fruto	
Radiación solar	✓	✓✓							✓				Indirectamente
Humedad relativa		✓			✓	✓	✓	✓					Directamente
Volumen de riego	✓	✓	✓	✓	✓	✓✓	✓✓	✓✓					Directamente
Solución nutritiva	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Directamente
Temperatura	✓	✓✓	✓	✓	✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓	✓	✓	✓	Directamente
Sustrato					✓								Indirectamente
Plántula	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Indirectamente

Tabla 3.5 Componentes de respuesta

VARIABLES DE ENTRADA	VARIABLES DE CRECIMIENTO								VARIABLES DE RESPUESTA DE CRECIMIENTO				OBSERVACIONES
	Contenido de clorofila	Área Foliar	Longitud de tallo	Diámetro de tallo	Volumen de raíz	Diámetro longitudinal	Diámetro ecuatorial	Peso de fruto	Masa se de hojas	Masa seca de tallo	Masa seca de raíz	Masa seca de fruto	
Radiación solar	x	xx							x				Plantas pequeñas Afecta la estructura fisiológica de la planta
Humedad relativa		x			x	x	x	x					
Volumen de riego	x	x	x	x	x	xx	xx	xx					Parámetro establecido
Solución nutritiva	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Crecimiento limitado
Temperatura	x	xx	x	x	x	xx	xx	xx	x	x	x	x	Vital para los procesos bioquímicos Escases del crecimiento radicular
Sustrato					x								
Plántula	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	No hay consecuencia en variables de crecimiento y de respuesta

En las tablas 3.4 y 3.5 se muestran las incidencias que tienen las variables de entrada y el proceso de crecimiento, siendo estas relacionadas con los factores abióticos referidos en la (tabla 3.4), las variables con (✓✓) son aquellas que sí faltan en el proceso no podría llevarse a cabo el desarrollo y

crecimiento del fruto, además se indica la influencia directa o indirecta de cada uno de los factores, la radiación solar en el área foliar depende del proceso fotosintético en la planta desde el momento del trasplante, en caso de que este sombreado o la cubierta plástica se encuentre sucia disminuye la productividad, (Arellano-García, 2011). Con baja iluminación la polinización será insuficiente y el tamaño de fruto menor. La humedad relativa es una variable directa que en caso de incrementar por arriba del 80% durante un periodo prolongado, se presentan enfermedades en la planta y en caso de estar por debajo del 50% se dificulta la fecundación y se producen frutos chicos y huecos, (Zeidan, 2005), es importante tener una buena ventilación en el invernadero, tiene gran relación con la temperatura. El riego ya está establecido para el tomate en las diferentes etapas como ya se mencionó anteriormente por lo tanto es un parámetro establecido. La importancia de la solución nutritiva en el crecimiento y desarrollo de fruto es un parámetro constante en las diferentes etapas fenológicas del cultivo, vegetativa, reproductiva y fructificación, así mismo favorece el rendimiento y calidad de los frutos y en todos los órganos de la planta. Al realizar un análisis de la Tabla 3.5 que se obtuvo de los diagramas de flujo en las diferentes etapas, y relacionarlos con los factores abióticos se marca con (**) y se obtiene que la temperatura tiene gran influencia en el desarrollo del fruto de tomate siendo una variable independiente y de ella dependen el área foliar, el diámetro longitudinal, ecuatorial y peso del fruto, masa seca área foliar y de fruto son consecuencia de las anteriores, obteniendo así las variables para realizar el modelo matemático.

Además, es preciso indicar que todas las variables que se encuentran en la matriz de la tabla 3.4 y 3.5 no pueden ser aisladas una de las otras porque hay una estrecha relación en el proceso fisiológico del fruto de tomate.

3.5 MUESTREO

Para obtener información y características importante de un muestreo, debe ser planeada la parte integral de cualquier estudio; ya que la confianza en la calidad de los datos dependerá del número de muestras, así como de la localización y los tiempos del muestreo.

El objetivo de evaluación es la obtención de datos para el análisis de resultados del experimento a realizar, estos generalmente dan información acerca de la variación de los intervalos de concentración, optimizando la selección del equipo de muestreo, estableciendo criterios de decisión para un periodo de tiempo o en una región determinada (Amato, P.R; y Keit, B; 1991). Los muestreos son datos correlacionados en espacio y tiempo, los tipos más utilizados pueden ser: (Borgman y Quimby; 1988):

- Muestreo aleatorio simple. Consiste en la toma al azar independiente con respecto al tiempo y al espacio. Sus principales ventajas son la simplicidad en la población y su uso para acciones.
- Muestre estratificado. Consiste en dividir el área de estudio en varias regiones o estratos a los que se les aplica de manera individual un muestreo aleatorio simple.
- Muestreo sistemático. Es la combinación del muestreo aleatorio con el geográfico a través de una malla cartesiana.

El muestreo aleatorio n seleccionado de una población finita de tamaño N, de tal manera que la muestra posible de tamaño n tiene la misma posibilidad de ser elegida. La selección de números corresponderá al número de elementos de la muestra de entre un total de N elementos de la población. En base a esta selección, se procede al muestreo definido por: $(N-n) / N$. La toma de la muestra es fundamental garantiza un buen resultado. A la forma de tomarla o la manera de obtención es a lo que se le llama “Técnica de muestreo”.

Durante la etapa experimental se realizó un muestreo aleatorio completamente al azar con método destructivo, de 16 plantas semanalmente en las dos primeras etapas (vegetativa y de desarrollo): en la primera se tomó la muestra desde el trasplante hasta el despunte del tercer racimo de flores después del amarre de fruto en los dos primeros racimos, midiendo el área foliar (cm^2) de cada planta, secándola a $60\text{ }^\circ\text{C}$ como lo recomienda, Zúñiga, F. B; y Prieto, J. L. P; (2004), durante 72 horas en una estufa de circulación forzada de aire, después las muestras que pesaron en una báscula digital para determinar su peso en gramos (gr). En la segunda etapa los muestreos se realizaron como ya se mencionó en el párrafo anterior, las variables a considerar fueron: diámetro longitudinal y ecuatorial de fruto, peso de fruto y materia seca del mismo a partir del amarre (o cuajado) de los frutos hasta la madurez; primera y segunda etapa existen traslapes entre una o dos semanas, para determinar la materia seca del fruto se realizó un previo secado $70\text{ }^\circ\text{C}$ durante 72 horas, de acuerdo con la metodología propuesta por Hunt (1990) y las unidades de calor ($^\circ\text{C}$).

CAPÍTULO IV: RESULTADOS



INTRODUCCIÓN

Se realizaron tres siembras en el invernadero de tomate tipo Saladette en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agropecuarias en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos ($18^{\circ} 55'$ LN y $99^{\circ} 44'$ LO, a una altitud de 1871 m), en Cuernavaca, Morelos, Campus Chamilpa. Los resultados presentados son de las siembras realizadas en el invernadero tipo túnel, en las distintas estaciones del año: siembra I se realizó del 10 de noviembre de 2014 a 11 de febrero 2015, siembra II fue de 2 de mayo al 31 de agosto del 2015 y la siembra III comenzó el 13 de octubre y terminó el 21 de diciembre. Las plantas fueron cultivadas bajo las mismas condiciones de nutrición y labores culturales para mantener una homogeneidad en las siembras, tuvieron un crecimiento uniforme en todas las etapas de producción.

4.1 SISTEMA DE PRODUCCIÓN

En la producción de tomate, desde la etapa vegetativa hasta la cosecha existen constantes cambios, iniciando con los riegos por día como se muestra en la (figura 4.1). Desde el trasplante se aplicó solución nutritiva, los riegos se aplicaron a diferentes tiempos así como la solución, cuando aparece el primer racimo de flores se hace la primera poda de tallos axilares, se cambia el tiempo de riego siendo esta la etapa reproductiva, lo cual se realiza durante todo el cultivo.

RIEGOS POR ETAPA

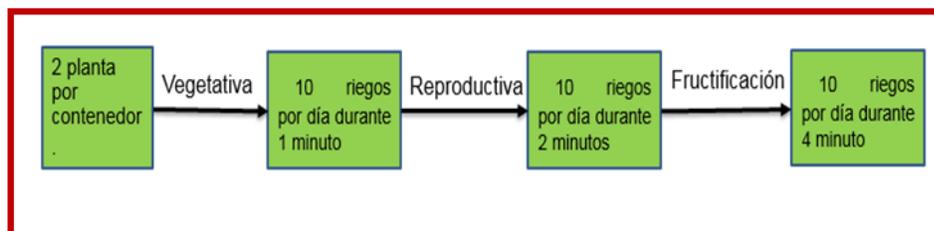


Figura 4.1 Secuencia y tiempo de riegos por etapa

En la aparición del tercer racimo flores se aumenta el riego a 3 minutos, se realiza el despunte de la planta con dos hojas después del segundo racimo, posteriormente del cuajado de frutos en este último ver figura 4.2(a) y (b), dado que la genética de la semilla de tomate híbrido tipo Saladette es alta el amarre de frutos aproximadamente al 95% y no aparecen deformaciones.



Figura 4.2. Corte de tallos axilares y brotes laterales (a), y amarre de fruto (b).

A la aparición de botones florales se cambió la nutrición para la floración, iniciando la polinización la cual se realizó diario y concluye cuando comienza el desarrollo del fruto. Una vez cuajado (termino canica) el fruto, se hace la

poda total de las flores, se espera a que crezca el fruto y realiza la cosecha, esto se realizó en cada una de las siembras.

La nutrición se cambia en cada una de las etapas, es cuando se hace el cambio de los tiempos de riego con el objeto de obtener frutos de larga vida de anaquel de calidad como lo menciona el artículo 3º, fracción IV-A, 73 y en el Capítulo III del Título IV de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, así como en los artículos 84, 85 y 86 del Reglamento de dicha Ley. En el tomate rojo tipo Saladette, en cualquier lote o muestra son similares en color y forma, los frutos son firmes al tacto. El tamaño indicado por la norma mexicana NMX-FF-009, diámetro chico de 38 a 52 mm, mediano de 51 a 60 mm, grande de 59 a 71mm, extragrande de 70 a 76 mm, con una tolerancia del 10%. (SAGARPA pc-020-2005 pliego de condiciones para el uso de la marca oficial México calidad suprema en tomate). Todas estas actividades se realizaron en cada una de las siembras.

4.2 MODELO SIMPLIFICADO DE CRECIMIENTO DEL TOMATE

Este modelo se realiza partiendo de las ecuaciones Jones (1998), Verhulst (1920) y L. Bacci *et al.* (2012) (TOMGRO). El trabajo fundamental en la reproducción de las plantas en la parte vegetativa la reproducción incluye tallo, hojas y raíces y nodos (N) para llevar a cabo el proceso que necesita la planta para vivir y crecer, con la fotosíntesis, los nodos son una parte de gran importancia que permiten engrosar la planta de manera proporcional conforme se va desarrollando es por ello que se considera la ecuación (1) de TOMGRO .

$$\dot{N} = N_m f_N (T) \quad (1)$$

El desarrollo de nodos y Área foliar depende de la temperatura del aire así

de la radiación solar, uso de la luz, solución nutritiva para el crecimiento del follaje de la planta para la obtener la biomasa del área foliar W_f y de raíz W_r , considerando la ecuación (2 y 3) de Jones (1998).

$$\dot{W}_f = E (P_g - R_m W) f_c N \quad (2)$$

$$\dot{W}_r = E(P_g - R_m W)(1 - f_c N) \quad (3)$$

La relación entre los nodos y la expansión de las hojas de la planta además de los asimilados de las sustancias nutritivas, la temperatura, el procesos fotosintético y CO_2 y con una temperatura optima y la concentración 350 ppm, cambiando cuando la temperatura varia como lo menciona TOMGRO (Jones, 1998) en la ecuación (4) para la obtención de masa seca (biomasa) de área folia A_f .

$$\dot{A}_f = N P_{OL} f_n(T) F(C) R_C \quad (4)$$

Verhulst (1838) menciona que en cualquier proceso biológico de crecimiento en un conjunto de órganos de la misma especie que coexisten en un mismo espacio y tiempo comparten ciertas propiedades biológicas y en su producción tienen una alta cohesión reproductiva en el grupo, es por ello que para calcular el peso (W_p) del fruto por planta se utiliza la ecuación (5).

$$\dot{W}_P = r W_p f_1(T) \left(1 - \frac{W_p}{K}\right) \quad (5)$$

Dónde:

$N_m =$ Tasa máxima de aparición de nodos (0.5)

$F_n(T) = f_{nm} \min \{ \min[V_0(T), V_1(T)], NUM \}$

$NUM = 1$; Tasa de crecimiento del nodo máximo

$$V_0(T) = 0.25 + 0.025 T$$

$$V_1(T) = 2.5 - 0.05 T$$

$T = \text{Temperatura del aire } (^{\circ}\text{C})$

Ecuación de Verhulst

Dónde:

$r = \text{Tasa de crecimiento}$

$K = \text{Capacidad de persistencia}$

$W_p = \text{Peso del fruto}$

$f_1(T) = 1$; función que depende de la temperatura, $f_1(T) \in [0,1]$

$f(\cdot) = \text{función dependiente del peso}$

Modelo TOMGRO

$A_f = \text{Área foliar}$

$P_{OL} = \text{Tasa de expansión (350 ppm)}$

$F_n(T) = \text{Es la función para reducir la tasa de un nodo de iniciación(1);}$

$F(C) = 1 + SCO_2 (CO_2 - 350)$; mide los niveles de CO_2

$SCO_2 = 0.003$

$R_C = \text{Proporción de suministro de carbono de mandado del cultivo (0.005)}$

Ecuaciones para determinar el diámetro ecuatorial y diámetro longitudinal

Los diámetros longitudinal y ecuatorial dependen del peso del fruto W_p de su peso específico P_e y de su geometría (geo)

$$\Phi_a = f(W_p, P_e, geo)$$

$$\phi_b = f(W_p, P_e, geo)$$

La geometría del tomate se toma en cuenta como el volumen de un elipsoide en revolución o esferoide donde el volumen se obtiene como:

$$V = \frac{4}{3} \pi \phi_a \cdot \phi_b^2$$

Dónde:

$\phi_a =$ *diámetro longitudinal*

$\phi_b =$ *diámetro ecuatorial*

Nótese que $\phi_a > \phi_b$

Experimentalmente se encontró que P_e del jitomate tiene un valor de

$$1.135 \frac{g}{cm^3}$$

y $\frac{\phi_a}{\phi_b} = 1.3$ (relación de dos diámetros).

Entonces:

$$V = \frac{4}{3} \pi (1.3 \phi_b^3)$$

$$P_e = \frac{W_p}{V} = \frac{W_p}{\frac{4}{3} \pi (1.3 \phi_b^3)}$$

ó

$$\phi_b^3 = \frac{W_p}{\frac{4}{3} \pi (1.3) P_e}$$

$$\phi_b = \sqrt[3]{\frac{W_p}{\frac{4}{3} \pi (1.3) P_e}}$$

$$\phi_a = 1.3 \phi_b$$

El modelo simplificado se muestra en el siguiente figura 4.3 donde se tienen las variables de entrada y salida del sistema con relación a las ecuaciones del modelo considerando una temperatura de 25°C siendo esta la óptima para el fruto de tomate:

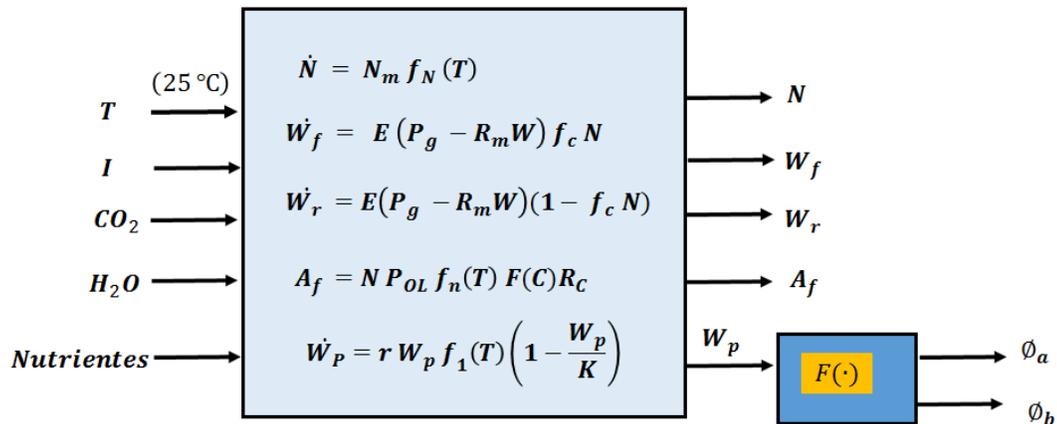


Figura 4.3 Sistema del modelo con variables de entrada y salida del conjunto de ecuaciones del modelo.

Este sistema de ecuaciones se resolvió utilizando el Simulink de Matlab, cabe mencionar que también se puede resolver utilizando algún método numérico como el de Euler.

En el simulador se partió con la temperatura óptima para el fruto de tomate la cual es de 25°C como se menciona en el capítulo anterior y durante el proceso esta puede variar en estos rangos.

$$(T) = \begin{pmatrix} 0 & 8^\circ C \\ 0.55 & 9^\circ C - 15^\circ C \\ 0.75 & 16^\circ C - 35^\circ C \\ 1 & 36^\circ C - 40^\circ C \\ 0 & 41^\circ C - 55^\circ C \end{pmatrix}$$

Con los datos experimentales obtenidos en el invernadero del Campo Experimental de la Facultad de Ciencias Agrícola de la Universidad

Autónoma del Estado de Morelos; partiendo de las ecuaciones definidas, el diagrama del modelo de simulación para el desarrollo y crecimiento de fruto de tomate figura 4.4, donde se define como se establece el sistema de ecuaciones con el Simulink y su dependencia una de la una de la otra.

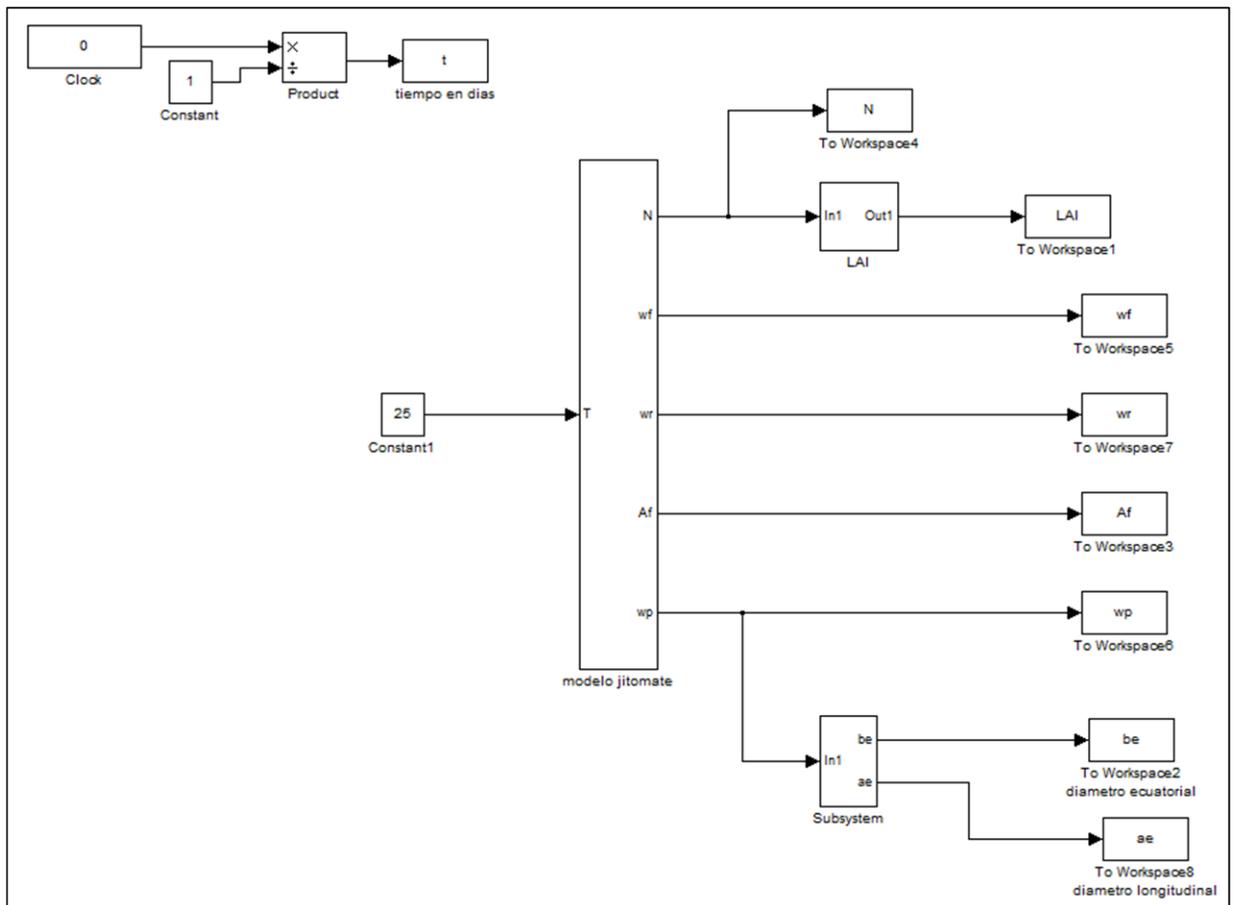


Figura 4.4 Modelo simulado del desarrollo y crecimiento del tomate en Simulink

Es trabajo fundamental en la producción de las plantas en la parte vegetativa y reproductiva incluyendo tallos, hoja raíz y los nodos en las planta, para llevar a cabo el proceso necesario para crecer, con la fotosíntesis que promueve la reproducción incluyendo la propagación de nodos en la planta para el crecimiento del área foliar; he ahí porque en este modelo se inicia el cálculo de número de nodos por planta.

4.3 VALORES SIMULADOS

Utilizando el simulador para poder analizar los resultados, utilizando el área foliar se calcularon el número de nodos (N) por planta estos dan inicio en la aparición de hojas en la planta, ya que estas van íntimamente relacionadas con el índice de área foliar (LAI) su crecimiento directamente proporcional, figura 4.5 se muestra el número de nodos (N) calculados para probar la ecuación (1) utilizando el simulador.

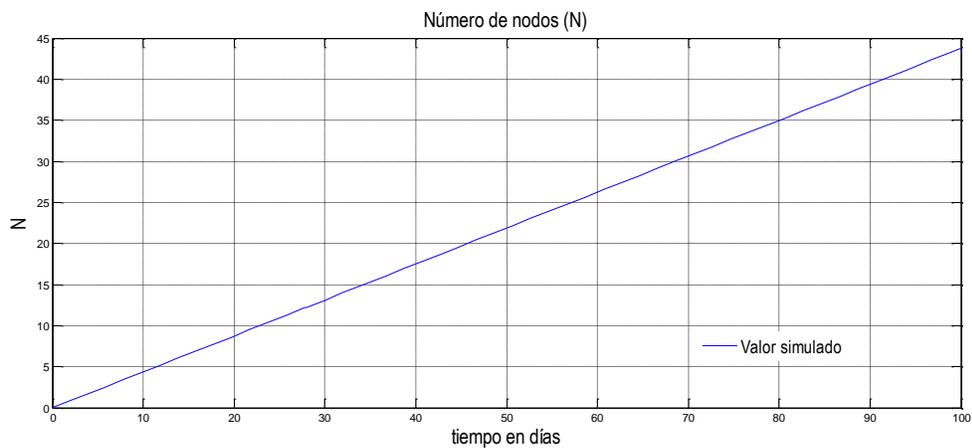


Figura 4.5. Número de nodos por planta en la simulación a 90 días

Gráficamente nos muestra un crecimiento lineal proporcional, en la simulación, a los 100 días se obtiene su máximo crecimiento presentando 40 nodos por planta.

En la figura 4.6 se indica a que se refiere un nodo en el área foliar en todas y cada uno de los brotes del desarrollo de hojas incluyendo el tallo de la planta.



Figura. 4.6 Nodos de una planta

El modelo responde a las variables ambientales: temperatura, radiación solar y concentración de CO_2 dentro del invernadero como lo menciona (Jones *et al.*, 1991), el índice del área foliar (LAI) en la simulación que se muestra en la Figura 4.7, esta es una función explícita del nodo posicional en la planta (Jones *et al.* 1999), cuando el área foliar en la planta está en proceso de crecimiento y expansión.

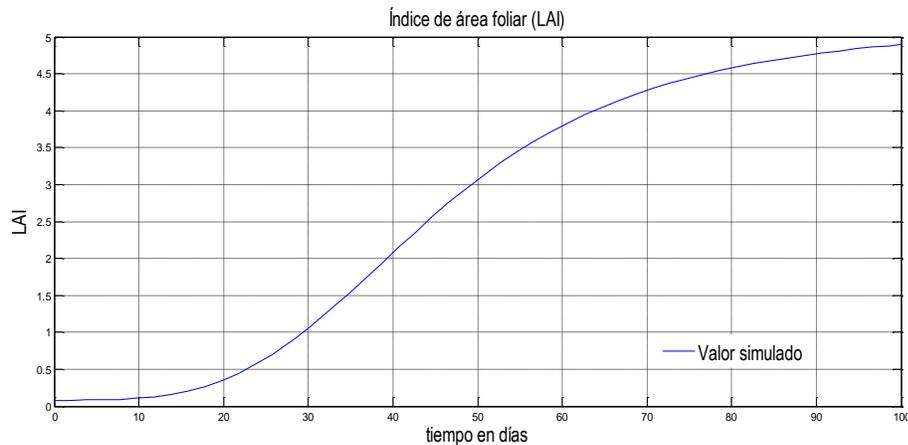


Figura 4.7 El índice de área foliar en la simulación durante 90 días.

El crecimiento se comienza a establecer el crecimiento a los 60 días es más lento comienza ya establecerse en el índice de 40 a 45 presentando un crecimiento exponencial; las variables ambientales se consideró una temperatura óptima de 25°C , la concentración de CO_2 contante de 350 ppm,

en invernadero como lo indica TOMGRO (L. Bacci *et al.*, 2012), se asume que cuando esta alcanza su máximo valor se establece y ya no hay cambios.

4.4 COMPARACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO CON VALORES REALES QUE RESULTAN DEL EXPERIMENTO.

Utilizando las ecuaciones del modelo y sustituyendo los valores reales de las variables de crecimiento para el desarrollo de frutos de tomate; se realiza un análisis de crecimiento en nodos (N), índice de área foliar, área foliar (AF), el peso del fruto (Wp), el diámetro ecuatorial (be), y el diámetro longitudinal (ae), donde experimentales contribuyen significativamente al estudio de respuestas del crecimiento de los frutos de tomate a alta densidad, se utilizaron los resultados de la segunda siembra para el análisis con el simulador, porque fue donde se obtuvieron los mejores resultados.

ÁREA FOLIAR

Por lo tanto se da inicio con el cálculo del Área foliar (AF) que se unen con el número de nodos (N), es parámetro ampliamente utilizado en estudios de ecofisiología de cultivos (Coombs y Hall, 1982) para conocer el comportamiento de un cultivo en condiciones ambientales de manejo y para medir su tasa de crecimiento en relación con el tiempo (Schwartz y Karting, 2001). Presenta una porosidad en los valores reales por qué no se midió el bióxido de carbono dentro del invernadero reflejándose en la masa seca del área foliar. .

Existen distintos métodos para conocer el área foliar (AF) de cultivos hortícolas, estos pueden clasificarse en destructivos (Dengler, 1984; Astegiano y Favaro, 1987; Payne *et al.*, 1991; Jatimliansky y Gimenez, 1993; Troiani y Mirasson, 1996) y no destructivos. Medir el AF es una variable de gran importancia para el modelo de crecimiento de tomate, a mayor

proporción de AF mayor rendimiento en los frutos de tomate. Se medir AF en tomate en las tres siembras, se realizaron muestreos destructivos aleatorios al azar semanales, alcanzar un resultado máximo en el primer ciclo, en la octava semana con un valor promedio de 1136 cm²/planta, como se muestra en la tabla 4.1 se indica en el anexo 1, donde hubo un incremento de asimilados fotosintéticos su expansión en hojas como se ve la figura 4.8.

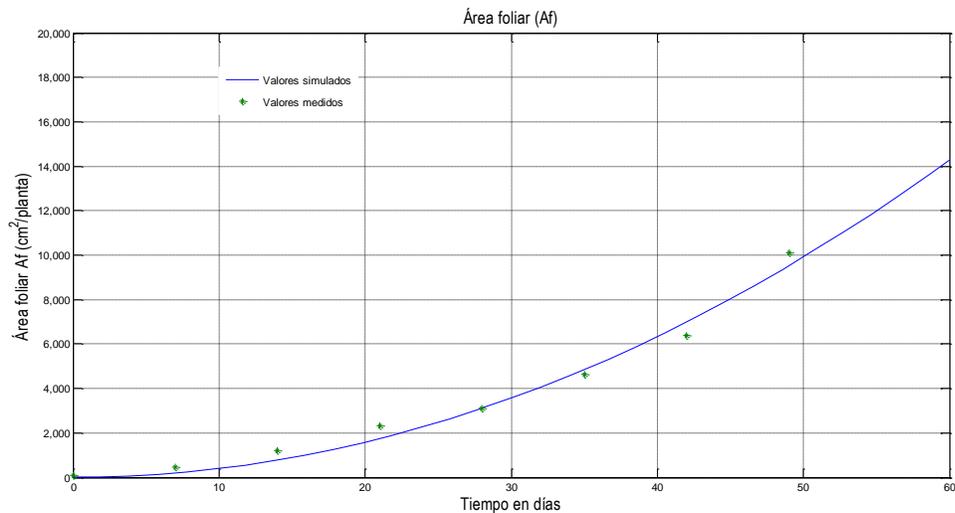


Figura 4.8 Desarrollo de área foliar (AF) en crecimiento de la planta para tomate

El mismo fenómeno se presentó en el crecimiento nodos (N) como del área foliar de la siembra II obteniendo un máximo de 5056.6738 cm², y en la misma semana.

MASA SECA DE ÁREA FOLIAR

La acumulación de masa seca de área foliar (MSAF) en los tres ciclos presento la misma tendencia con un aumento más lento al inicio de la etapa reproductiva alcanzando su valor más alto en la séptima semana, se realiza el despunte y esta disminuye y se mantiene casi contante en las próximas semanas; utilizando una estufa de circulación forzada de aire como ya se mencionó en el capítulo III, y poniendo a secar a 60°C durante 72 horas, se

obtuvieron los resultados que se muestran la figura 4.9. Se realizó un análisis comparativo entre los resultados de las tres siembras por una media de separación de Tukey ($P \leq 0.05$) como se muestra en la tabla 2 del anexo1, que determina que no existe diferencia significativa, el promedio entre las tres siembras es de 12.207 cm^2 en la segunda siembra.

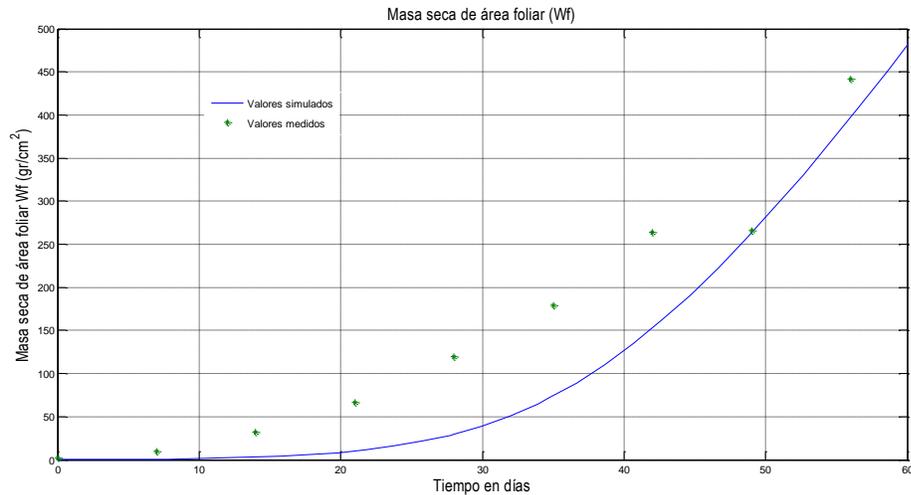


Figura 4.9. Masa seca de área foliar

Como menciona Herssema (1977) existe una relación entre el tallo y las hojas, al inicio generalmente existe un incremento y luego desciende ya que depende de la edad y el tamaño de la planta. En cambio, Schapendonk y Brouwer (1984) supone que en las plantas adultas la distribución de materia seca entre los tallos y hojas parece ser una constante independiente de la edad y el tamaño de la planta. Es común encontrar altibajos en la acumulación de la materia seca debido a que la planta suministra nutrientes a distintos órganos y además existe poda de brotes laterales. Es importante evaluar el área foliar y la masa seca del área foliar ya que son determinantes para el rendimiento de fruto de tomate.

PESO DEL FRUTO DE TOMATE

Continuando con el análisis del modelo el fruto se considera como órgano vertedero que toma de la planta con una serie de sustancias que se transforma como alimento para su crecimiento (Casierra-Posada *et al.* 2009). La variable peso de fruto (W_p) es la que determina y estima el rendimiento del cultivo. En la tabla 4.1 se aprecia que no existen valores mínimos significativos en las tres siembras de tomate. Realizando un comparativo la siembra II presento un rendimiento total de frutos de 1.531 kg en frutos por planta en proceso de maduración como se modelo en la figura 4.10 a alta densidad.

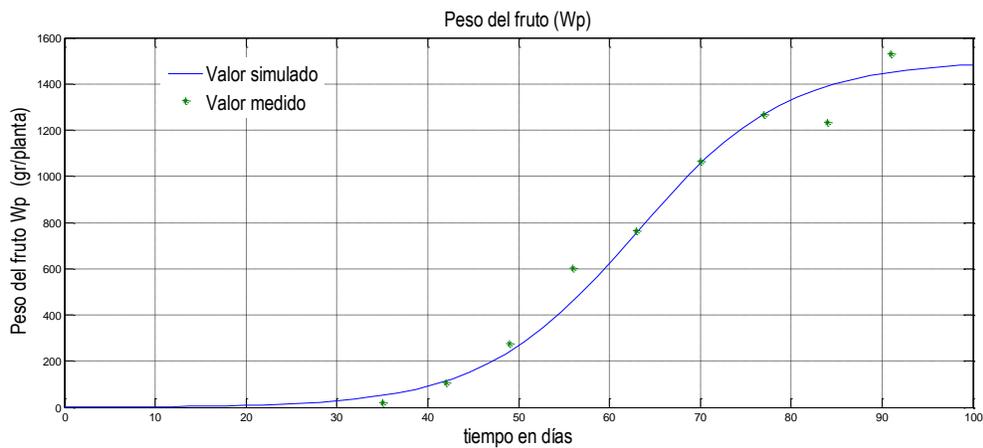


Figura 4.10 Crecimiento del fruto de tomate.

El fruto de tomate presenta un crecimiento exponencial función sigmoidea en el conjunto de frutos de tomate, la aparición de frutos comienza a los 35 días semana 5, y en su etapa de maduración comienza a establecerse a los 90 días, iniciando la cosecha, en las primeras semanas no es posible medir el diámetro ecuatorial (b_e), ni el diámetro longitudinal (a_e).

DIÁMETRO LONGITUDINAL Y ECUATORIAL DEL FRUTO DE TOMATE

El diámetro longitudinal (a_e) y ecuatorial (b_e) de fruto que se muestran en las figuras 4.11 y 4.12 presentan una constante de crecimiento como lo menciona (Guzmán *et al.*, 1996). En las tres siembras el diámetro de fruto

presenta un crecimiento proporcional. Coombe (1976) y Hunt (1990) afirman que las curvas de crecimiento sirven para identificar este crecimiento en función a las condiciones climáticas además de estimar el peso que tendrá el fruto en cosecha, esto se ve reflejado en cada uno de los gráficos siguientes:

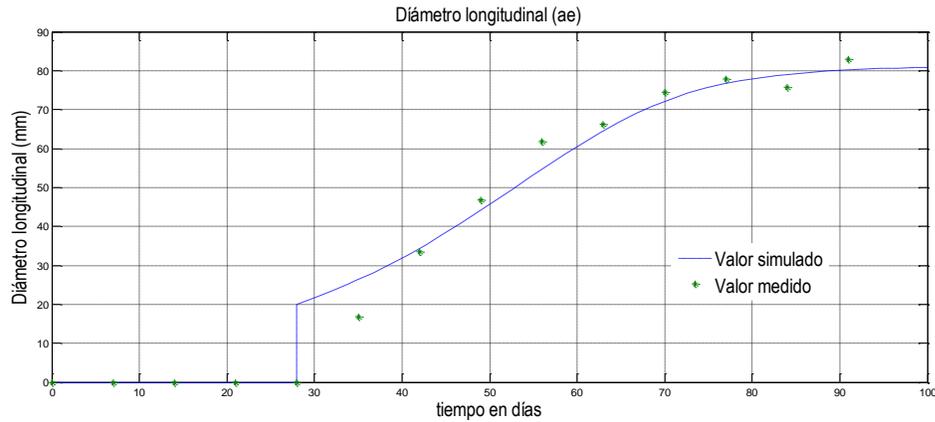


Figura 4.11. Diámetro longitudinal del fruto de tomate

A partir de la 4 semana comienza la formación del fruto, y tiene una curva sigmoidea ya que está relacionada con el peso, su desarrollo se comienza a establecer en la semana 11 según el ajuste de la curva. En el diámetro ecuatorial disminuye el crecimiento, sigue siendo exponencial debido a que esto va dependiendo del desarrollo y peso del fruto como se ve en la figura 4.10.

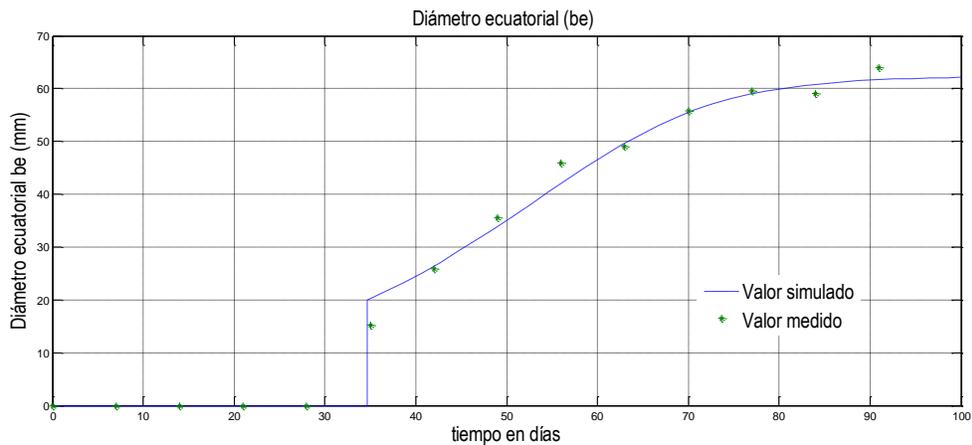


Figura 4.12. Diámetro del fruto de tomate

Es en la misma semana donde da inicio su desarrollo, y se establece igualmente que en el diámetro longitudinal, esto nos permite identificar que a alta densidad también es posible obtener frutos de buena consistencia para anaquel y que es peso diámetro longitudinal y ecuatorial son directamente proporcionales.

4.5 VALIDACIÓN DEL MODELO

Para poder validar el modelo matemático con el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales de primer grado descritas anteriormente, para el proceso de crecimiento y desarrollo de frutos de tomate, se consideran las variables morfológicas. Se da inicio con la simulación que describe el comportamiento del desarrollo del número de nodos (N) y se compara con el modelo que hace referencia L. Bacci *et al.* (2012) (TOMGRO), este se llevó a cabo en condiciones muy similares, esto nos permite hacer la relación y se obtienen resultados muy semejante como se muestra en la siguiente figura 4.13, con el número de nodos (N) por planta con la figura 4.5 que se obtiene al aplicar la ecuación 1, con el Simulink.

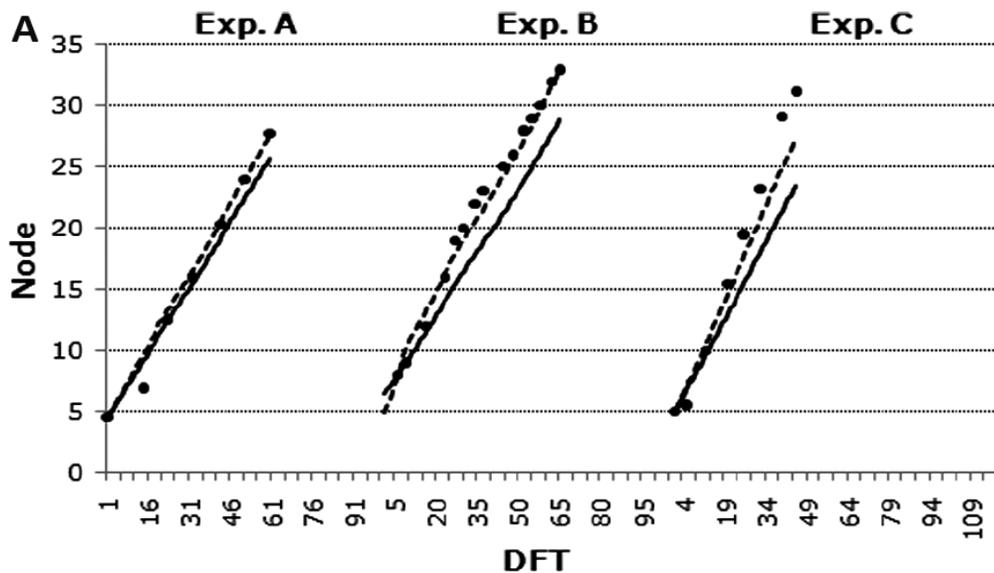


Figura 4.13 Número de nodos por planta de TOMGRO

Estos dos resultados muestran un crecimiento muy semejante, su comportamiento es lineal y aproximadamente en el mismo tiempo los cuales nos permite una solución correcta para continuar con las demás variables.

Continuando con la validación matemática se calcula el índice del área foliar (LAI) de la figura 4.7 y se compara con el de TOMGRO y estas son congruencia les cómo se manifiesta en la figura 4.14 donde los valores presentan un crecimiento exponencial.

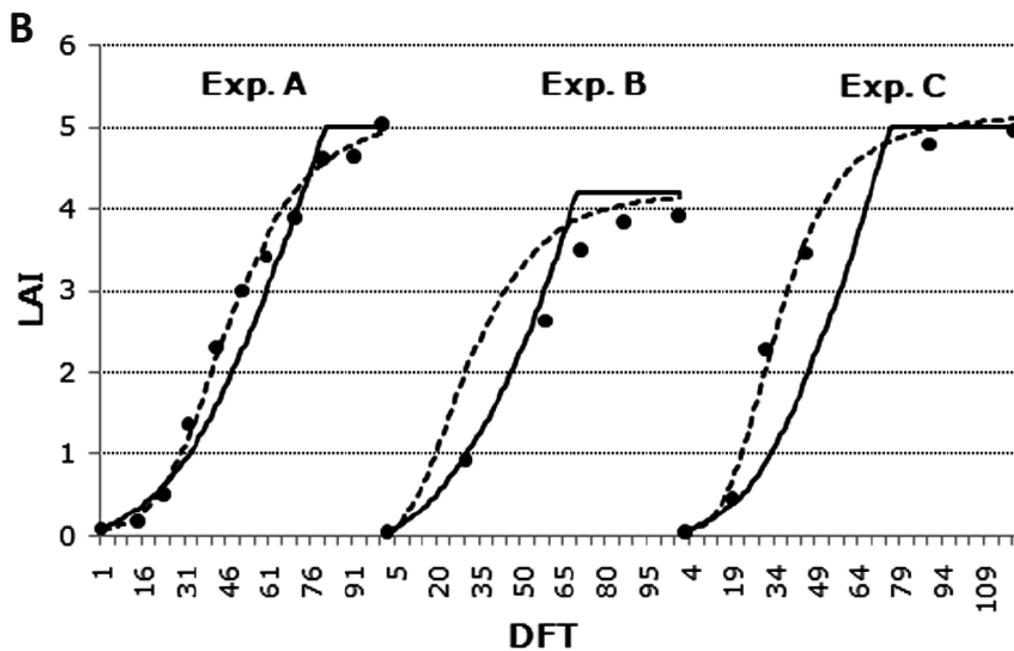


Figura 4.14 Índice de área foliar de TOMGRO.

Los resultados de LAI en una función explícita de nodo posición en la planta (Jones *et al.* 1999) y, siguiendo Goudriaan y Monteith (1990), la deflexión del crecimiento durante la última fase no es tenido en cuenta. Cuando LAI alcanza un valor máximo se asume que la cubierta de la hoja se mantiene sin cambios, el modelo simplificado crecimiento de tomate después de la reproductiva se despunta y el crecimiento del área foliar se mantiene y tiende

a disminuir porque se quitan los brotes laterales, y las sustancias nutritivas van destinadas a la formación del fruto.

El área foliar (AF) con los datos experimentales y los que muestra los resultados de TOMGRO durante el primero los primeros días del aparato fotosintético era pequeño en tamaño e incluso si la temperatura y los valores de radiación eran suficientes, sin embargo con las sustancias nutritivas la biomasa se incrementa como se muestra en la figura 4.7, fortaleciendo la planta y preparándola para el desarrollo de frutos, los datos experimentales con aplicación de la ecuación existiendo un grado amplio de co-linealidad con la figura 4.15, validando con el modelo expresado anteriormente.

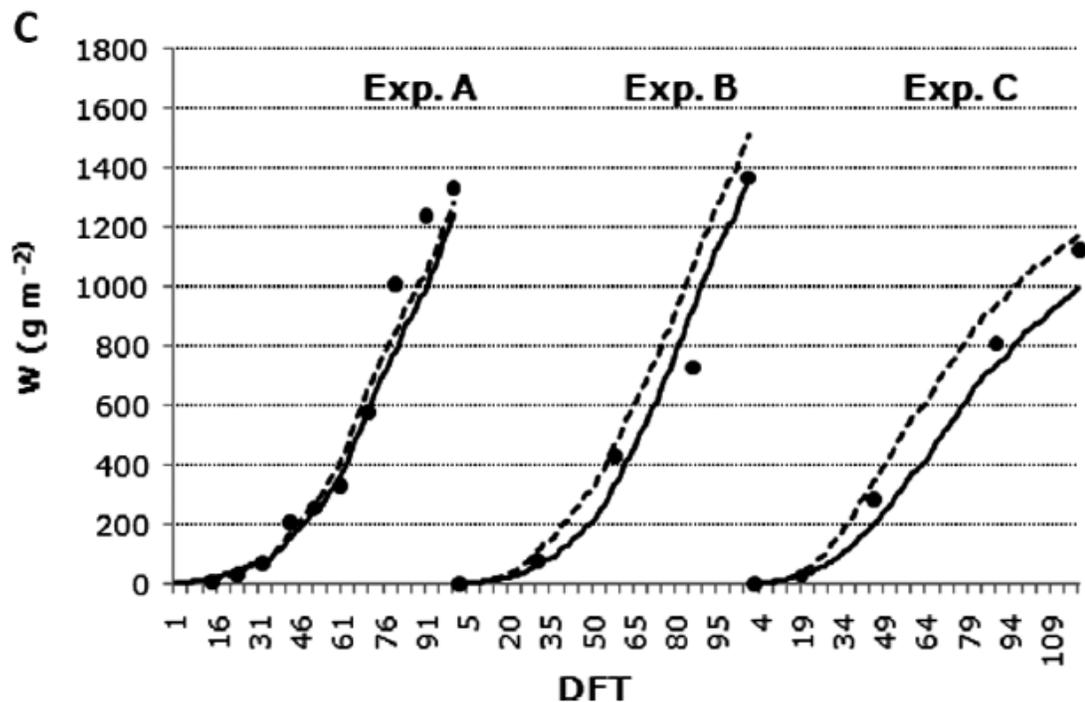


Figura 4.15 Crecimiento del área foliar TOMGRO.

Demostrando así que el sistema de ecuaciones del modelo simplificado de crecimiento de tomate, con una temperatura óptima es válida en cualquier

lugar, considerando como variable fundamental la temperatura, que es aplicable cuando hay el crecimiento de plantas a alta densidad.

Los modelos matemáticos son una herramienta útil para sintetizar procesos biológicos muy costosos, los modelos explicativos o mecanicistas, generalmente son modelos deterministas (Thornley y Johnson, 2000). Generalmente un modelo mecanicista está definido por un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias no- lineales que permiten describir el comportamiento de las variables apropiadas para expresar la descripción cuantitativa y una explicación en los procesos biológicos (Lopez-Cruz, I. L et al., 2005). Por lo que estos resultados son adecuados con lo planteado en este modelo matemático.

4.6 RENDIMIENTO TOTAL DE TOMATE ROJO TIPO SALADETTE

4.6.1 Primera siembra

Para determinar el rendimiento se hacen los siguientes cálculos de densidad de población:

$$\frac{100m^2}{0.30 \text{ distancia entre planta}} = 333 \text{ plantas en 4 hileras dobles}$$
$$= 1,333 \text{ plantas en } 100 m^2$$

Por lo tanto, la densidad estimada por hectárea es de:

$$1333 \times 57 \text{ lineas} = 75,998 \text{ plantas por ha.}$$

Ya que cada hilera doble con pasillo es de 1.75 m.

Entonces:

$$\frac{75998 \text{ plantas por hectárea}}{10,000 \text{ m}^2} = 7.59 \text{ plantas por m}^2 \approx 8 \text{ plantas por m}^2$$

El promedio de rendimiento obtenido por planta fue de 1.108 kg/planta. Se concluye que el rendimiento a alta densidad en esta siembra fue aproximadamente de 1.108 kg ya que se trasplantaron 1,041 plántulas las cuales se consideraron 114 en evaluación de resultados.

A una alta densidad de 2 planta por contenedor y 8 plantas por metro cuadrado.

4.6.2 Segunda siembra

En la segunda siembra se trasplantaron 1440 plántulas y se evaluó un total de 224 durante, tomando un muestre al azar de 16 plantas de 2 racimos a 4 frutos, durante 14 semanas, que fue el tiempo de la duración de la siembra.

Esta se llevó a cabo en el periodo se fue en el periodo primera – verano 2015 se alcanzó un promedio de 1.531 Kg por planta bajo las mismas condiciones de la primera siembra. Incrementando un 27.6 % a la siembra anterior.

Se considera que este incremento se atribuye a un buen manejo agronómico (podas, fertirriego, tutoreo y despunte de yemas axilares), dadas las condiciones ambientales del sitio de experimentación adaptable al cultivo de tomate.

4.6.3 Tercera siembra

En la tercera siembra se trasplantaron 1440 plántulas y se evaluó un total de 360 plantas durante ciclo, realizando un muestreo al azar de 16 plantas con 2 racimos a 4 frutos/racimo, durante 11 semanas, que fue el tiempo de la duración de la siembra.

Este período fue en el otoño – invierno 2015 - 2016 se alcanzó un promedio de 0.798 Kg por planta bajo las mismas condiciones de la primer siembra y

segunda siembra. Con una reducción del 28% comparada con la primera y un 47.9% en relación con la segunda siembra.

En la tercera siembra el rendimiento fue mínimo debido a que se presentaron problemas fitosanitarios de plagas y enfermedades por las condiciones climáticas durante esta etapa experimental.

En la tabla 4.4 se resumen los rendimientos en cada una de las siembras, lo cual nos permite saber que en esta zona en primavera verano se tienen temperaturas optimas con labores culturales constantes se obtendrá mejores resultados.

Tabla 4.1 Rendimientos por siembra de los diferentes ciclos

Siembra	Rendimiento (kg/planta)	Rendimiento (Kg/m ²)	Rendimiento por hectárea toneladas
I	1.108	17.728	177.280
II	1.531	24.496	244.960
III	0.798	12.7	127.680

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



El modelo matemático simplificado permite el análisis del cultivo de tomate y puede contribuir significativamente al agricultor para calcular su rendimiento, y el manejo del cultivo. El estudio de respuesta a las variables consideradas en el invernadero, muestran que la temperatura es determinante, solo que en este caso se consideró para la óptima de 25°C por las condiciones de modelado, eso nos da una pauta que para otros estudios es necesario considerar la temperatura variable registrada siempre y cuando se considere el registro del CO₂ y la humedad relativa durante la siembra.

Durante el estudio se logra identificar que a mayor área foliar por planta mayor rendimiento en el fruto, el rendimiento de masa seca mayor peso de fruto, lo cual es racional porque una planta raquítica no tiene la suficiente composición y estructura de aporte para la etapa reproductiva.

El modelo fue validado con otro experimento independiente y en condiciones muy similares, solo marca una diferencia que no es determinado por ello el rendimiento en área foliar es más amplio, sin embargo el modelo muestra una descripción con precisión el comportamiento del crecimiento del fruto de tomate.

Es posible con este sistema de ecuaciones como lo manifiesta Jones en el crecimiento del frijol, con las variables consideradas predecir el crecimiento, corregir parámetros que fisiológicos que influyan en este.

La simulación de los modelos nos amplía el panorama que es necesario definir con claridad las variables ambientales en procesos biológicos, en

este medio cambiante para detallar los procesos de modo explicativo con el objeto de obtener productos de larga vida de anaquel que ya sociedad nos demanda en la actualidad.

El presente modelo permite la aplicación para el cálculo de crecimiento en otras hortalizas generen racimos de frutos, producidas en invernadero. Además puede ser implantado en un sistema computacional, para el monitoreo de variables y parámetros en tiempo real.

Este trabajo confirma que con la determinación de las variables, se puede adaptar a cualquier estación del año en diferentes y a diferentes condiciones de crecimiento y proporcionar información útil para otros cultivos de tomate.

Recomendaciones:

1.- Selección de plántula vigorosa, es el soporte inicial para que durante el desarrollo y crecimiento de las etapas fenológicas de planta, realizando el cambio de nutrición justo a tiempo para la obtención de frutos con peso óptimo, y de larga vida de anaquel.

2.- Un buen manejo del cultivo como: corte de brotes laterales, raleo de fruto y despunte de yema pical, favorece el rendimiento en cosecha.

3.- Para mejorar este modelo matemático y no exista porosidad en el ajuste con el simulador en masa seca de área foliar es conveniente medir en cada muestra el nivel de clorofila de manera semanal.

4.- Para mejor aporte a resultados es recomendable llevar durante la siembra la aplicación de sistemas de ecuaciones y realizar el análisis de otras variables que aporten mayor información para mejorar la producción del tomate.

BIBLIOGRAFÍA



Abad, B. M., y P. Noguera, M. (2000). Los sustratos en los cultivos sin suelo. Manual de cultivo sin suelo. 2ª Edición, Mandí Prensa. España.

Abad, B., Noguera, M., & Carrión, B. (2005). Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. Fertirrigación: Cultivos hortícolas y ornamentales. 2ª Edición, Mandí Prensa, España.

Abad, M., Noguera, P., & Carrión, C. (2004). Los sustratos en los cultivos sin suelo. En: Tratado de cultivo sin suelo. 3ª Edición, Mandí Prensa, España.

Abreu, P., Meneses J. F., Gary, C. (2000). Tompousse: a model of yield prediction for tomato crops. Calibration study for unheated plastic greenhouses, *Acta Horticulturae*. (519): 141-150.

Adams, S. R., Cockshull, K. E., and Cave, C. R. J. (2001). Effect of temperature on the growth and development of tomato fruits. *Annals of Botany*, 88(5), 869-877.

Almanza-Merchán, P. J., Fischer, G., Herrera-Arévalo, A., Jarma-Orozco, A., & Balaguera-López, H. E. (2012). Physicochemical behavior of Riesling x Silvaner grapevine fruit under the high altitude conditions of Colombia (South America). *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 85(1), 49.

Amato, P. R., & Keith, B. (1991). Parental divorce and the well-being of children: a meta- analysis.

Angus, J. F., J. W. Bowden and B. A. Keating. (1993). Modelling nutrient responses in the field. *Plant and Soil* 155(156): 57-66.

Ardila, G., Fischer, G., and López, H. E. B. (2011). Caracterización del crecimiento del fruto y producción de tres híbridos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en tiempo fisiológico bajo invernadero. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 5(1), 44-56.

Arellano-García, M. A., Valera-Martínez, D. L., Urrestarazu-Gavilán, M., Quezada-Martín, M., Murguía-López, J., & Zermeño-González, A. (2011). Ventilación natural y forzada de invernaderos tipo Almería y su relación con el rendimiento de tomate. *Terra Latinoamericana*, 29(4), 379-386.

Astegiano E.D., Favaro J.C. (1987). Desarrollo del área foliar en tres cultivares de tomate. Resúmenes de la XVIII Reunión Nacional de Fisiología Vegetal. Corrientes. Argentina, 4 pp.

Astegiano, E. D., Favaro, J. C., & Bouzo, C. A. (2001). Estimación del área foliar en distintos cultivares de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) utilizando medidas foliares lineales. *Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetales*, 16(2), 249-256..

Astegiano, E. D., Favaro, J. C., & Bouzo, C. A. (2001). Estimación del área foliar en distintos cultivares de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) utilizando medidas foliares lineales. *Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetales*, 16(2), 249-256.

Ávila-Serrano, N. Y., Murillo-Amador, B., Espinoza-Villavicencio, J. L., Palacios-Espinoza, A., Guillén-Trujillo, A., de la Peña, R. L., y García-Hernández, J. L. (2010). Modelos de predicción del rendimiento de grano y caracterización de cinco cultivares de frijol yorimón. *Trop. Subtrop. Agroec*, (12), 11-18.

Baille, M., Baille, A., and Laury, J. C. (1994). A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area. *Scientia Horticulturae*, 59(3), 217-232.

Baixauli, S. C., Aguilar, J. M. (2002). Cultivo sin Suelo de Hortalizas: aspectos prácticos y experiencias. Ed. Generalitat Valenciana, Consellería de Agricultura, Pesca y Alimentación. Serie Divulgación Técnica. 110 p.

Bannayan M, N M J Crout .(1999). A stochastic modeling approach for real-time forecasting of winter wheat yield. *Field Crops Res.* 62: 85-95.

Bastida, O. A. (2012). Métodos de jitomate (*Solanum Lycopersicum L.*) bajo invernadero basados en doseles escaleriformes. Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 115 P.

Bojacá C. R., N. Y. Luque y O. I. Monsalve. (2009). Análisis de la productividad del tomate en invernadero bajo diferentes manejos mediante modelos mixtos. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 3:188-198

Bojacá, C. R., Luque, N. Y., & Monsalve, O. I. (2011). Análisis de la productividad del tomate en invernadero bajo diferentes manejos mediante modelos mixtos. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 3(2), 188-198.

Bolaños, A. 2001. Introducción a la olericultura. San José, Costa Rica. EUNED. 380 p.

Boote, K. J., J. W. Jones and N. B. Pickering. (1996). Potential uses and limitations of crop models. *Agron. J.* 88:704-716.

Borgman, L. E., & Quimby, W. F. (1988). Sampling for tests of hypothesis when data are correlated in space and time. *Principles of environmental sampling*, 25-43.

Bot, G. P. (1983). Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model (Doctoral dissertation, Landbouwhogeschool te Wageningen).

- Boulard, T., & Wang, S. (2000). Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100(1), 25-34.
- Bugarín, M. R. (2002). Simulación de la demanda y suministro edáfico de potasio en tomate. Tesis de doctorado. Área de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad de Colima. Tecomán, Colima. 141 p.
- Bunge, M. (1975). Teoría y realidad (No. 501 B942t). Edit. Ariel.
- Cadahia, C. (2005). Fertirrigación. Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. 3ª ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. 681 pp.
- Cancino B, J.; Sánchez Del C., F.; Espinosa R., P. (1990). Efecto del despunte y densidad de población en dos variedades de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en hidroponía bajo invernadero. *Revista Chapingo* 73-74: 26-30.
- Cardona, N. (2013). *Evaluación de fuentes de fertilización orgánica en tomate bajo condiciones de invernadero* (tesis de pregrado). Universidad de Nuevo León, México.
- Carpeño, B. (2004). Manual del cultivo de tomate, El Salvador, Centro de Inversión, Desarrollo y Exportación de Agronegocios. 38 p.
- Carranza, C., Lancho, O., Miranda, D., & Chaves, B. (2009). Análisis del crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) 'Batavia' cultivada en un suelo salino de la Sabana de Bogotá. *Agron. Colomb*, 27(1), 41-48.
- Casanova, V. V. E. (2008). Modelación de dióxido de carbono (CO₂) en invernaderos ventilados naturalmente. Tesis para Ingeniería de Invernaderos. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro. Santiago de Querétaro, Qro. 67 p.

Casierra Posada, F., y Cardozo, M. C. (2009). Análisis básico del crecimiento en frutos de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill, cv.'Quindío') cultivados a campo abierto. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, 62(1), 4815-4822.

Casierra-Posada, F., Cardozo, M. C., & Cárdenas-Hernández, J. F. (2007). Análisis del crecimiento en frutos de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivados bajo invernadero. *Agronomía colombiana*, 25(2), 299-305.

Castellanos Z., J; Borbón M., C. (2009). Panorama de la agricultura protegida en México, pp.1-17, In: *Manual de Producción de Tomate en Invernadero*. Castellanos Z., J. (ed.). Editado por Intagri, S.C., Celaya, Guanajuato, México.

Castellanos Z., J; Ojodeagua, J. L (2009). Formulación de la solución nutritiva, pp.131-156, In: *Manual de Producción de Tomate en Invernadero*. Castellanos Z., J. (ed.). Editado por Intagri, S.C., Celaya, Guanajuato, México.

Castellanos Z., J; Vargas T., P. (2009). Los sustratos en horticultura protegida, pp.131-156, In: *Manual de Producción de Tomate en Invernadero*. Castellanos Z., J. (ed.). Editado por Intagri, S.C., Celaya, Guanajuato, México.

Castillo, M. L. E. (2007). *Introducción al SAS para Windows*. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Parasitología Agrícola, Chapingo, México. pp. 235.

CATIE. (1990). (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). *Guía para el manejo integrado de plagas del cultivo de tomate*. Turrialba. Costa Rica. p.

Cellina, A., & Ornelas, A. (1990). Convexity and the closure of the solution set to differential inclusions. *BOLLETTINO DELL'UNIONE MATEMATICA ITALIANA*. B, 4(2), 255-263.

Chalabi, Z. S.; Biro, A.; Bailey, B. J.; Aikman D. P.; Cockshull, K. E. (2002b). Optimal control strategies for carbon dioxide enrichment in greenhouse tomato crops. Part II: Using the exhaust gases of natural gas fired boilers. *Biosystems Engineering* 81(3): 323-332.

Chalabi, Z. S.; Biro, A.; Bailey, B. J.; Aikman, D. P.; Cockshull, K. E. (2002^a). Optimal control strategies for carbon dioxide enrichment in greenhouse tomato crops. Part I: Using pure carbon dioxide. *Biosystems Engineering* 81(4): 421-431.

Chamarro L. J. (2001). Anatomía y Fisiología de la planta. In: *El Cultivo del Tomate*. F. Nuez. Mandí Prensa. España: 43-91.

Coombs J., Hall D.O. (1982). Whole Plant Photosynthesis and Productivity. In: *Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis*. Pergamon Press, Oxford. 171 pp.

Corominas, J. (1990). Breve Diccionario Etimológico de la Lengua Castellana. Ed. Gredos. Madrid.

Cota, J. R. V., Hernández, V. A. G., Salazar, J. A. C., Livera, M., Muñoz, F. S. D. C., & Enciso, T. O.(2004). Crecimiento y rendimiento de tomate en respuesta a densidades de población en dos sistemas de producción. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27(4), 333-338.

Cruces C. R (1990). Lo que México aportó al Mundo. Edit. Panorama. 2^a reimpresión. México, D.F. pp. 61-64.

Cruz, I. L. L., Arias, A. R., & Aguilar, A. R. (2004). Análisis de sensibilidad de un modelo dinámico de crecimiento para lechugas (*Lactuca sativa* L.) cultivado en invernadero.

Cruz, I. L., Arias, A. R., & Aguilar, A. R. (1994). Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: trascendiendo la contemplación de la dinámica de

cultivos. Revista Chapingo. Serie horticultura, (Universidad Nacional de Chapingo: México), 56-60.

D'Arcy WG. (1991). The Solanaceae since 1976, with a review of its biogeography. En: Hawkes JG, Lester RN, Nee M, Estrada E (eds.) Solanaceae III: Taxonomy, Chemistry, Evolution. Royal Botanic Garden, Kew, pp. 75-137.

Dayan, E., Presnov, E., Fuchs, M., & Ben Asher, J. (2001). Rose grow: a model to describe greenhouse rose growth. In IV International Symposium on Models for Plant Growth and Control in Greenhouses: Modeling for the 21st Century-Agronomic and 593 (pp. 63-70).

Dayan, E.; Van Keulen, H.; Jones, J. W.; Zipori, I.; Shmuel, D.; Challa, H. (1993a). Development, calibration and validation of a greenhouse tomato growth model. I. Description of the model. *Agricultural Systems* 43: 145-164.

Dayan, E.; Van Keulen, H.; Jones, J.W.; Zipori, I.; Shmuel, D.; Challa, H. (1993b). Development, calibration and validation of a greenhouse tomato growth model. II. Field Calibration and Validation, *Agricultural Systems* 43: 165-183.

De León, W. E. (2009). Evaluación ambiental de la producción del cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), bajo condiciones protegidas en las palmas Gran Canaria, España, mediante la utilización de la metodología del análisis del ciclo de vida (ACV), 2007- 2009. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona. Barcelona, España. 160 p.

De Koning, A. N. M. (1989). The effect of temperature on fruit growth and fruit load of tomato. *Acta Horticulturae*, v.248, p.329-336.

De Koning, A. N. M. (1994). Development and dry matter distribution in glasshouse tomato: a quantitative approach. PhD Thesis. Wageningen Agricultural University. Wageningen. The Netherlands. 240 p.

Deltour, J., De Halleux, D., Nijskens, J., Coutisse, S., & Nisen, A. (1985, May). Dynamic modelling of heat and mass transfer in greenhouses. In Symposium Greenhouse Climate and its Control 174 (pp. 119-126).

Dengler N. G. (1984). Comparison of leaf development in normal (+/+), entire (e/e) and lanceolated (La/+) plants of tomato, *Lycopersicon esculentum* Mill. «Ailsa craig». *Botanical Gazette* 145, 66-77.

Depestre, T; Gomez, O. (1999). Mejoramiento de plantas. La Habana, Cuba, Instituto de Investigación Hortícola. p. 11-16.

DeVore J.L (2006). Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias. Ed. THOMSON, 6ª Edición. México. pp. 564.

Elizalde, N. S., Pellat, F. P., Lara, M. O., & González, M. A. B. (2009). Modelo expo-lineal del crecimiento y equivalencia de la productividad de un tomate cultivado en invernadero. *Terra Latinoamericana*, 27(2), 143-151.

Enriquez-Reyes, S. A., Alcántar-González, G., Castellanos-Ramos, J. Z., Suárez, E. A., González-Eguiarte, D., & Lazcano-Ferrat, I. (2003). Nutrición mineral acoplada al crecimiento (NUMAC): nutrición con N para tomate en invernadero 1. Descripción del modelo y obtención de parámetros. *Terra Latinoamericana*, 21(2), 167-175.

Espinoza, M. G. (2008). Análisis de la diversidad genética de *Clavibacter Michiganensis* subsp. *Michiganensis*, *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* y *Xanthomonas campestris* pv. *Vesicatoria* en cultivos de tomate en Sinaloa. Tesis de maestría en recursos naturales y medio ambiente. Instituto Politécnico Nacional. Guasave, Sinaloa, México. 112 p.

Esquinas-Alcázar J. y F. V. Nuez. (2001). Situación taxonómica, domesticación y difusión del tomate. In: *El Cultivo del Tomate*. F. Nuez. Mundi Prensa. España pp. 13-42.

Fallas, J. (2012). Análisis de Varianza. Comparando tres o más medias.[Documento en línea]. Disponible en: http://www.ucipfg.Com/Repositorio/MGAP/MGAP5/BLOQUEACADEMICO/Unidad-2/complementarias/analisis_de_varianza_2012. Pdf [Consulta: 28 de septiembre de 2015].

FAO (Organización para la agricultura y la alimentación). (2007). [en línea] <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>. [Consulta: 20 de marzo de 2014].

Fernando Nuez, (2001). El Cultivo del Tomate, 1ª Edición 1995, Reimpresión 2001, Ediciones Mundi-Prensa, España, Barcelona: 15-41, 45-87, 95-128, 191-203, 229-239, 254-308, 313-348, 627-659, 673-663, 743-766.

Fischer, G., Casierra-Posada, F., & Piedrahíta, W. (2009). Ecofisiología de las especies pasifloráceas cultivadas en Colombia. Cultivo, poscosecha y comercialización de las pasifloráceas en Colombia: maracuyá, granadilla, gulupa y curuba. Sociedad Colombiana de Ciencias Hortícolas. Bogotá, Colombia, 45-67.

Fleisher, D. H.; Logendra, L. S.; Moraru, C.; Both, A.; Cavazzoni, J.; Gianfagna, T.; Lee, T.; Janes, H. W. (2006): "Effect of temperature perturbations on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Quality and production scheduling"; Hort, J.; Science and Biotech, (81)1; pp. 125-131.

Flores, I. (1986). Cultivos de Hortalizas. Monterrey, México: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. División de Ciencias Agropecuarias y Marítimas. Departamento de Agronomía. 170 p.

Galvis, S. A. (1998). Diagnóstico y simulación del suministro de nitrógeno edáfico para cultivos anuales. Tesis de Doctor en Ciencias. IRENAT, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 327 p.

García, E. (1985). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Tercera edición. Offset Larios. México. 251 p.

García, M., & Urrestarazu, M. (1999). Recirculación de la disolución nutritiva en las condiciones de los invernaderos de la Europa del sur. Caja Rural de Granada.

García, R. L. (1991). La población y el crecimiento económico de Cantabria en el Antiguo Régimen (Vol. 9). Ed. Universidad de Cantabria.

Gardner, H. W., Dornbos Jr, D. L., & Desjardins, A. E. (1990). Hexanal, trans-2-hexenal, and trans-2-nonenal inhibit soybean, *Glycine max*, seed germination. *Journal of agricultural and food chemistry*, 38(6), 1316-1320.

Gary, C. (1999). Modelling greenhouse crops: state of the art and perspectives. *Acta Horticulturae* 495: 317-322.

Gary, C.; Baille, A.; Navarrete, M.; Et Espanet, R. (1996). "Tompousse", un modele simplifié de prévision du rendement et du calibre del tomate, pp. 100-109. In: *Actes du Séminaire de l'AIP Serres*. A. BAILLE (Ed.). INRA. Avignon. France.

Gary, C.; Barczi, J. F.; Bertin, N.; Tchamitchian, M. (1995). Simulation of individual organ growth and development on a tomato plant: a model and a user-friendly interface. *Actes Horticulturae* 399: 199-205.

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

Garza, L. J. (1985). Las hortalizas cultivadas en México. Características botánicas. Departamento de Fitotecnia. UACH. Chapingo, Estado de México, México.

Giacomelli, A. (1998). Components of radiation defined: definition of units, measuring radiation transmission, sensors. Greenhouse Glazing & Solar Radiation Transmission Workshop, October 1998. Center for Controlled Environment Agriculture. Rutgers University, Cook College.

Gijzen, H. (1992). Simulation of photosynthesis and dry matter production of greenhouse crops, Simulation Report CABO-TT Nr 28, 1992. CABO-DLO. Wageningen. The Netherlands. 69 pp.

Gijzen, H.; Heuvelink, E.; Marcelis, L.F.M.; Dayan, E.; Cohen, S.; Fuchs, M.; Challa, H.(1998).HORTISIM: A model for greenhouses crops and greenhouse climate, *Acta Horticulturae* 456: 441-450.

Gillaspy, G., Ben-David, H., & Gruissem, W. (1993). Fruits: a developmental perspective. *The Plant Cell*, 5(10), 1439.

González, M. E. (2007). Tecnología para la producción de planta de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) por esqueje. Tesis en Ingeniería de Invernaderos. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, Qro. 69 p.

Goudriaan, J., & Monteith, J. L. (1990). A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. *Annals of botany*, 66(6), 695-701.

Goudriaan, J.; Van Laar H. H. (1994). Modelling Potential Crop Growth Processes. Textbook with Exercises. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, the Netherlands. 238 p.

Guzmán, E. C.; Alcalde, B. S.; Mosqueda, V. R.; Martínez, G. A. (1996). Ecuación para estimar el volumen y dinámica de crecimiento del fruto de mango cv. Manila. *Agronomía Tropical* 46(4): 395-412.

Haef, V. J. Manuales para educación agropecuaria, área: producción vegetal México D. F.: Editorial Trillas, 1983. 77p.

Hall, D. O., & Coombs, J. (1982). Techniques in bioproductivity and photosynthesis. Pergamon Press.

Harssema, H. Root temperature and growth of young tomato plants. Wageningen, (1977). 86p. Tese (doutorado em Horticultura). Wageningen Agricultural University. [90]Heuvelink, E. 1995. Dry matter production in a tomato crop: measurements and simulations. *Annals of Botany* 75: 369-379.

Hernández, J., Escobar, I., & Castilla, N. (2001). La radiación solar en invernaderos mediterráneos. Caja Rural.

Heuvelink, E. (1996). Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. PhD Thesis. Wageningen Agricultural University. Wageningen. The Netherlands. 326 p.

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

Heuvelink, E., Bakker, M. J., Marcelis, L. F. M., & Raaphorst, M. (2008). Climate and yield in a closed greenhouse. *Acta Horticulturae*, 801, 1083-1092.

Higuer a, A. (1992). Efectividad de los modelos de Gardner-Eberhart y Griffing en la determinación de la importancia relativa de la varianza aditiva en un cruzamiento dialélico de ocho líneas de frijol *Vigna unguiculata* (L.) Walp. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 9(2).

Howard, M. (1998). Hydroponic Food Production. A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower. Woodbridge. Santa Barbara, California. 520 p.

Huerres C. y Carballo N. (1988). Cultivo de tomate y pimiento. Pueblo y educación. La Habana, Cuba. p. 30.

Hunt, R. (1990). Basic growth analysis. Plant growth analysis for beginners. Unwin Hyman, Boston. 110 p.

Hunziker, A. T. (1979). South American Solanaceae: a Synoptic Survey. En: "Hawkes, J. G., Lester, R. N.; Skelding, A. D. (Eds). The Biology and Taxonomy of the Solanaceae. Academic Press, New York & London": p. 49-85.

INTA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (1999) Cultivo de tomate. Guía tecnológica del tomate. Ed. Henner Obregón N° 22 Managua, Nicaragua. p. 55. [101] Ioslovich, I.; Seginer, I. 2002. Acceptable nitrate concentration of greenhouse lettuce: two optimal policies. Biosystems Engineering 83(2): 199-215.

Jaramillo, S. y Lobo M. (1984). Manual de asistencia técnica de hortalizas, ICA.

Jarquín, D. (2004): Evaluación de cuatro variedades de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill), basado en el complejo mosca blanca (*Bemisia tabaci*) Geminivirus, en la comunidad de Apompuá, Potosí, Rivas, Nicaragua. Tesis de M. Sc. Managua, Nicaragua. p. 21-25.

Jatimiansky, J., Y Gimenez, D. (1993). Un método para estimar el área foliar en Cebadilla Criolla. XX Reunión Argentina de Fisiología Vegetal. SC de Bariloche, 142-145.

Jones, J. B., Jones, J. P., Stall, R. E. and Zitter, T. A. (1997). Compendium of Tomato Diseases. The American Phytopathological Society. St. Paul, Minnesota, USA. 73 P.

Jones, J. W., & Luyten, J. C. (1998). Simulation of biological processes. Agricultural systems modeling and simulation, 19-62.

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), 663-0672.

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* 3(2): 663-672.

Jones, J. W.; Kening, A.; Vallejos, C. E. (1999). Reduced state variables tomato growth model. *Transactions of the ASAE* 42(1): 255-265.

Kenig, A.; Jones, J. W. (1997). TOMGRO v3.0 a dynamic model of tomato growth and yield. In *Optimal Environmental control for Indeterminate Greenhouse Crops*. Seginer, I.; Jones, J.W.; Gutman P.; Vallejos, C. E. Bard (Ed.). Research Report No. IS-1995-91RC. Ch. II-5. Agricultural Engineering Dept. Technion. Haifa, Israel.

Lacointe, A. (2000). Carbon allocation among tree organs: a review of basic processes and representation in functional-structural tree models. *Ann. For. Sci.* 57:521-533.

Lee, C. (1972). Unionism and Wage Rates: A Simultaneous Equation Model with Qualitative and Limited Dependent Variables, *International Economic Review*, 19, 415-433.

Lemaire, F.; Dartigues, A.; Riviere, L. M.; Charpentier, S.; Morel, P. (2005). *Cultivos en macetas y contenedores. Principios agronómicos y aplicaciones*. Madrid: Ediciones Mandí Prensa. 210 pp.

Lentz, W. (1998). Model applications in horticulture: a review. *Scientia Horticulturae* 74: 151- 174.

López C., I. L.; Van Willigenburg, G.; Van Straten, G. (2003). Optimal control of nitrate in lettuce by a hybrid approach: differential evolution and ACW gradient algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture* 40: 179-197.

López, I. L.; Rojano, A.; Ramírez, A. y Bonilla, M. (2006). Modelos matemáticos para el crecimiento y desarrollo de cultivos: concepto y metodología. Universidad Autónoma Chapingo. 79 p.

López, P. J., Montoya, R. B., Brindis, R. C., Sánchez-Monteón, M. A. L., Cruz-Crespo, E., & Morales, R. B. (2011). Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. *Revista Fuente Año*, 3(8).

Lopez-Cruz, I. L., Ramirez-Arias, A., & Rojano-Aguilar, A. (2005). Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 11(2).

Lopez-Cruz, I. L., Ramirez-Arias, A., & Rojano-Aguilar, A. (2005). Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 11(2).

Lora, J., Herrero Romero, M., & Hormaza Urroz, J. I. (2007). Germinación de polen de chirimoyo. Implicaciones para la optimización de la polinización manual.

Marcelis, L. F. M. (1994a). A simulation model for dry matter partitioning in cucumber. *Annals of botany*, 74(1), 43-52.

Marcelis, L. F. M. (1994b). Fruit and dry matter partitioning in cucumber. PhD thesis. Wageningen University. Wageningen, the Netherlands. 173p.

Marcelis, L. F. M.; Elings, A.; de Visser, P. H. B. and Heuvelink, E. (2009). Simulating Growth and Development of Tomato Crop. *Acta Hort.* 821:101-110.

Martinez, P. F., D. Roca, R. Suay, M. Martinez, X, Blasco, J. M. Herrero, Y C. Ramos. (2002). Avances del control de los factores del clima para el cultivo en invernadero. *Agraria* 20: 29-47.

Martínez-Ruiz, A., López-Cruz, I. L., Ruiz-García, A., & Ramírez-Arias, A. (2013). Calibración y validación de un modelo de transpiración para gestión de riegos de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 757-766.

Masaguer y Cruz. (2007). Avances en sustratos para cultivos hortícolas: caracterización y manejo. 4a Curso Internacional de Actualización en Horticultura Protegida. Universidad Politécnica de Madrid (España). 44 p.

McAvoy, L., Schatz, C., Stutz, M. Schleien, & Lais, G. (1989). Integrated wilderness adventure. Effects on personal and lifestyle traits of persons with and without disabilities. *Therapeutic recreation Journal*. 23(3), 50-64.

Miller, I., & Freund, J. E. (1963). Probabilidad y estadística para ingenieros. Editorial PEARSON. 8a Edición. pp.323.

Montes, S.; Aguirre, J. R. (1992). Tomate de cáscara (*Physalis philadelphica*). En: Hernández, J. E.; León, J. (Eds.). Cultivos marginados, Otra perspectiva de 1492. FAO, Roma: 115-120.

Montgomery, D. C. (1991). Diseño y Análisis de Experimentos. Ed. Grupo Editorial Iberoamérica. México, 589 p.

Mulholland, B. J.; Edmondson, R. N.; Fussel, M.; Basham, J.; Ho, L. C. (2003): "Effects of high temperature on tomato summer fruit quality"; *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, (78) 3; pp. 365-374.

Muñoz R., J. J. (2003). La producción de hortalizas bajo invernadero en México. In: Manual de Producción Hortícola en Invernadero. J.Z. Castellanos y J.J. Muñoz R. (eds.). pp. 14-16.

Muñoz, M. (1995). Desarrollo de Ventajas Competitivas en la Agricultura: el Caso del Tomate Rojo. CUESTAAM-SAGAR. Chapingo, México. 120 p.

Nilwik, H. (1981). Growth analysis of sweet pepper (*Capasicum annum L.*). 1. Influence of irradiance and temperature under glasshouse conditions in winter. *Annual of Botany*, v.48, p.129-136,

Nounecke, L. (1998). *Vegetable production*. New York, USA.

Nuez, F. y Esquinas. (2001). *El cultivo del tomate*. Ediciones mundi – prensa Madrid, Barcelona, México. Pp. 16-32.

Nuez, F. (1995). Desarrollo de nuevos cultivares. En: Nuez, V. F. (ed.). *El Cultivo del tomate*. Mundi-Prensa. Madrid, España. p. 626 - 669.

Ojodeagua A., J. L.; Castellanos R., J. Z.; Muñoz R., J. J.; Alcantar G., G.; Tijerina, C.; L.; Vargas T., P.; Enríquez R., S. (2008). Eficiencia de suelo y tezontle en sistemas de producción de tomate en invernadero. *Fitotecnia Mexicana*. 31 (4) 367-374.

Ortega-Martínez, L. D., Sánchez-Olarte, J., Ocampo-Mendoza, J., Sandoval-Castro, E., Salcido-Ramos, B. A., & Manzo-Ramos, F. (2010). Efecto de diferentes sustratos en crecimiento y rendimiento de tomate (*Lycopersicum esculentum Mill*) bajo condiciones de invernadero. *Ra Ximhai*, 6(3), 339-346.

Pallares C., D.; Duran A., J. M. (2006). *Aplicación de ozono en disoluciones nutritivas recirculantes*. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. 10 P.

Pastor, J. N. (1999). "Utilización de sustratos en viveros". *Terra*. vol. 17, nº 3, p. 231

Payne W.A., Wendt C.W., Hossner L.R., Gates C.E., (1991). Estimating Pearl Millet Area and Specific Leaf Area. *Agron. J.* 83, 937-941.

Payne, W. A., Wendt, C. W., Hossner, L. R., & Gates, C. E. (1991). Estimating pearl millet leaf area and specific leaf area. *Agronomy Journal*, 83(6), 937-941.

Pearce, B.D.; Grange, R.I.; Hardewick, K. (1993). The growth of young tomato fruit. I. Effects of temperature and irradiance on fruit grown in controlled environments. *Journal of Agricultural Science*, v.68, p.1-11.

Peart, R. & Bruce, C. (1998). *Agricultural systems modeling and simulation*. 1st Ed. Marcel Dekker, Inc.

Peil, R. y J.R. Gálvez. (2005). Reparto de materia seca como factor determinante de la producción de las hortalizas de fruto cultivadas en invernadero. *Rev. Bras. Agrobiociência* 11(1), 5-11. Reunión Argentina de Fisiología Vegetal. S.C. de Bariloche. pp. 142-145.

Perez, J., Hurtado, G., Aparicio, V., Argueta, Q., & Larin, M. A. (2013). *Cultivo del Tomate*. El Salvador: Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal.

Pidd, M. (1996). *Tools for thinking*. Wiley.

Ramírez, V. & Sainz, R. (2006). *Manejo integrado de las enfermedades del tomate*. 1ra. Ed. Once ríos. Mexico. P.p. 19-160.

Resh, H. (1992). *Cultivos hidropónicos*. Traducido al español por Jaren C., C.; García P., E. Mundi-Prensa. Tercera edición. Madrid, España. 369 p.

Robles, J.(1999). *Como se Cultiva en Invernadero*. Ed. de Vecchi. Balmes, Barcelona. 189 p.

Rodríguez R., J. Tavares R. y J. A. Medina J. (1984). *Cultivo moderno del tomate*. Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España. 206 p.

Rodríguez, R. , J. M. Tavares R. y J. A. Medina J. (2001). *Cultivo Moderno del Tomate*. Mundi-Prensa. Madrid, España. 255 p.

Rodríguez, S. & Morales B. (2007). Evaluación de alternativas de protección físicas y químicas de semilleros de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill) contra el ataque de del complejo mosca blanca (*Bemisia tabaci*, Gennadius)-

Geminivirus y su efecto en el rendimiento, en el municipio de Tisma, Masaya. 76p.

Rojas-Lara, P. C., Pérez-Grajales, M., Colinas-León, M. T. B., Sahagún-Castellanos, J., & Avitia-García, E. (2008). Modelos matemáticos para estimar el crecimiento del fruto de chile manzano (*Capsicum pubescens* R y P). *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 14(3), 289-294.

SAGARPA (Secretaría de Agricultura Ganadería. Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2007). Evaluación Alianza para el Campo 2006. Informe de Evaluación Nacional. Subprograma de Salud Animal. (SAGARPA), México.

Sállago, J., Cruz, I. & García, E. (2013). Redes neuronales artificiales aplicadas a mediciones de fitomonitoreo para simular fotosíntesis en jitomate bajo invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 747-756.

Saltveit, M. E. (2005): "Fruit Ripening and Fruit Quality". Heuvelink. E. (ed.): Tomatoes. CABI Publishing. Cambridge. USA; pp. 145-170.

Sánchez Del C., F.; Corona S., T. (1994). Evaluación de cuatro variedades de jitomate bajo un sistema hidropónico a base de despuntes y altas densidades. *Revista Chapingo. Serie Horticultura* 1(2): 109-114.

Sánchez Del C., F.; P. Espinosa R., E. Escalante R. (1991). Producción super intensiva de jitomate en hidroponía bajo invernadero: avances de investigación. *Revista Chapingo* 78:62-68.

Sánchez Del C., F.; Ponce O., J. (1998). Densidades de población y niveles de despunte en jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivado en hidroponía. *Revista Chapingo, Serie Horticultura* 4(2): 89-94.

Sánchez, J., Rodríguez, F., Guzmán, J., Berenguel, M., & Fernández, M. (2008). Modelado de la transpiración de un cultivo de tomate bajo invernadero.

- Sandoval V. (2003). Cultivos hidropónicos. Cuatrimestre de verano EDA-654. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Saville, D. (1990). Multiple comparison procedures: the practical solution. *The American Statistician*, Vol 44(2): 174-180.
- Schapendonk, A. H. C. M., & Brouwer, P. (1984). Fruit growth of cucumber in relation to assimilate supply and sink activity. *Scientia Horticulturae*, 23(1), 21-33.
- Schapendonk, A.; Brouwer, P. (1984). Fruit growth of cucumber in relation to assimilate-supply and sink activity. *Scientia Horticulturae*, v.23, p.21-33.
- Schwartz, D. & Kläring, H. (2001). Allometry to estimate leaf area of tomato. *Journal of Plant Nutrition*. 24:1291-1309.
- Seginer, I.; Buwalda, F.; Straten, G. Van. (1998). Nitrate concentration in greenhouse lettuce: a modeling study. *Acta Horticulturae* 456: 189-197.
- Shagñay, L. (2016). Aclimatación de doce cultivares de tomate riñón (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riombamba, Ecuador.
- Sinclair, T. & N. G. Seligman. (1996). Crop modeling: From infancy to maturity. *Agron. J.* 88:698-704.
- Solorio, N., Paz, F., Odi, M., & Bolaños, M. (2008). Modelo expo–lineal del crecimiento y equivalencia de la productividad de un tomate cultivado en invernadero. *Terra Latin*, 27, 143-151.
- Stockle, C., Martin, S. & Campbell, G. (1994). CropSyst, a cropping systems simulation model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agricultural Systems*, 46(3), 335- 359.

Sweeney, D.; Hand, D.; Slack, G.; Thornley, J. (1981). Modelling the growth of winter lettuce. In: Mathematics in Plant Physiology. ROSE, D.A.; CHARLES- EDWARDS, D.A. (Eds.) Academic Press. London. 217-229.

Tap, F. (2000). Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production. PhD Thesis. Wageningen Agricultural University. Wageningen the Netherlands. 127 p.

Teres, V. (2001). Relaciones aire-agua en sustratos de cultivo como base para el control del riego. Metodología de laboratorio y modelización. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Departamento de Producción Vegetal, Fitotecnia.

Torres, J. C., Ríos, E., Peña, R., Martínez, D., Sánchez, P., Reyes, F., & Romero, G. Evaluación del Modelo de Jones para Desarrollar un Sistema por Computadora que Permita Determinar el Crecimiento del Frijol en Ambiente Controlado.

Torres, J., Ríos, E., Peña, R., Martínez, D., Sánchez, P., Reyes, F., & Romero, G. 2010). Evaluación del Modelo de Jones para Desarrollar un Sistema por Computadora que Permita Determinar el Crecimiento del Frijol en Ambiente Controlado.

Troiani M., Mirasson E., (1996). Comparación de dos métodos para estimar el área foliar en Amaranto. XXI Reunión Argentina de Fisiología Vegetal Actas. Mendoza, Argentina. Pp. 138-139.

Troiani, R., & Mirassón, E. (1996). Comparación de dos métodos para estimar área foliar en Amaranto. XXI Reunión Argentina de Fisiología Vegetal, Mendoza, Argentina. Actas, 138-139.

Urrestarazu. M. (2004). Tratado de cultivo sin suelo. 3a ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.914 P.

Van Haeff, J., Mondoñedo J., Parsons D., & Medina J. (1990). El cultivo del tomate. México D. F: Trillas. 5-6 pp.

Vargas, T.; Castellanos, R.; Sánchez, G.; Tijerina, C.; López R.; Ojodeagua A. (2008). Caracterización física, química y biológica de sustratos de polvo de coco. *Fitotecnia Mexicana* 31(4): 375-381.

Velázquez, R. (2011). Efecto de la aplicación de la bacteria *Azospirillum* sp. En rendimiento y calidad de fruto de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) híbrido "Río Supremo", a cielo abierto en la Comarca Lagunera. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". Torreón, Coahuila, México. 50 p.

Veliath, J. , Ferguson, A. (1972). The effect of deblossoming on fruit size, yield, and earliness in tomato. *HortScience* 7: 278–279.

Villa Real, R. (1982). Tomates. San José, Costa Rica, IICA. 184 p.

Von Zabeltitz, C. (2011). Heating. In *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates* (pp. 285-311). Springer, Berlin, Heidelberg.

Whitmore, A., K.Coleman, N, J, Bradbury & T. M. Addiscott. (1991). Simulation of nitrogen in soil and winter wheat crops: modeling nitrogen turnover through organic matter. *Fertilizer Research* 27: 283-291.

Wong-González, E. (2010). ¿Después de un análisis de variancia qué? Ejemplos en ciencia de alimentos. *Agronomía mesoamericana*, 21(2), 349-356.

Zarate, B. (2007). Producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) hidropónico con sustratos, bajo invernadero, tesis de maestría. C.I.D.I.R. Oaxaca, México.

Zeidan, O. (2005). Tomato production under protected conditions. Israel: Mashav, Cinadco, Ministry of Agriculture and Rural Development Extension Service. 99 p.

Zotarelli, L., J.M. Scholberg, M.D. Dukes, R. Muñoz- Carpena y J. Icerman. (2009). Tomato yield, biomass accumulation, root distribution and irrigation water use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. *Agr. Water Manage.* 96, 23-34.

Zúñiga, F. B., & Prieto, J. L. P. (2004). Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales. Universidad Nacional Autónoma de México.

ANEXO 1



COMPARACIÓN MÚLTIPLE DE MEDIAS EN LAS TRES SIEMBRAS

El establecimiento de tres distintas fechas de cultivo de tomate rojo tipo Saladette no mostro diferencias mínimas significativas ($P \leq 0.05$) en las variables área foliar, diámetro longitudinal, diámetro ecuatorial y peso de fruto.

En la tabla Anexo 1.1, ejecutando un análisis comparativo de crecimiento y desarrollo de las tres siembras realizadas utilizando la prueba Tukey ya que es muy similar a la Duncan y Newman ya que la única exigencia es que el número de repeticiones sea constante en todos los tratamientos. La prueba de comparación de medias permite hacer todas las posibles comparaciones de tratamientos que como resultado hacen posibles comparaciones entre variables (Wong-González, 2010).

Tabla Anexo 1.1 Evaluación de las tres siembras de tomate rojo determinado tipo Saladette en invernadero.

Siembra	Área foliar (cm ²)	Diámetro longitudinal (mm)	Diámetro ecuatorial (mm)	Peso de fruto (g)
I	1136.9a	38.603a	31.194a	65.417
II	1156.3a	59.581a	45.572a	86.429
III	1076.3a	53.102a	39.276a	75.117
DMSH	629.673	19.022	15.025	20.826
CV	56.014	38.325	39.221	27.115

Valores con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales según Tukey ($P \leq 0.05$); DMSH, diferencia mínima significativa honesta; CV, Coeficiente de variación (%). Siembra I (Otoño-invierno 2014-2015), siembra II (Primavera-verano 2015), siembra III (Otoño-invierno 2015-2016).

Los resultados arrojaron que no existen diferencias mínimas significativas en área foliar, diámetro longitudinal, diámetro ecuatorial y peso de fruto, en la siembra II se muestra en área foliar el promedio de crecimiento fue de 1156.3 cm², mientras que diámetro longitudinal fue de 59.518 mm, el diámetro ecuatorial se obtuvo un promedio de 45.572 mm, el valor promedio de peso de fruto fue de 86.429 g, lo cual fue una variable de importancia para determinar que siembra mostro el mejor rendimiento por planta de en producción de frutos. En estas variables se destaca un crecimiento mayor en estos parámetros, determinando que en esta siembra se obtuvieron resultados mayores en comparación con la siembra I y III.

En 1977 Harssema menciona que existe una relación entre el tallo y las hojas, generalmente aumenta y algunas descienden inicialmente ya que depende de la edad y tamaño de la planta. Por otra parte en 1981, Nilwik, explica que el peso de tallos y hojas tiene espacial importancia en plantas jóvenes. En cambio, Schapendonk and Brouwer en 1984, afirman que en plantas adultas la distribución de materia seca entre tallos y hojas parece ser una constante independiente de la edad y tamaño de la planta.

El tallo como también las hojas, son el sostén de la planta que a condiciones de la expansión de AF y altura de la planta se tiene una correlación en el tamaño del fruto, en cambio, si una planta es deficiente fisiológicamente sus frutos serán de menor tamaño. Es común que se encuentren altibajos en la acumulación de materia seca debido a que la planta suministra nutrientes a distintos órganos como principalmente van directo al desarrollo del fruto. Es importante evaluar la variable de materia seca de hoja para determinar el rendimiento del fruto.

Tabla Anexo 1.2 Comparación de tres siembras de tomate rojo tipo Saladette de materia seca de área foliar y fruto.

siembras	Materia seca área foliar (g)	Materia seca de fruto (g)
I	8.751a	22.66ab
II	12.207a	47.58a
III	4.996a	17.43b
DMSH	7.870	21.825
CV	83.163	71.856

Valores con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales según Tukey ($P \leq 0.05$); DMSH, diferencia mínima significativa honesta; CV, Coeficiente de variación (%). Siembra I (Otoño-invierno 2014-2015), siembra (Primavera-verano 2015), siembra III (Otoño-invierno 2015-2016).

Además se realizaron mediciones de diámetro longitudinal y ecuatorial y peso del fruto en las en los tres ciclos en la tabla 4.3 presentan el desarrollo semanal de estas variables.

Tabla Anexo 1.3 Peso, diámetro ecuatorial y longitudinal de fruto.

SIEMBRA I			SIEMBRA II			Tercer siembra		
Peso de fruto (g)	Diámetro ecuatorial (mm)	Diámetro longitudinal (mm)	Peso de fruto (g)	Diámetro ecuatorial (mm)	Diámetro longitudinal (mm)	Peso de fruto (g)	Diámetro ecuatorial (mm)	Diámetro longitudinal (mm)
2.202	1.591	2.435	3.264	13.884	19.311	7.049	19.703	24.075
7.800	3.263	4.517	16.191	25.378	34.016	15.439	26.738	35.013
15.224	16.254	23.191	36.338	35.888	47.371	26.618	31.027	42.041
33.449	19.962	31.379	74.989	46.111	61.579	40.299	36.858	48.288
37.409	23.671	39.567	96.151	49.054	65.870	65.864	43.474	57.649
40.167	32.334	47.107	148.270	55.703	82.384	73.808	45.569	68.071
56.774	40.996	54.647	150.891	58.065	129.012	105.592	51.988	67.553
70.410	36.052	53.662	162.548	59.963	150.666			
87.136	48.117	67.122	192.620	63.722	126.812			

El peso de fruto, diámetro ecuatorial y longitudinal de las tres siembras de promedios por semana.

La siembra I presenta un crecimiento de 30% en las tres primeras semanas, con valores de 87.06 mm, en la quinta semana como valor máximo de crecimiento. En la siembra I y III, se mantiene un incremento proporcional del 40% en las primeras cuatro semanas, para después disminuir de un 10% a 20%, lo cual coincide con Gillaspay *et al.* (1993) que menciona que el fruto inicia en tres fases: desarrollo del ovario, división celular y expansión celular. Si bien es cierto, Casierra *et al.* (2007) explicaron que en tres cultivares de tomate (Bravona, Sofía y Granitio) el fruto inicia con un crecimiento lento para después acelerar hasta los 50 días después de floración (ddf) y disminuir hasta llegar a cosecha. En tomate rojo Saladette el crecimiento de fruto es similar manteniendo un establecimiento acelerado hasta los 35 ddf, en cultivares de tipo precoz a obtención de fruto. Esta serie de cambios de crecimiento implica una relación con la temperatura, que es el factor determinante para el desarrollo del fruto. Adams *et al.* (2001), Muholland *et al.* (2003), Saltveit (2005) y Fleisher *et al.* (2006) mencionan que el fruto de tomate es muy sensible a las altas temperaturas cuando se superan los 26 a 30°C se observan alteraciones en diversos parámetros de calidad como el color del fruto, textura y características organolépticas. Es de vital importancia cuidar estos aspectos cuando se tienen las condiciones controladas en un invernadero.

Temperatura

Es una variable climática que más interviene en el desarrollo de la planta, en las diferentes etapas fenológicas de la planta, en el cultivo de tomate la temperatura es un factor influyente y a veces puede ser determinante para su proceso de crecimiento.

Cuando la temperatura aumenta las plantas requieren mayor disposición de agua, he ahí la necesidad de los riegos programados por día. Existe una

estrechamente relacionada con los demás factores ya que de manera individual no se lograría el crecimiento. La radiación solar, como ya se mencionó anteriormente es muy importante para el proceso fotosintético para la coloración de hojas, fijación las sustancias nutritivas, coloración de frutos, esto ha sido valorado con detalle (Hurd, R. G., & Graves, C. J. 1985); en la figura 4.12 se presentan las fluctuaciones de las temperaturas en las tres siembras.

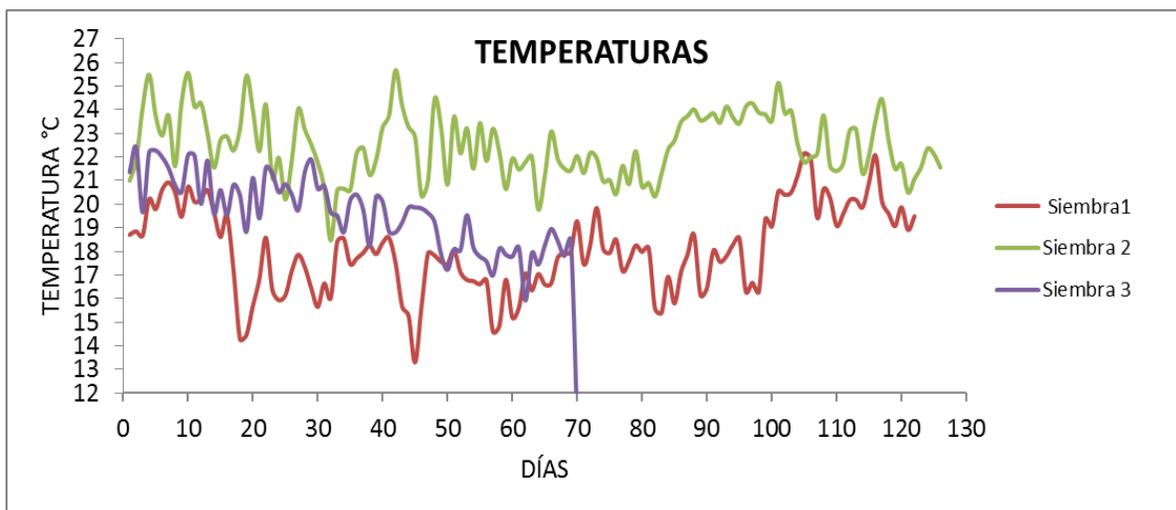


Figura Anexo 1. temperaturas de las tres siembras de cultivo.

Se determinaron los máximos y mínimos, tabla 4.3 y se detectó que las temperaturas más elevadas se presentaron en las siembras II, que fue donde se obtuvieron los mejores rendimientos de tomate por planta.

Tabla Anexo 1.4 Máximos mínimos y promedios de temperatura.

	SIEMBRA 1		SIEMBRA 2		SIEMBRA 3	
	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima
TEMPERATURA	22°C	13.3°C	24.17°C	18.46°C	22.9°C	15.19°C
DÍA	114	45	42	32	2	62
T. PROMEDIO	18.03181148		21.54893548		19.535177	