

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



SIMULACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR Y MATERIA SECA PARCIAL AÉREA DE UN CULTIVO DE MAÍZ (*Zea mays* L. VAR. JAGUAN) A TRES DENSIDADES DE SIEMBRA Y TRES NIVELES DE FERTILIZACIÓN, CON UN MODELO DINÁMICO DE SIMULACIÓN.

TESIS

PRESENTADA POR:

NEYMAR CAMPOSECO MONTEJO

Como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. JUNIO DE 2011.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Por:

NEYMAR CAMPOSECO MONTEJO

Que se Somete a la Consideración del H. Jurado Examinador Como
Requisito Parcial Para Obtener Título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

APROBADO

Dr. José Francisco Rodríguez Martínez
ASESOR PRINCIPAL

M.C. Fidel Maximiano Peña Ramos
ASESOR

Dra. Silvia Judith Martínez Amador
ASESOR

M.C. Sofía Comparan Sánchez
ASESOR

Dr. Mario Ernesto Vázquez Badillo
Coordinador de la División de Agronomía
División de Agronomía
Saltillo, Coahuila, México. Junio de 2011.



DEDICATORIA

A dios por haberme guiado e iluminado en mi camino y darme una familia maravillosa.

A mis padres Juan Camposeco Ross y Milida Montejo Mejía por haberme dado la vida y su apoyo incondicional durante el proceso de mi formación académica, profesional y como persona.

A mis hermanos Rudy, Uriel y Yesi Anali que siempre me impulsaron a seguir y estuvieron apoyándome en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y mi familia por haberme brindado su apoyo moral, espiritual y económico durante mi proceso de formación académica y profesional, y porque siempre me impulsaban a seguir adelante.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por haberme dado la oportunidad de formarme profesionalmente.

Al Dr. José Francisco Rodríguez Martínez por haberme guiado y contribuido en la conducción y ejecución de este trabajo de investigación.

Al M. C. Fidel Maximiano Peña Ramos por su apoyo incondicional y colaboración en la realización de esta investigación y por los valiosos consejos que me ayudaron en mi formación profesional y como persona.

A la M.C. Sofía Comparán Sánchez por su apoyo, aportaciones y colaboración en la realización de esta investigación.

A la Dra. Silvia Judith Martínez Amador por su colaboración en la realización de este trabajo de investigación.

A todos los profesores de la carrera que de una u otra manera colaboraron en mi proceso de formación profesional y como persona.

A mi hermano Rudy Camposeco Montejo, mi tío Hugo Montejo Mejía, mi primo Jaime Adelin Figueroa Montejo, a mi amigo Miguel Ángel Morales Jiménez por haberme apoyado y estado siempre en los momentos difíciles y momentos de alegría.

A mis compañeros y amigos de la universidad que siempre me apoyaron durante todo este tiempo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Pag.

ÍNDICE DE FIGURAS.....	I
ÍNDICE DE CUADROS.....	II
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	III
RESUMEN.....	VII
I.- INTRODUCCIÓN.....	1
II.- OBJETIVOS.....	4
General.	4
Específico.....	4
III.- HIPÓTESIS.....	4
IV.- REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
4.1.- Conceptos básicos del enfoque sistémico.....	5
4.1.1.- Sistema.....	5
4.1.1.1.- Análisis de sistemas.....	5
4.1.1.2.- Categoría de los componentes del sistema.....	7
4.1.2.- Modelo.....	9
4.1.2.1.- Proceso de modelado.....	10
4.1.3.- Simulación.....	11
4.1.3.1.- Modelos de simulación.....	13
4.1.3.2.- Simulación de un modelo o de un sistema.....	14
4.1.3.3.- Aplicación de los modelos de simulación.....	15
4.2.- El maíz.....	17
4.2.1.- Aspectos generales del cultivo.....	17
4.2.2.- Fenología del cultivo.....	17
4.3.- Factores que intervienen en el crecimiento y desarrollo de del cultivo.....	19
4.3.1.- Factores ambientales y de manejo.....	19
4.3.1.1- Temperatura.....	19
4.3.1.2- Fotoperiodo y radiación.....	21
4.3.1.3.- Unidades térmicas.....	22
4.3.1.4.- Fechas de siembra.....	22
4.3.1.5.- Densidad de siembra.....	23
4.3.2.- Factores fisiológicos.....	24
4.3.2.1.- Ley de Beer- Lambert.....	24
4.3.2.2.- Coeficiente de extinción (K).....	25
4.3.2.3.- Radiación fotosintéticamente activa (RFA).....	26
4.3.2.4.- Eficiencia en el uso de la radiación (EUR).....	27
4.4.- Índice de área foliar (IAF).....	30
4.5.- Materia seca parcial aérea (MSPA).....	31
V.- MATERIALES Y MÉTODOS	32
5.1.- Descripción del sitio experimental.....	32
5.2.- Recopilación y manejo de datos.....	32
5.2.1.- Variables de respuesta.....	32
5.3.- Construcción del Modelo en Stella 9.0.2	35
5.4.- Descripción del modelo MAIZ-UAN.....	35

5.4.1.- Submodulo climático (SC).....	36
5.4.2.- Submodulo crecimiento y desarrollo (SCD).....	38
5.4.2.1.- Índice de área foliar (IAF).....	38
5.4.2.1.- Materia seca parcial aérea (MSPA).....	40
5.4.3.- Submodulo manejo.....	41
5.4.4.- Evaluación del modelo.....	41
VI.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
6.1.- Índice de Área foliar (IAF).....	43
6.1.- Materia Seca Parcial Aérea (MSPA).....	55
VII.- CONCLUSIONES.....	67
VIII.- LITERATURA CITADA	68

NDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cuatro fases del análisis de sistema (Grant *et al.*, 1997).....pag. 6

Figura 2. Símbolos utilizados en la construcción del modelo conceptual (High Performance Systems, Inc., 1994).....pag. 9

Figura 3. Fases en la construcción de un modelo (Aracil, 1995).....pag.11

Figura 4: aspectos descriptivos de la fenología del cultivo de maíz.....pag.18

Figura 5. Esquema del modelo maiz UAN, Submodulo clima (SC), Submodulo crecimiento y desarrollo (SCD) y Submodulo manejo (SM) del MAIZ-UAN variedad JAGUAN.....pag. 36

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Variables meteorológicas correspondientes (Radiación y Temperatura promedio mensual) a los años 2007-2009 registrada en los ejidos El Mezquite, y El Cuije, Galeana, Nuevo León, México.....pag. 37

Cuadro 2. Prueba de t para observados y simulados de índice de área foliar (IAF) con 30000 plantas/a y los tres niveles de fertilización 00, 60, y 120 unidades de nitrógeno/ha NS $p \leq 0.05$. D= densidad de población, NF= nivel de fertilización.....pag. 46

Cuadro 3. Prueba de t para observados y simulados de índice de área foliar (IAF) con 50000 plantas/ha y los tres niveles de fertilización 00, 60, y 120 unidades de nitrógeno/ha NS $p \leq 0.05$. D= densidad de población, NF= nivel de fertilización.....pag. 50

Cuadro 4. Prueba de t para observados y simulados de índice de área foliar (IAF) con 70000 plantas/ha y los tres niveles de fertilización 00, 60, y 120 unidades de nitrógeno/ha NS $p \leq 0.05$. D= densidad de población, NF= nivel de fertilización.....pag. 54

Cuadro 5. Prueba de t para observados y simulados de materia seca parcial aérea (MSPA) con 30000 plantas/ha. y los tres niveles de fertilización 00, 60, y 120 unidades de nitrógeno/ha con NS $p \leq 0.05$. D= densidad de población, NF= nivel de fertilización.....pag. 58

Cuadro 6. Prueba de t para observados y simulados de materia seca parcial aérea (MSPA) con 50000 plantas/a y los tres niveles de fertilización 00, 60, y 120 unidades de nitrógeno/ha NS $p \leq 0.05$. D= densidad de población, NF= nivel de fertilización.....pag. 62

Cuadro 7. Prueba de t para observados y simulados de materia seca parcial aérea (MSPA) con 70000 plantas/a y los tres niveles de fertilización 00, 60, y 120 unidades de nitrógeno/ha NS $p \leq 0.05$. D= densidad de población, NF= nivel de fertilización.....pag. 66

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados y observados en un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D1= densidad de población 30000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00 unidades de nitrógeno/ha.....pag. 43

Gráfico 2. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados y observados en un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D1= densidad de población 30000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 60 unidades de nitrógeno/ha.....pag. 44

Gráfico 3. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados y observados en un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D1= densidad de población 30000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 120 unidades de nitrógeno/ha.....pag. 45

Gráfico 4. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados en un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D1= densidad de población 30000 plantas/ha. y nivel de fertilización 00, 60, y 120 unidades de nitrógeno/ha respectivamente.....pag. 46

Gráfico 5. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados y observados en un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D2= densidad de población 50000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00 unidades de nitrógeno/ha.....pag. 47

Gráfico 6. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados y observados en un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D2= densidad de población 50000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 60 unidades de nitrógeno/ha.....pag. 48

Gráfico 7. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados y observados en un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D2= densidad de población 50000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 120 unidades de nitrógeno/ha.....pag. 49

Gráfico 8. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados en un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D2= densidad de población 50000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00, 60, y 120 unidades de nitrógeno/ha.....pag. 50

Gráfico 9. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados y observados en un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo o. D3= densidad de población 70000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00 unidades de nitrógeno/ha.....pag. 51

Gráfico 10. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados y observados en un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D3= densidad de población 70000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 60 unidades de nitrógeno/ha.....pag. 52

Gráfico 11. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados y observados en un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D3= densidad de población 70000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 120 unidades de nitrógeno/ha.....pag. 53

Gráfico 12. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados en un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D2= densidad de población 70000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00, 60, y 120 unidades de nitrógeno/ha.....pag. 54

Gráfico 13. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) bajo simulación y observación un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D1= densidad de población 30000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00 unidades de nitrógeno/ha.....pag. 55

Gráfico 14. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) bajo simulación y observación un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D1= densidad de población 30000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 60 unidades de nitrógeno/ha.....pag. 56

Gráfico 15. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) bajo simulación y observación un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D1= densidad de población 30000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 120 unidades de nitrógeno/ha.....pag. 57

Gráfico 16. Grafico 4. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) simulados en un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D1= densidad de población 30000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00, 60, y 120... ..pag. 58

Gráfico 17. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) bajo simulación y observación un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D2= densidad de población, 50000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00 unidades de nitrógeno/ha.....pag. 59

Gráfico 18. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) bajo simulación y observación un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D2= densidad de población, 50000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 60 unidades de nitrógeno/ha.....pag. 60

Gráfico 19. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) bajo simulación y observación un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D2= densidad de población, 50000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 120 unidades de nitrógeno/ha.....pag.61

Gráfico 20. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) simulados en un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D2= densidad de población 50000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00, 60, y 120pag. 62

Gráfico 21. Materia Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) bajo simulación y observación un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D3= densidad de población, 70000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00 unidades de nitrógeno/ha.....pag. 63

Gráfico 22. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) bajo simulación y observación un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D3= densidad de población, 70000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 60 unidades de nitrógeno/ha.....pag. 64

Gráfico 23. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) bajo simulación y observación un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D3= densidad de población, 70000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 120 unidades de nitrógeno/ha.....pag. 65

Gráfico 24. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) simulados en un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D3= densidad de población 70000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00, 60, y 120.....pag. 66

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue simular el índice de área foliar y materia seca parcial aérea de un cultivo de maíz (*Zea mays* L. Var. Jaguan) a tres densidades de siembra y tres niveles de fertilización, con un modelo dinámico de simulación en el software STELLA 9.0.2. La investigación se llevo a cabo en el campo agrícola de una unidad de producción en la comunidad el Prado municipio de Galeana, N.L. cuyas coordenadas son 25° 05' de latitud norte, 100° 42' longitud oeste, a una altitud de 1890 msnm. Se trabajo con la variedad JAGUAN en parcelas de 90 m² con 3 niveles de fertilización nitrogenada (0, 60 y 120 unidades de N/ha) y 3 densidades de población (DP), DP1=30,000, DP2=50,000 y DP3=70,000 plantas/ha, los niveles de fertilización y las densidades de población se utilizaron para desarrollar un modelo en STELLA 9.0.2. Los resultados obtenidos para índice de área foliar IAF demuestran que lo simulado por el modelo se ajustó satisfactoriamente a los observado en campo con densidades de 50,000 y 70,000 plantas/hectárea y los tres niveles de fertilización en tanto que con 30,000 el modelo sobreestimo IAF. Para materia seca parcial aérea MSPA lo simulado por el modelo se ajustó satisfactoriamente a lo observado en campo, con densidades de 50,000 y 70,000 plantas/hectárea y los tres niveles de fertilización en tanto que con 30,000 el modelo sobreestimo MSPA. El modelo de simulación proveen de una buena estimación y ajuste en el crecimiento, desarrollo, y rendimiento del maíz, para las densidades de población y los niveles de fertilización evaluados.

Palabras clave: modelo, simulación, *Zea mays*, índice de área foliar, materia seca parcial aérea, crecimiento, desarrollo.

I.- INTRODUCCIÓN

El cultivo del maíz (*Zea mays* L.) se desarrolla en una amplia diversidad de sistemas de producción que han sido determinados por la actividad del hombre en relación a su medio; en él intervienen una serie de variables de tipo físico-ambiental, social y económico que condicionan el rendimiento del cultivo, y que por su diversidad y magnitud han sido difíciles de abordar en forma conjunta.

El maíz es por mucho el cultivo agrícola más importante de México, tanto desde el punto de vista alimentario, industrial, político y social. El maíz en México se caracteriza por la producción de una amplia gama de variedades, por lo que es posible generar una gran cantidad de productos finales: actualmente más de 100 productos (por ejemplo; tortillas, forraje para animales, almidones, glucosa, fructosa, aceites, botanas, etanol para bebidas o como insumo en la producción de biocombustible). En nuestro país se hace mención principalmente de dos grupos de maíces: blanco y amarillo. El maíz blanco se produce exclusivamente para el consumo humano, en virtud de su alto contenido nutricional; en tanto que el maíz amarillo se destina al procesamiento industrial y a la alimentación animal (SAGARPA, 2009).

Actualmente el cambio climático a nivel global o regional se genera a muy diversas escalas de tiempo y sobre todos los parámetros climáticos: temperatura, precipitaciones, nubosidad, etc. En teoría los cambios climáticos son debidos tanto a causas naturales como antropogénicas e influyen directamente sobre las sociedades, el medio ambiente y sobre cada una de las especies que habita el planeta. Los efectos del cambio climático sobre los cultivos es evidente, provocando pérdidas millonarias cada año en todo el mundo; los cambios en la temperatura y precipitación a nivel global y regional ha provocado la modificación de los ciclos de desarrollo y las etapas fenológicas por lo que en muchos lugares las fechas de siembra han de atrasarse o adelantarse (Crowley y North, 1988; Oreskes, 2004).

Los modelos dinámicos de simulación son una simplificación de la realidad. Su objetivo es doble: por un lado, analizar las consecuencias de hacer ciertas

suposiciones sobre la naturaleza del mundo real; por otro, predecir cómo se comportará un sistema bajo una serie de circunstancias que ocurren naturalmente. Uno de los objetivos de los modelos dinámicos de simulación es realizar ensayos de cambios en el sistema probándolos en el modelo, con el fin de elegir la mejor alternativa y tomar las mejores decisiones sobre dicho sistema, y poder encontrar así una combinación de recursos y precios, y enfrentar mejor a una realidad que varía con el tiempo (Tarifa, 2001).

El software STELLA es un programa desarrollado por High Performance Systems, Inc. Es un programa que sirve como una herramienta para modelar sistemas dinámicos, con pocas matemáticas sofisticadas y poco conocimiento de programación. Para crear un modelo de simulación en STELLA se usan símbolos, los cuales representan almacenes, flujos y variables que influyen dentro de un sistema; los símbolos se conectan y se emplean ecuaciones matemáticas para relacionar los componentes del modelo (Martin y Tilley, 2000). Esto permite crear modelos versátiles en cuanto a su posible modificación y adaptación a sistemas y condiciones específicas.

El contar con predicciones acertadas del crecimiento, desarrollo y rendimiento de un cultivo, garantiza tomar mejores decisiones para la calendarización de actividades de producción, tales como adelantar o retrasar fechas de siembra, estimar anticipadamente la producción, así como predecir la rentabilidad del cultivo. Actualmente se han sugerido para este fin diversas herramientas y métodos tales como modelos de simulación biofísicos, dinámicos, entre otros, explicados desde el punto de vista de los mecanismos o procesos (Thornley, 1998), por ejemplo DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) sistema de apoyo para la toma de decisiones en la transferencia agrotecnológica. Este programa se utiliza actualmente en varios países de Europa, Asia, Norteamérica, Latinoamérica y África (ICASA, 2011). En los países altamente desarrollados la simulación es una herramienta principal, en los procesos de toma de decisiones, en el manejo de empresas y el planeación de la producción. Además, la simulación es cada vez más

amigable para el usuario, que no tiene que ser un especialista en computación. Sin embargo, en México aún es escaso el uso de estas herramientas (DSSAT y Modelos dinámicos, analógicos y biofísicos de simulación). De ahí, la importancia de crear y usar estas herramientas. Por otro lado, existen programas para construir modelos de simulación como Stella 9.2 que tienen la ventaja de ser más flexibles; considerando en estos sistemas de predicción aspectos no lineales entre variables tales como estados fenológicos, la evolución de la producción de materia seca por cada función de la planta y el rendimiento en función de la variable de manejo de la variedad empleada (Carrillo, 2000; Forjan, 2003).

En consecuencia se plantea como una necesidad la búsqueda de herramientas que permitan el estudio, la evaluación y el manejo del sistema de producción agrícola en forma integral. El desarrollo de la computación ha dado pauta a que se generen opciones como el uso de los modelos dinámicos de simulación, herramienta que hace posible relacionar gran número de variables a través del tiempo. Los modelos de simulación agropecuarios son una alternativa para minimizar los costos de investigación y para predecir el comportamiento de un determinado cultivo ante cambios de diversa índole (físico-ambientales, manejo etc.). Además son herramientas que ayudan en la toma de decisiones en sistemas complejos como los agropecuarios. Por lo anterior este trabajo tiene como objetivo desarrollar un modelo dinámico de simulación que permita simular el índice de área foliar y materia seca aérea de un cultivo de maíz (*Zea mays* L. Var Jaguan) bajo tres densidades de siembra y tres niveles de fertilización.

II.- OBJETIVOS

General.

- Simular el índice de área foliar y materia seca parcial aérea de un cultivo de maíz (Zea mays L. Var. Jaguan) a tres densidades de siembra y tres niveles de fertilización, con un modelo dinámico de simulación en el software STELLA 9.0.2.

Específico

- Comparar la dinámica de índice de área foliar y acumulación de materia seca parcial aérea simulados con los observados en campo, para evaluar la capacidad predictiva del modelo desarrollado en el software STELLA 9.0.2.

III.- HIPÓTESIS

- Los modelos dinámicos de simulación desarrollados en el software STELLA 9.0.2 proveen de una buena estimación del índice de área foliar y materia seca parcial aérea del cultivo de maíz (Zea mays L. Var. Jaguan).

IV.- REVISIÓN DE LITERATURA

4.1.- Conceptos básicos del enfoque sistémico

4.1.1.- Sistema

Se puede partir de la definición de sistema como un conjunto de cosas que ordenadamente y relacionadas entre sí contribuyen a un determinado objeto (RAE, 1994). Mientras que Shannon (1988) señaló que un sistema es un conjunto de componentes cuyos parámetros de comportamiento están interrelacionados entre sí como una unidad para la consecución de un fin.

Grant *et al.* (1997), mencionaron que existe cierta dificultad para precisar la definición de sistema, en relación con las ciencias físicas y biológicas, sin embargo describe que un sistema es una colección organizada de componentes físicos interrelacionados, caracterizada por límites y funcionan como una unidad. Eckert (1986) define que un sistema es un conjunto de procesos interconectados caracterizado por muchas vías recíprocas de causa y efecto. Por otra parte los sistemas tienen propiedades de importancia particular, los sistemas pueden estar unidos como por ejemplo ambiente-organismo; de esta manera, un individuo es un parte de una población, una población es parte de una comunidad y así sucesivamente (sistemas físicos, biológicos o biofísicos).

4.1.1.1.- Análisis de sistemas

Grant *et al.* (1997)., Thornley (1998) mencionaron que el origen del análisis de sistemas se remonta al periodo de la segunda guerra mundial y estuvo relacionado con la solución de problemas logísticos complejos. El análisis de sistemas se basa en un planteamiento holístico para la solución de problemas y usa los modelos matemáticos para identificar e imitar las características importantes del sistema. Por su parte Jeffers (1978), mencionó que el análisis de sistemas no es una técnica matemática ni un conjunto de ellas, es una amplia estrategia de investigación que ciertamente involucra el uso de técnicas y conceptos matemáticos en un contexto sistemático y científico dirigido a la solución de problemas sistémicos.

Grant *et al.* (1997). Mencionaron que el análisis de sistemas puede definirse más directamente como la aplicación del método de ciencias a problemas que involucran los sistemas complejos. Es un conjunto de teorías y técnicas de estudio, descripción, y elaboración de predicciones sobre los sistemas complejos que a menudo se caracterizan por el uso de matemática avanzada, procedimientos estadísticos y computadoras. Sin embargo la razón del análisis de sistemas no se encuentra en una colección de técnicas cuantitativas sino en una amplia estrategia problema-respuesta. Se consideran cuatro fases técnicas en el análisis de sistemas las cuales son: (1) modelo conceptual (2) modelo cuantitativo (3) evaluación del modelo (4) uso del modelo.

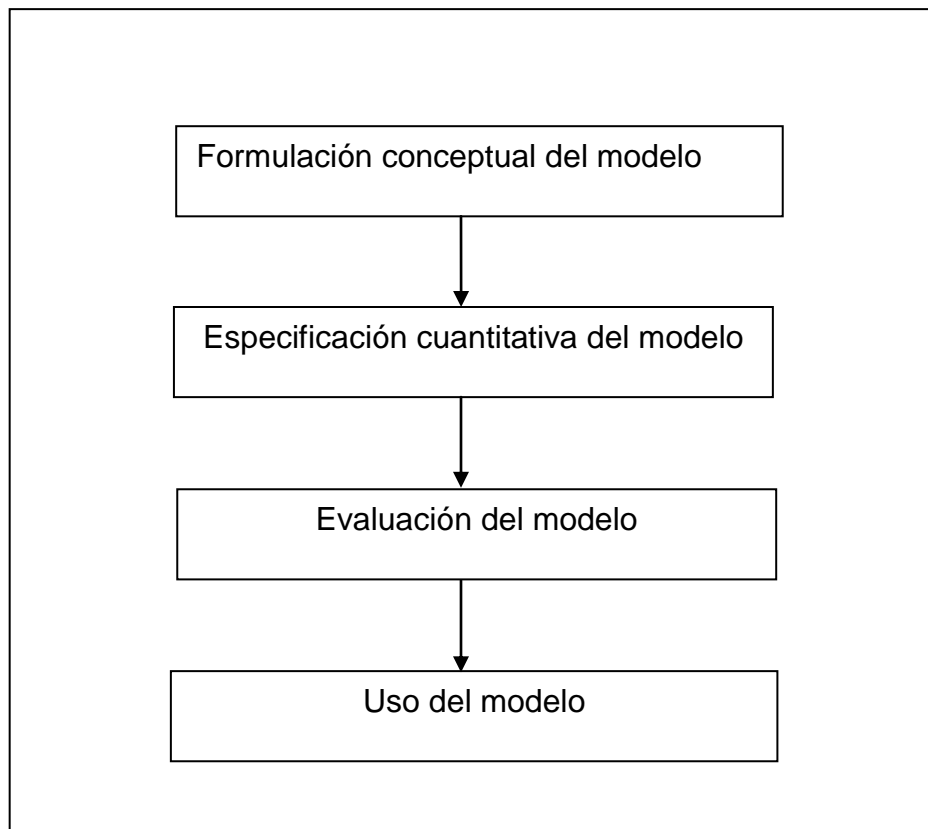


Figura 1. Cuatro fases del análisis de sistema (Grant *et al.*, 1997).

1.- Formulación conceptual del modelo: la meta de esta primera fase del análisis de sistemas es desarrollar un modelo conceptual o cualitativo, del sistema de interés.

2.- Especificación cuantitativa del modelo: la meta de esta segunda fase del análisis de sistemas es convertir a modelo cuantitativo el sistema de interés. Esto involucra la traducción del modelo conceptual, en una serie de ecuaciones matemáticas que colectivamente forman básicamente el modelo cuantitativo.

3.- Evaluación del modelo: la meta de esta tercera fase del análisis de sistemas es evaluar la utilidad del modelo. Este proceso que es el asunto de mucho debate normalmente se le llama “validación del modelo”.

4.- Uso del modelo: la meta de esta fase final del análisis de sistemas es contestar las preguntas que se plantearon al principio del proyecto modelado. Esto involucra el diseño y la simulación de los mismos experimentos con el modelo que pueden dirigirse en el sistema real, para contestar las preguntas. Las cuatro etapas del análisis de sistemas se encuentran íntimamente interconectadas.

4.1.1.2.- Categoría de los componentes del sistema

Grant *et al.* (1997), Mencionaron que una vez que el sistema de interés se ha limitado, separando cada uno de los componentes que deben ser incluidos dentro del sistema, de aquellos que deben excluirse e identificando atributos particulares de los componentes del sistema de interés, se procede a la formulación del modelo conceptual, mientras se categorizan los componentes dentro del sistema de interés; los componentes del sistema no pueden tener el mismo propósito en un modelo. Ciertamente, todos presentan los aspectos importantes del sistema de interés, en realidad puede haber muchos componentes dentro de un sistema por lo que se agrupan siete categorías fundamentalmente diferentes: (1) variables de estado, (2)

variables de tendencia, (3) constantes, (4) variables auxiliares, (5) transferencia de material, (6) transferencia de información, y (7) las fuentes y resumideros.

1.- Variables de estado: las variables de estado representan puntos de acumulación de material dentro del sistema.

2.- Variables de tendencia: las variables de tendencia tienen un efecto sobre el sistema pero estas no son afectadas por el resto del sistema.

3.- Constantes: las constantes son valores numéricos que describen un sistema que no cambia, o eso puede representarse como inmutable, bajo todas las condiciones de simulación del modelo.

4.- Variables auxiliares: las variables auxiliares aparecen como una parte del cálculo que determina una parte de la proporción de la transferencia de material o el valor de otra variable que no es constante, representan conceptos que se desean indicar explícitamente en el modelo. Las variables auxiliares también pueden representar un resultado al final de un cálculo que sea de interés particular.

5.- Transferencia de material y de información: una transferencia de material representa un traslado físico de material sobre un periodo específico de tiempo: (1) entre dos variables de estado, (2) entre una fuente y una variable de estado, o (3) entre una variable de estado y un resumidero. Las transferencias de información representan el uso de información sobre el estado del sistema para controlar el cambio de estado del sistema.

6.- Las fuentes y resumideros: las fuentes y resumideros representan el punto de origen y el punto final, respectivamente, de las transferencias de material dentro y fuera del sistema.

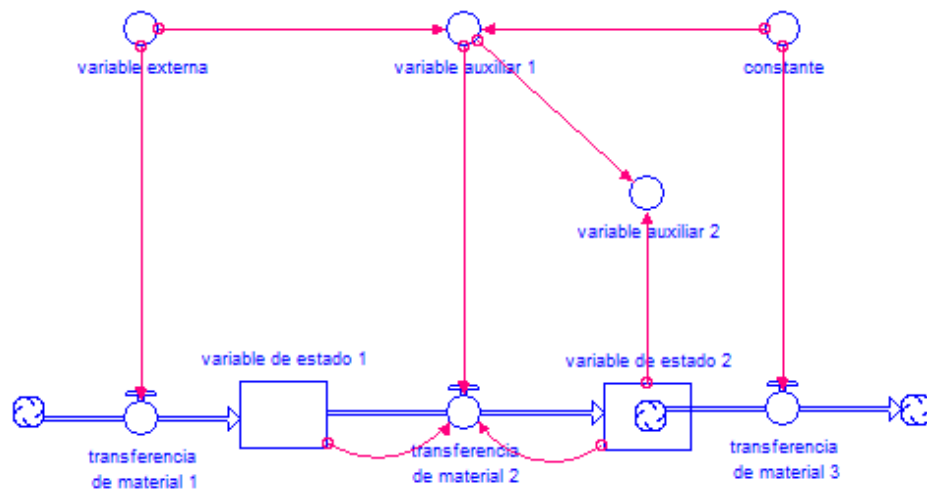


Figura 2. Símbolos utilizados en la construcción del modelo conceptual (High Performance Systems, Inc., 1994)

4.1.2.- Modelo

Esquema teórico, generalmente, en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento (RAE, 1984).

Harrel (2000), citó que un modelo es una representación gráfica o esquemática de la realidad que sirve para organizar y comunicar de forma clara los elementos que involucran un todo. Los modelos pueden ser utilizados como herramienta experimental. Es decir, nuestras hipótesis o teorías intentando explicar un proceso o fenómeno de la naturaleza pueden verse confirmadas o rechazadas según el comportamiento del modelo que hayamos desarrollado en base a las mismas se ajuste o no a lo observado experimentalmente.

Tapia (2001), mencionó que un modelo es la representación de un ente natural el cual surgen de un análisis de todas las variables intervinientes en el sistema y de las relaciones que se descubren existen entre ellas. Drew (1995) cita que un modelo matemático es la caracterización general de un proceso, objeto o concepto, por medio de los símbolos matemáticos, que permiten una manipulación relativamente sencilla de las variables, con el fin de determinar cómo el proceso, objeto o concepto se comporta bajo distintas situaciones.

4.1.2.1.- Proceso de modelado

El proceso de modelado consiste en el conjunto de operaciones mediante el cual, tras el oportuno estudio y análisis, se construye el modelo del aspecto de la realidad que nos resulta problemático. Este proceso consiste en analizar toda la información de la que se dispone con relación al proceso (Aracil, 1995).

En el proceso de modelado se puede distinguir seis fases: (1) definición del problema, (2) conceptualización del sistema, (3) formalización, (4) comportamiento del modelo, (5) evaluación del modelo; y (6) explotación del modelo.

1.- Definición del problema: en esta fase se trata de definir claramente el problema y de establecer si es adecuado para ser descrito.

2.- Conceptualización del sistema: en esta fase se trata de acometer dicho estudio, definiendo los distintos elementos que integran la descripción. El resultado es el establecimiento del diagrama de influencias del sistema.

3.- Formalización: en esta fase se pretende convertir el diagrama de influencias. A partir de aquí se pueden escribir las ecuaciones del modelo. Al final se dispone de un modelo del sistema programado en un computador.

4.- Comportamiento del modelo: esta fase consiste en la simulación informática del modelo para determinar las trayectorias que genera.

5.- Evaluación del modelo: en esta fase se somete al modelo a una serie de ensayos y análisis para evaluar su validez y calidad. Así mismo incluye un análisis de sensibilidad del modelado.

6.- Explotación del modelo: en esta última fase se emplea para analizar alternativas que pueden aplicarse al sistema que se está estudiando (Grant *et al.*, 1997). Incluye una última fase la experimentación con el uso del modelo.

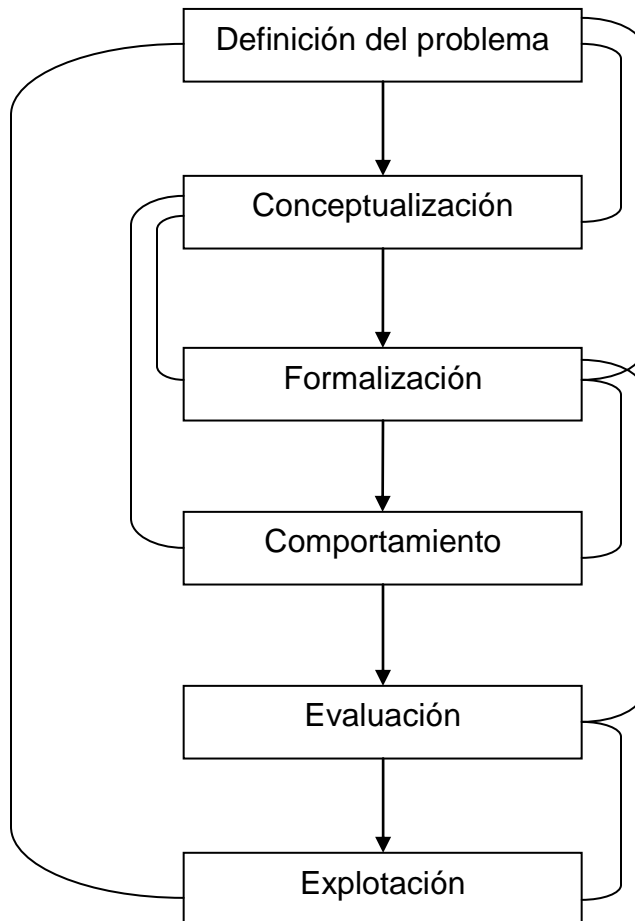


Figura 3. Fases en la construcción de un modelo (Aracil, 1995)

4.1.3.- Simulación

Aracil (1995) menciona que la simulación es el proceso mediante el cual se implementa en un computador un modelo matemático de cierto aspecto de la realidad. Drew (1995) afirmó que la simulación es la representación de sistemas y fenómenos físicos por medio de ordenadores, modelos u otros equipos. Grant *et al.*

(1997). Agregaron que simular es emplear un modelo para imitar, o describir paso a paso el comportamiento del sistema que se está estudiando.

Shannon, (1988) define la simulación como el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y realizar experimentos con él para entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias (dentro de los límites impuestos por un criterio o por un conjunto de criterios) para la operación del sistema. Por lo que se entiende que el proceso de simulación incluye tanto la construcción del modelo como su uso analítico para estudiar un problema. Un modelo de simulación comúnmente toma la forma de un conjunto de hipótesis acerca del funcionamiento del sistema, expresado con relaciones matemáticas o lógicas entre los objetos de interés del sistema. En contraste con las soluciones matemáticas exactas disponibles en la mayoría de los modelos analíticos, el proceso de simulación incluye la ejecución del modelo a través del tiempo; en general en una computadora, para generar muestras representativas de las mediciones del desempeño o funcionamiento. En este aspecto, se puede considerar a la simulación como un experimento de muestreo acerca del sistema real, cuyos resultados son puntos de muestra.

El modelo o la representación con el ordenador se manipulan para imitar aspectos significativos de una situación. Básicamente es un medio para resolver un modelo matemático, empleado generalmente cuando no puede obtenerse una solución analítica. Los modelos son abstracciones de la realidad por lo tanto los modelos de simulación están compuestos por una serie de operaciones aritméticas y lógicas que en su conjunto representan la estructura (estado) y el comportamiento (cambio de estado) del sistema de interés (Thornley 1998., Grant *et al.* 1997., Harrell 2000). Los modelos dinámicos de simulación son capaces de relacionar variables complejas como las ambientales, poblacionales y de manejo, siempre y cuando se cuente con un antecedente de estos factores (Grant *et al.* 1997)

4.1.3.1.- Modelos de simulación.

Odum y Odum (2000) mencionaron que los modelos de simulación son una herramienta de la actualidad que permite hacer la representación de un sistema real en base a variables que interaccionan en este. Los modelos tienen una conexión de las ideas con la realidad, ayudan a entender cómo están organizadas las cosas y cómo funcionan dentro de un sistema. Grant *et al.* (1997) citan que estos modelos son compuestos de una serie de operaciones lógicas y aritméticas que representan la estructura (estado) y comportamiento (cambio de estado) del sistema de interés, Por su parte Jones *et al.* (2001) mencionan que los modelos de simulación integran el conocimiento de diferentes disciplinas y dan a los investigadores la capacidad de dirigir experimentos por computadora y reducir el número de experimentos tradicionales

Mientras que Yuren, (1986) cita que la función básica del modelo es la de ayudar a comprender las teorías y leyes, y proporcionar una interpretación de las mismas, de manera que si el modelo ayuda a comprender es porque además de dar una explicación, nos permite predecir. Por su parte Keulen, (1986) cita que el modelaje de los cultivos adquirió una gran importancia a partir de que las computadoras se utilizaron en las investigaciones agrícolas, ya que se observó la posibilidad de integrar los conocimientos de los procesos fisiológicos que gobiernan el crecimiento y desarrollo de las plantas para tratar de explicar su comportamiento bajo condiciones de campo, de tal manera que han sido desarrollados diferentes tipos de modelos para cada cultivo.

Waggoner (1984) agregó que la información necesaria para formar un modelo depende de la especie a considerar y tipo de modelo a considerar. Los modelos que simulan el desarrollo de las plantas, requieren información sobre emergencia, crecimiento, desarrollo y aparición de órganos reproductores que son afectadas por las variables relevantes del ambiente fisiológico y ambiental. Por otra parte Whisler *et. al* (1986), establecieron que mediante el uso de modelos es posible predecir el

comportamiento de un cultivo, es una herramienta importante en la investigación, es decir, mediante la simulación es posible conocer en forma aproximada que puede esperarse que ocurra en el sistema cuando se efectúa un cambio en alguno de sus componentes, de tal manera que es factible hacer más corto el proceso de investigación. Esto lógicamente no quiere decir que los modelos de simulación sustituyan a los experimentos de campo. De ahí que los modelos de simulación hayan sido desarrollados básicamente para cubrir tres aspectos importantes: primero, para ayudar a entender los fenómenos de un sistema agrícola; segundo como herramienta de investigación, y tercero aquellos modelos desarrollados para monitorear el crecimiento y desarrollo de los cultivos a nivel comercial. Por su parte Cazanga (1991), citó que la simulación tiene las siguientes ventajas: permite estudiar los efectos de determinados cambios ambientales, de información y organización en la operación del sistema; puede orientar a los investigadores en relación a las variables que son más relevantes y la forma como se relacionan; puede servir para experimentar con nuevas situaciones acerca de las cuales hay poca información o no existe.

Thornley (1998), afirma que los modelos de simulación se han usado para integrar los múltiples factores que afectan la producción del cultivo y para predecir el efecto del cambio climático sobre estos. Se han usado varios modelos para examinar los posibles efectos del clima en las praderas, sin embargo, las predicciones hechas por los modelos depende de las variantes hechas sobre las relaciones clima-cultivo-suelo, al momento de crear el modelo. El análisis de sensibilidad de los modelos de cultivo en serie de datos climáticos comunes, puede ayudar al conocimiento del funcionamiento de los modelos bajo condiciones de cambio global, lo que a su vez permitiría seleccionar el modelo para los estudios de cambio climático.

4.1.3.2.- Simulación de un modelo o de un sistema

Odum (1994), menciona que la simulación es el proceso de generar modelos con el tiempo que resulta de una operación de sistemas, con ayuda de

computadoras, la simulación presenta lo que un sistema hace con el tiempo. En el principio de la repetición digital, la simulación es acompañada por cálculos sucesivos de cantidades en almacenes conforme cambian con entradas y salidas. En la simulación manual los cálculos pueden ser realizados sin computadoras, mediante arreglos de ecuaciones en tablas. Simulando sistemas complejos (sistemas con más de un almacén o variable de estado) existe una ecuación diferencial y una línea programada para cada uno, en este proceso los cálculos basados sobre estados al mismo tiempo. En cuanto a precisión, existe un pequeño error en los cálculos realizados por este medio, pero existen procedimientos para hacer correcciones y ajustar las ecuaciones lo mejor posible.

Grant *et al.*, (1997), describieron que el sistema de interés existe en diferentes estados y momentos en el tiempo y existen reglas que rigen la forma en la cual el estado del sistema cambia a medida que transcurre el tiempo, ya que cada uno por sí misma es una función del mismo. Si se escogen las variables apropiadas para describir el sistema y se representan adecuadamente las reglas que gobierna el cambio, se deberían poder determinar los cambios en el estado del sistema a través del tiempo, es decir, se podría simular el comportamiento del sistema.

Drew (1985), citó que un modelo matemático consiste esencialmente en un conjunto de ecuaciones. Para procesarlas se necesita de la ayuda de la informática. Una vez programada en un computador podemos experimentar con el modelo. Este proceso requiere la denominación de simulación informática del sistema y requiere de herramientas informáticas adecuadas como lo es STELLA y otros más que se han desarrollado.

4.1.3.3.- Aplicación de los modelos de simulación.

Forján (2002), citó que los modelos de simulación son una herramienta que utiliza información obtenida a través de experiencias anteriores y permite proyectar los resultados físicos y económicos teniendo en cuenta todos los factores que interactúan en un determinado ambiente.

Drew (1985), menciona que originalmente los modelos de crecimiento de cultivos, fueron usados como herramienta en las investigaciones científicas, resumiendo la compleja interacción de los diferentes procesos fisiológicos con las condiciones ambientales. Posteriormente, también se convirtieron en una herramienta para el monitoreo sustentable de sistemas agrícolas y para crear un uso racional de la tierra.

Holman (2000) Tapia y Tarifa (2001) afirmaron que el uso de modelos de simulación permite en forma práctica y flexible analizar las actividades agropecuarias encontradas en una cuenca o región. De la misma manera, facilita el análisis del antes y después de nuevas estrategias tecnológicas para determinar su viabilidad tanto biológica como económica y permitir determinar las condiciones necesarias para promover su difusión y fomento en determinada región.

Téllez (1999), citó que los modelos de simulación de crecimiento, desarrollo y rendimiento de las plantas, han cobrado importancia a partir del momento en que surgió la computadora como un instrumento, con el que se logra realizar y controlar a gran velocidad cálculos y procesos complicados que requieren una toma de decisión puntual. Con estos modelos de simulación se ha simplificado la tarea de los investigadores agrícolas, ya que con un grupo de variables se pueden hacer predicciones para diferentes cultivos y tiempos, y con una serie de combinaciones de las mismas se pueden llegar a establecer las condiciones necesarias para que cada cultivo se desarrolle con todo su potencial en una región determinada.

Ping *et al.* (2004), desarrollaron un modelo llamado GEENLAB el cual fue diseñado para hacer representaciones dinámicas de la morfogénesis y arquitectura de las plantas, utilizando ecuaciones matemáticas y reglas de decisión, de parámetros por descriptores botánicos y morfológicos tomados de plantas muestra durante el curso de su desarrollo. El modelo pudo simular el crecimiento de un árbol integrando características arquitectónicas y morfológicas de la planta.

4.2.- El maíz

4.2.1.- Aspectos generales del cultivo

Botánicamente, el maíz (*Zea mays*) pertenece a la familia de las gramíneas y es una planta anual alta dotada de un amplio sistema radical fibroso. Se trata de una especie que se reproduce por polinización cruzada y la flor femenina (elote, mazorca, choclo o espiga) y la masculina (espiguilla) se hallan en distintos lugares de la planta. Las panojas a menudo, una por tallo son las estructuras donde se desarrolla el grano, en un número variable de hileras (12 a 16), produciendo de 300 a 1000 granos, que pesan entre 190 y 300 g por cada 1 000 granos. El peso depende de las distintas prácticas genéticas, ambientales y de cultivo. El grano constituye aproximadamente el 42 por ciento del peso en seco de la planta. El maíz es a menudo de color blanco o amarillo, aunque también hay variedades de color negro, rojo y jaspeado. Hay varios tipos de grano, que se distinguen por las diferencias de los compuestos químicos depositados o almacenados en él. (FAO, 1990).

4.2.2.- Fenología del cultivo

La fenología de un cultivo está definida como los cambios periódicos que este experimenta durante su desarrollo por efecto del medio ambiente. La fenología son los cambios externos visibles del proceso de desarrollo de la planta, los cuales son el resultado de las condiciones ambientales, cuyo seguimiento es una tarea muy importante para agrónomos y agricultores, puesto que ello servirá para efectuar futuras programaciones de las labores culturales, riegos, control de plagas y enfermedades, aporques, identificación de épocas críticas; asimismo le permite evaluar la marcha de la campaña agrícola y tener una idea concreta sobre los posibles rendimientos de sus cultivos, mediante pronósticos de cosecha, puesto que el estado del cultivo es el mejor indicador del rendimiento. (Akira y Yamaguchi, 1984).

La escala más utilizada para describir el desarrollo del cultivo de maíz es la de Ritchie y Hanway publicada en 1982 ver figura 4, que utiliza caracteres morfológicos

externos (macroscópicos). En ellas se pueden distinguir dos grandes períodos: el vegetativo y el reproductivo. El período vegetativo se subdivide en estadios identificados con la letra V y un subíndice (por ejemplo V₁), que señala el número de orden de la última hoja completamente expandida (lígula visible), al momento de la observación. El número total de estas subdivisiones varía con el genotipo y el ambiente considerado por modificar ambos el número final de hojas. Una vez producida la aparición de todas las hojas, el estado es definido por la aparición de la panoja (VT). El período reproductivo, subdividido en estadios identificados con la letra R y un subíndice, comienza con la emergencia de los estigmas (R1) y finaliza con la madurez fisiológica (R6).

V	ESTADOS VEGETATIVOS
Ve	Emergencia
V1	Primera hoja desarrollada
V2	Segunda hoja desarrollada
V...n	Enésima hoja desarrollada
V t	Panojamiento
R	Estados reproductivos
R1	Emergencia del estigma
R2	Cuaje (ampolla)
R3	Grano lechoso
R4	Grano pastoso
R5	Grano dentado
R6	Madurez fisiológica
Nota:	<i>Se considera una hoja completamente desarrollada cuando se observa la lígula o el collar completamente desarrollado. Ritchie y Hanway (1982).</i>

Figura 4: aspectos descriptivos de la fenología del cultivo de maíz.

4.3.- Factores que intervienen en el crecimiento y desarrollo del cultivo

4.3.1.- Factores ambientales y de manejo

Se puede pensar que la importancia de un factor del ambiente puede ser mayor en el cultivo. Sin embargo, el rendimiento final en grano es el producto final de un genotipo dado y su interacción con los factores ambientales bajo el cual se desarrolla. Así mismo se señala que el efecto de estos factores es muy importante para poder aprovechar los recursos del medio y así apropiarse un genotipo más eficiente en la conversión de energía solar a grano, ya que la fotosíntesis alcanza una conversión de 2-4 % de la energía solar a grano. Por lo tanto en la medida que podemos alcanzar este porcentaje podemos incrementar significativamente la producción (Francis, 1971).

4.3.1.1- Temperatura

Warrington *et. al* (1975) mencionaron que la temperatura es el factor más importante en el crecimiento y desarrollo de los cultivos y que en cierta medida condiciona la adaptabilidad de una especie o variedad, de tal forma que es imprescindible reconocer un umbral mínimo (temperatura base) y un umbral máximo (temperatura umbral) fuera de los cuales su tasa de desarrollo es igual a cero y una temperatura óptima donde su tasa de desarrollo es máxima, dichas temperaturas se denominan cardinales. Por su parte Aldrich y Leng (1974) mencionan que el maíz requiere de un ambiente moderado a caliente. Señalando que su límite inferior oscila entre 8-12 °C y su nivel máximo es alterado por la humedad del suelo de tal forma que cuando esta es alta la planta de maíz se desarrolla bien por arriba de los 35 °C, pero en condiciones normales de campo su temperatura máxima se encuentra entre 30 y 32 °C la cual se acerca al óptimo.

Warrington y Kanemasu (1983), evaluaron el efecto de la temperatura y el fotoperiodo en condiciones de invernadero en dos híbridos de maíz y encontraron que los índices de iniciación foliar y el índice de las primeras hojas fue constante

desde la emergencia hasta el inicio de la espigación. Sin embargo después de las 12 hojas este índice de crecimiento es debido a la elongación del tallo y a que las hojas superiores requieran menos tiempo para extenderse. Mientras que Duncan *et. al* (1993) señalaron que el principal efecto de la temperatura es modificar la duración de las distintas etapas fenológicas. Temperaturas frescas retrasan el desarrollo del maíz y alargan su estación de crecimiento, lo que resulta en una mayor disponibilidad de radiación solar disponible para la fotosíntesis.

Thompson (1979) citó que la temperatura y humedad son los principales factores climáticos que afectan el desarrollo del cultivo, así un factor se convierte en limitante cuando este es desfavorable para un buen desarrollo del cultivo. Por ejemplo en zonas templadas y frías donde la humedad suele ser favorable. La temperatura se convierte en factor limitante por lo cual la fecha de siembra se ve modificada hasta que las condiciones sean adecuadas.

Según Villalpando (1990), en ausencia de sensibilidad al fotoperiodo y vernalización, la tasa de desarrollo de un cultivo es una función lineal de la temperatura, también señala que además del desarrollo, la temperatura condiciona el crecimiento. Los cereales menores de zonas templadas se ven afectados por altas temperaturas acelerando su desarrollo dando como resultado plantas de porte bajo y escaso rendimiento. Sin embargo en climas tropicales las temperaturas elevadas aceleran su crecimiento incrementando su volumen de materia seca dando así plantas más altas, de madurez temprana y buen rendimiento. Es evidente también que la temperatura óptima para el crecimiento y desarrollo de un cultivo no necesariamente es igual a la temperatura óptima para obtener un máximo nivel de rendimiento. Por otra parte Francis (1971), mencionó que el efecto de la temperatura en el crecimiento puede ser más importante que el mismo efecto de la fotosíntesis, respiración o translocación. Agregando que en las zonas tropicales son de menor potencial que las zonas templadas debido a que altas temperaturas aceleran mucho el desarrollo de la raíz y el cultivo no tiene tiempo de producir su rendimiento potencial de grano. En cambio en zonas templadas el desarrollo se alarga hasta un

mes o más para floración y casi el doble para madurez fisiológica. Esta diferencia entre las dos zonas se debe a que la planta en zonas tropicales recibe la energía en forma concentrada, mientras que en zonas templadas esta energía se recibe en forma más prologada.

4.3.1.2- Fotoperiodo y radiación

De acuerdo con Villalpando (1990), la floración es la etapa de mayor sensibilidad al fotoperiodo. Sin embargo también se ha demostrado que además de la floración, frutos y semillas, la duración del día también afecta algunas características como: extensión, ramificación, abscisión, pubescencia, desarrollo de raíces, dormancia y otros fenómenos morfológicos. Las necesidades del fotoperiodo varían entre cultivos y entre etapas fenológicas de ahí que puede decirse que existen plantas de fotoperiodo largo y corto. Si el fotoperiodo esta entre el crítico y el óptimo la floración se ve acelerada conforme esta avanza hacia el óptimo.

Coligado y Brown (1975), observaron el efecto del fotoperiodo en híbridos de maíz señalando que cuando el fotoperiodo se incrementa de 10 a 20 horas el periodo de inicio del panojamiento se incrementa en todas las temperaturas, concordando con Francis (1971) al mencionar que la planta de maíz es una planta de día corto y que el efecto del fotoperiodo no es en la velocidad de crecimiento ni en la fotosíntesis, sino en la diferenciación del ciclo y duración, es decir; el maíz prolonga su ciclo vegetativo por los días largos.

Fisher y Palmer (1984), señalaron que el maíz es una planta de día corto, lo que significa que la floración se retrasa en forma progresiva a medida que el fotoperiodo excede a un valor crítico mínimo, además indican que para la mayoría de los materiales de maíz el fotoperiodo crítico está entre 11 y 14 horas. Por su parte Francis (1971), señaló que existen materiales que tienen muy poca sensibilidad hasta muy sensitivos al fotoperiodo, señalan además que existe un retraso de 2 o 3 días al inicio de la espiga por cada hora extra del fotoperiodo en exceso del valor crítico.

Andrade (1992), mencionó que la radiación directa interceptada determina la tasa de crecimiento mientras que la temperatura define la duración del crecimiento. Russell *et. al* (1984), citan que además de la temperatura el crecimiento es afectado por la radiación solar, disponibilidad de nutrientes para la planta y tejido fotosintético.

4.3.1.3.- Unidades térmicas

Unidades térmicas, grados días o unidades térmicas de desarrollo, es un concepto utilizado desde el siglo XVIII para describir la influencia de la temperatura sobre la fenología de las plantas. Este concepto postula que el crecimiento y desarrollo van a depender de la acumulación de calor que recibe la planta. Definida también como la diferencia entre la temperatura media diaria y una temperatura base predeterminada con ciertas limitaciones (Eckret y Hicks, 1986).

Villalpando (1990), indicó que la gran utilidad práctica que ha alcanzado el uso de unidades térmicas en la planeación de actividades agrícolas ha dirigido la búsqueda de varias metodologías que lleven a un entendimiento más profundo y que expliquen la relación que existe entre el crecimiento y desarrollo de la plantas y la temperatura. Newman *et. al* (1969), indicaron que el avance de un evento fenológico de un cultivo es una función lineal de la acumulación de unidades calor además agregan que es un sistema que admite que existe una relación lineal entre el desarrollo del cultivo y la acumulación de calor diario durante su ciclo vegetativo.

En estudios experimentales de maíz se reportan que de 8 a 10 °C se utilizan como temperatura base, de 30 a 34 °C como optima y de 40 a 44 °C como temperatura crítica (Kiniry y Jones, 1986), por otra parte se dice que maíces de altura parecen responder a temperaturas base de 7°C, 21 a 25 de temperatura optima y 35 °C de temperatura crítica.

4.3.1.4.- Fechas de siembra

Villalpando *et. al* (1991), mencionaron que la fecha de siembra es un factor modificable de la producción de los cultivos, sin embargo esta deberá ser cuando las

condiciones sean lo más favorables para el desarrollo del cultivo. La fecha de siembra es el reloj biológico de la planta que pone a funcionar sus mecanismos los cuales están influenciados por las condiciones agroclimáticas bajo las cuales estará sujeta el cultivo.

Benoit *et. al* (1965), mencionaron que fechas de siembra tardías los rendimientos de maíz se reducen, independientemente de la humedad del suelo, agregando que este efecto está asociado al decremento de la temperatura en la etapa de formación de la mazorca, concordando con Andrade (1993) quien reporta que el atraso en la fecha de siembra produjo disminución del rendimiento del maíz, aun cuando fueron condiciones bajo riego y fertilización y que aceleró el desarrollo del cultivo debido al incremento de la temperatura.

4.3.1.5.- Densidad de siembra

El maíz es un cultivo de poca plasticidad en área foliar y en rendimiento, además es altamente sensible a variaciones en la densidad de población, Andrade *et. al* (1992), señalaron además que cuando los recursos por planta son bajos en densidades supra óptimas presentan una producción considerable en el número de granos por metro cuadrado; de igual manera indicaron que la poca capacidad de compensar en bajas densidades se debe a la poca plasticidad del área foliar; lo que determina menor cobertura en menores densidades y a la ineficiencia de conversión de la energía solar en número de granos por unidad de área. Gardner *et. al* (1985), señalan que el maíz no posee gran capacidad de compensación debido a la poca plasticidad foliar y reproductiva. Por su parte Tollenaar (1977), indicó que cuando se disminuye a muy bajas densidades de población presenta una fuerte disminución de grano por metro cuadrado.

4.3.2.- Factores fisiológicos

4.3.2.1.- Ley de Beer- Lambert

En óptica, la ley de Beer-Lambert, también conocida como ley de Beer o ley de Beer-Lambert-Bouguer es una relación empírica que relaciona la absorción de luz con las propiedades del material atravesado.

La ley de Beer-Lambert relaciona la intensidad de luz entrante en un medio con la intensidad saliente después de que en dicho medio se produzca absorción. La relación entre ambas intensidades puede expresarse a través la siguiente relación:

$$\frac{I_1}{I_0} = e^{-\alpha lc} = e^{-A}$$

Dónde:

I_1, I_0 , son respectivamente las intensidades saliente y entrante respectivamente.

$A = \alpha lc$, es la absorbancia, que puede calcularse también como: $A = -\log \frac{I_1}{I_0}$

l es la longitud atravesada por la luz en el medio,

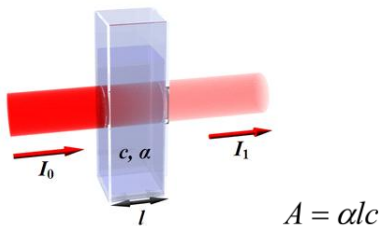
c es la concentración del absorbente en el medio.

$\alpha = \frac{4\pi k_\lambda}{\lambda}$ es el coeficiente de absorción:

λ es la longitud de onda de la luz absorbida.

K es el coeficiente de extinción.

Resumiendo



$$A = \frac{I_1}{I_0} = 10^{-\alpha lc}$$

$$A = -\log \frac{I_1}{I_0}$$

$$\alpha = \frac{4\pi K}{\lambda}$$

La ley explica que hay una relación exponencial entre la transmisión de luz a través de una sustancia y la concentración de la sustancia, así como también entre la transmisión y la longitud del cuerpo que la luz atraviesa. Si conocemos I y α , la concentración de la sustancia puede ser deducida a partir de la cantidad de luz transmitida.

4.3.2.2.- Coeficiente de extinción (K)

Puede referirse a distintas magnitudes relacionadas con la absorción de luz en un medio material: En química, el coeficiente másico de extinción son parámetros que definen cuan fuertemente una sustancia absorbe la luz a una dada longitud de onda, por unidad de masa o por concentración molar, respectivamente. En física, el "coeficiente de extinción" es la parte imaginaria del Índice de refracción, que también está relacionado con la absorción de luz.

El coeficiente de extinción o de absortividad, es la cantidad de luz que absorbe un mol de sustancia a una longitud dada y en un disolvente determinado. Sirve para calcular absorbancia o concentración de una muestra *dependiendo de "como se despeje la ley de Beer"*. También se utiliza para hacer cálculos teóricos predictivos al hacer una determinación espectrofotométrica. Los factores que lo afectan son la longitud de onda y el disolvente. Dice cuanta cantidad de la sustancia que nos interesa está presente en la muestra. La concentración es proporcional a la absorbancia, según la Ley Beer-Lambert:

Abs = K C L Abs: absorbancia

K: coeficiente de extinción molar

C: concentración

L: distancia que viaja la luz a través de la muestra. (Normalmente es de 1 cm)

El coeficiente de extinción se determina realizando una serie de diluciones de la sustancia de interés. Luego se mide la absorbancia de cada muestra de dilución a un largo de onda determinado. Los valores de absorbancia son graficados en función de la concentración. El resultado debe ser una línea recta. La pendiente de la línea ($\Delta y/\Delta x$) es el coeficiente de extinción (K). Si las unidades de concentración son en moles, entonces la constante es llamada coeficiente de extinción molar y se mide en unidades de M/cm.

4.3.2.3.- radiación fotosintéticamente activa (RFA)

Wunsche *et al.* (1996) definen como radiación fotosintéticamente activa a la cantidad de radiación integrada del rango de longitudes de onda que son capaces de producir actividad fotosintética en las plantas y otros organismos fotosintéticos como microalgas y bacterias. Este rango es el comprendido aproximadamente entre los 400 y los 700 nanómetros y que corresponde, también aproximadamente, con el espectro visible. La intensidad de la radiación varía en función de la hora del día y la época del año, ya que depende del ángulo de incidencia de los rayos, que a su vez depende de la altitud solar (altura del sol sobre el horizonte). También la intensidad de la radiación del sol depende de la latitud del lugar y de la nubosidad presente. Las unidades de medida de la radiación fotosintéticamente activa suelen ser las habituales para cualquier radiación: los microEinsteins/m²/s o micromoles de fotones/m²/s. La radiación fotosintéticamente activa (RFA) captada por un vegetal determina la cantidad de materia seca producida y la calidad de la producción. La clave del proceso de crecimiento de las plantas es la fotosíntesis, la cual está estrictamente determinada por la disponibilidad de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) que llega a las plantas.

Ferree (1980), citó que la radiación fotosintéticamente activa (RFA) captada por un vegetal determina directamente la producción de fotosintatos, influyendo sobre el crecimiento, la productividad y calidad de fruta de las plantas. La misma está comprendida en el rango 400-700 nm de longitud de onda. Wunsche *et al.* (1996),

mencionaron que los diferentes cultivos según sus sistemas de manejo (densidad de plantación, sistemas de conducción, combinación portainjerto/variedad, poda) son más o menos eficientes de acuerdo con la energía lumínica interceptada. Sceicz (1974), agregó que los cultivos anuales generalmente logran captar casi la totalidad de la radiación disponible, cuando el desarrollo del área foliar está completo. Por su parte Jackson (1980), mencionó que de todas maneras, en los cultivos frutícolas, la totalidad del área foliar no intercepta más del 65 al 70% de la radiación disponible, hecho que limita el potencial de producción

Domenech (2004) citó que la radiación, temperatura, humedad y viento son el complejo de variables ambientales al que está expuesta la planta y la interacción de estos componentes influirá en su productividad. La modificación en la intensidad lumínica tiene repercusiones importantes sobre el funcionamiento de la comunidad, debido a que provoca cambios drásticos en la tasa de fotosíntesis, productividad primaria neta, temperatura del suelo y del aire, disponibilidad de agua y actividad de los microorganismos del suelo.

4.3.2.4.- eficiencia en el uso de la radiación (EUR)

Bondeau *et al.* (1999). Definieron que la eficiencia en el uso de la radiación es la radiación efectiva que puede aprovechar la planta en las distintas épocas del año. El comportamiento estacional de la absorción de carbono, de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (FPAR) y de la eficiencia en el uso de la radiación (EUR), dependen de las limitaciones estructurales y fisiológicas del funcionamiento del ecosistema. La capacidad de estimar la estacionalidad de la absorción de carbono por la vegetación a partir de datos de área foliar o de otros estimadores como el FPAR, depende del acople o desacople entre la estacionalidad de la radiación absorbida y las limitaciones ambientales al crecimiento de la vegetación. Vourlitis *et al.* (2000), Boelman *et al.* (2005), citan que acoples estacionales fuertes y positivos entre el área foliar y la tasa fotosintética ocurren principalmente en bosques boreales. En bosques templados deciduos (Waring *et al.*

1995) o en cultivos anuales en los que el área foliar, la radiación fotosintéticamente activa es incidente y las restricciones climáticas también cambiarían. Por el contrario, una baja estacionalidad del FPAR y una baja correlación con la absorción de carbono ocurren por ejemplo en tipos de vegetación perenne en áreas templadas o de clima mediterráneo (Garbulsky *et al.* 2008). En estos casos, la absorción de carbono estaría principalmente controlada por cambios en la EUR.

Heichel y Col (1988) citaron que la producción de biomasa total está en función de la radiación solar fotosintéticamente activa incidente (RFAinc), de la eficiencia con la que el cultivo la intercepta y la eficiencia con que la planta utiliza la energía interceptada (EUR) para convertirla en materia seca. Tanto la eficiencia de intercepción como la RFA interceptada (RFAint) tienen una relación directa con el índice de área foliar, sin embargo no toda la radiación incidente durante los sucesivos rebrotes es utilizada por el cultivo, debido a que en los primeros periodos de crecimiento las plantas carecen del área foliar suficiente como para interceptarla. Es por ello que para lograr las mayores tasas de crecimiento se debería alcanzar valores próximos al índice de área foliar (IAF) crítico que se define como el IAF cuando se intercepta el 95 % de la RFAinc.

Autores como (Enrico y Col., 2005, Brown y Col., 2006, Collino y Col., 2005) coinciden en que el crecimiento de cultivos perennes, como la alfalfa, es mucho más complejo que el de cultivos anuales debido a que la biomasa producida no solo depende de la radiación solar interceptada por el follaje, sino también de la removilización de las reservas acumuladas en rebrotes previos. Por tal motivo se encuentra un amplio rango de valores de EUR, que oscilan de 0.3 a 1.9 gMJ⁻¹. De acuerdo a Colino y Col. (2005), la variación en la EUR a lo largo del ciclo de crecimiento está altamente influenciada por la temperatura, quienes obtuvieron mayores EUR en primavera que en verano y menores en otoño e invierno. Del mismo modo, Brown y Col. (2006) observaron una disminución de 0,9 gMJ⁻¹ en verano a 0.55 gMJ⁻¹ en otoño, estimando que la relación entre EUR y temperatura es lineal, detectándose un incremento de 0.091 gMJ⁻¹ por cada aumento unitario de la temperatura. Ambos autores afirman que las menores eficiencias estarían afectadas

por las bajas temperatura y por la movilización de fotoasimilados desde las hojas hacia los órganos de reservas. En este sentido Colino y Col (2005) midieron una mejora de la EUR de 0.37 a 1.02 gMJ⁻¹ con un incremento de 5°C en la temperatura de primavera.

El efecto de la fertilización nitrogenada en los cultivos agrícolas sobre la eficiencia en el uso del agua (EUA), la radiación (EUR) y el nitrógeno (EUN) ha sido documentada documentada en varios trabajos de investigación (Cooper et al., 1987; Sinclair y Horie, 1989; Huggins y Pan, 1993; Paponov et al., 1996). En general, se ha encontrado que con el incremento de la disponibilidad de nitrógeno para los cultivos la EUA y la EUR aumentan, mientras que la EUN tiende a decrecer. En efecto, experiencias previas demostraron que la EUA estuvo explicada por las variaciones que se produjeron en la EUR por efecto de la nutrición nitrogenada (Caviglia y Sadras 2004), mientras que la EUR y la EUN estuvieron negativamente relacionadas entre sí (Hirose y Bazzaz, 1998). Coincidentemente, Caviglia y Sadras (2004), sugieren una relación inversa entre la EUA y EUN para el cultivo de trigo, en un ambiente semiárido de Australia. Asimismo, se ha encontrado que los vínculos entre EUR y EUA se mantienen cuando se pasa de considerar desde el nivel de los cultivos individuales de trigo y soja al doble cultivo trigo-soja (Caviglia et al., 2004). Si la EUN se reduce con la disponibilidad de nitrógeno, se puede asumir que debería existir un nivel de aplicación de fertilizantes que permita maximizar la EUA y la EUR con una reducción mínima en la EUN, maximizando el uso de todos los recursos.

4.4.- Índice de área foliar (IAF)

Crofts *et al.* (1971), conciben el índice de área foliar como una medida de frondosidad de la planta mediante la cual se puede conocer la proporción de superficie foliar expuesta a la luz, en la cual podrá ocurrir la fotosíntesis.

El índice de área foliar (IAF) es uno de los parámetros más útiles para caracterizar la vegetación. Se define como unidades de superficie de hoja verde por

unidad de superficie de terreno, pudiéndose valorar como total (ambas caras) o proyectada (superficie capaz de interceptar la radiación). La relación entre total y proyectada es de 2.0 para las especies de hoja ancha y oscila entre 2 y 3 para las hojas en forma de acículas, con valores típicos entre 2 a 4 y 2 a 6 (Waring *et al.* 1982).

El IAF interviene en las ecuaciones que describen muchos de los procesos físicos y químicos de un dosel vegetal, por lo que es frecuente en los modelos que simulan masas de vegetación. Sin embargo, es un parámetro difícil de medir (Willey y Health, 1969).

La mayoría de los cultivos tienden a invertir la mayor parte de su crecimiento temprano en expandir su área foliar, lo que resulta en un mejor aprovechamiento de la radiación solar. La intercepción de la radiación solar incidente que asegura las máximas tasas de crecimiento del cultivo, se encuentra cuando el índice de área foliar IAF aumenta hasta el IAF crítico, que permite captar el 95% de la radiación incidente. El comportamiento del IAF tiende a describir un incremento en etapas tempranas hasta llegar a plena floración, decreciendo a medida que la maduración de los frutos avanza. Los valores de IAF alcanzados por el cultivo dependen de la densidad de plantas y del arreglo de su distribución espacial (Andrade *et.al*,1993).

Gerakis y Papacosta (1979), al trabajar con maíz y analizar los parámetros de crecimiento en función de la densidad de población observaron que por unidad de área el peso seco e IAF se incrementan a medida que aumenta la densidad y bajo esas condiciones obtuvieron la máxima tasa de crecimiento del cultivo. El índice de área foliar es uno de los parámetros más importantes en la evaluación del crecimiento de las plantas de ahí que la determinación adecuada del mismo sea fundamental para la correcta interpretación de los procesos de desarrollo del cultivo.

4.5.- Materia seca parcial aérea (MAPA)

La materia seca es el resultante final del proceso fotosintético y la respiración en la cual, parte de los carbohidratos producidos en este proceso, son utilizados como material de construcción para la estructura de la planta (Akira y Yamaguchi, 1984).

Es frecuentemente observado que la ganancia de peso seco del cultivo es aproximadamente proporcional a la intercepción de la luz de la cubierta vegetal. Estas relaciones son utilizadas en algunos modelos para predecir la ganancia de peso seco. El conocimiento acerca del crecimiento y desarrollo de los cultivos permite tomar decisiones adecuadas de manejo. La producción de materia seca y el rendimiento dependen fuertemente de la captación de recursos: luz, agua y nutrientes. Las posibilidades de absorber agua y nutrientes están condicionadas por la exploración del suelo por las raíces (Mayaki *et al*; 1976). La planta de maíz tiene una alta eficiencia en el uso del agua en cuanto a producción de materia seca, y entre los cereales es potencialmente el cultivo de grano de mayor rendimiento (Doorenbos y Kassam, 1979).

D'Antuono y Rossini (1995), señalaron que la máxima tasa de acumulación de materia seca aérea en el cultivo se produce después de la floración. En los estados tempranos del cultivo la materia seca se conformaría principalmente por tallos y hojas, con un predominio de cápsulas y tallos después de la floración. Por su parte Frey (1981), menciona que el rendimiento del grano de maíz es la integración de la materia seca en el tiempo.

V.- MATERIALES Y MÉTODOS

5.1.- Descripción del sitio experimental

El maíz fue sembrado el 21 de Mayo de 2008 en el campo agrícola de una unidad de producción en la comunidad el Prado municipio de Galeana, N.L. cuyas coordenadas son 25° 05' de latitud norte, 100° 42' longitud oeste, a una altitud de 1890 msnm. Se sembró la variedad JAGUAN en parcelas de 90 m² con 3 niveles de fertilización nitrogenada (0, 60 y 120 unidades de N/ha) y 3 densidades de población (DP), DP1=30,000, DP2=50,000 y DP3=70,000 plantas/ha. Los niveles de fertilización y las densidades de población se utilizaron para desarrollar un modelo en STELLA 9.0.2.

5.2.- Recopilación y manejo de datos

5.2.1.- Variables de respuesta

Emergencia. Cuando la planta ha brotado del suelo. Este muestreo se realizó a la segunda semana después de la siembra, este consistió en contar el número de plantas emergidas en tres surcos de 30 m seleccionados al azar dentro de cada unidad experimental.

Materia seca parcial aérea (MSPA). A partir de los 15 días después de la siembra y así semanalmente se cortaron tres plantas elegidas al azar dentro de cada unidad experimental, se guardaron en bolsas de papel, se secaron en una estufa a 65°C por 72 horas y se pesaron en una balanza analítica. A partir de las tres muestras se obtuvo la media del peso por planta y para expresarlo en kg/ha se multiplicó por la población de plantas por hectárea.

Índice de área foliar (IAF). De las tres plantas que se utilizaron para materia seca aérea, el componente hoja se utilizó para determinar el área foliar. Este se estimó con un medidor de área foliar LICOR mod. LI-3100A. Para estimar el índice de área

foliar (IAF) se utilizaron los datos de muestreo de población de plantas en una hectárea, se estimó el área que ocupaban las tres plantas cortadas y finalmente se dividió el área foliar entre la superficie que ocupaban las plantas.

Datos climáticos. Los datos climáticos utilizados en este trabajo se obtuvieron de una estación climática automática (Davis Vantage Pro 2) que se instaló al inicio del experimento, y de la estación climática del Cuije perteneciente al INIFAP. Los datos que se utilizaron fueron: temperatura mínima, máxima y radiación solar.

Se calcularon grados días de desarrollo (GDD) según las formulas propuesta por y Bradley (1994).

Grados día de desarrollo ó

$$GDD = \sum_{i=1}^n (T_i - T_{base})$$

$$T_i = \frac{T_{max} - T_{min}}{2}$$

Donde:

T_i = *Temperatura media en el dia*

T_{max} = *Temperatura maxima en el dia*

T_{min} = *Temperatura minima en el dia*

T_{base} = *Temperatura base (7°C)*

Radiación acumulada (RA)

Los datos de radiación solar en la estación climática se registraron a un metro de altura cada media hora en watts/m² pero para la construcción de los modelos fueron transformados en unidades de MJ/m²/día para hacer esta conversión se hizo lo siguiente:

Por definición, un Watt es igual a un J seg^{-1} y un MJ es igual a un millón de Joules. Como los registros se hicieron cada 30 minutos se tuvieron 48 valores de radiación en W m^{-2} durante las 24 horas diarias. Entonces se obtuvo el promedio en $\text{W m}^{-2} \text{seg}^{-1}$. El valor acumulado en el día fue el promedio multiplicado por 86,400 segundos que tiene un día obteniendo el resultado de $\text{J m}^{-2} \text{día}^{-1}$ que dividido entre 1,000,000 es igual a $\text{MJ m}^{-2} \text{día}^{-1}$.

Radiación fotosintéticamente activa (RFA)

La radiación fotosintéticamente activa fue estimada por la ecuación propuesta por Stapper y Arkin (1980), la cual es como sigue:

$$RFA = 0.5 \cdot Rg(1 - e^{-K(IAF)})$$

Dónde:

Rg = Radiación global

K = Coeficiente de extinción que determina la cantidad de luz atenuada por las plantas

IAF = Índice de área foliar

e = Base de los logaritmos naturales

El parámetro presentado en la ecuación RFA fue tomado del Modelo Parch formulado por Bradley *et al.*, (1994).

5.3.- Construcción del Modelo en Stella 9.0.2

Para desarrollar el modelo en el programa STELLA 9.0.2 se utilizaron datos de temperatura media diaria y de radiación acumulado en tres años, el uso de ecuaciones obtenidas con un factor de correlación (r) y ajustándolos de la manera mas correcta mediante un software estadístico, el cual indica la asociación o efecto de una variable en otra (Gijzman, 2002).

Obtenidas dichas ecuaciones, de un análisis estadístico de acuerdo con la información del experimento de campo, para el cultivo; se construyó el modelo dinámico de simulación de índice de área foliar (IAF) y materia seca parcial aérea (MSPA) con el software STELLA 9.0.2, basados en una serie de ecuaciones diferenciales, en el que se utilizaron las variables, tales como radiación, temperatura, de los cuales se obtuvo grados-días-desarrollo (GDD) en el caso del sistema ambiente; en el caso respuesta, se tomaron en cuenta las variables como IAF (índice de área foliar), MSPA (materia seca parcial aérea), todo lo anterior influido por las unidades de nitrógeno a diferentes cantidades 0, 60 y 120 unidades de nitrógeno por hectárea respectivamente y una comparación con las densidades de población a las que se trabajó 30, 50, y 70 mil plantas por hectárea respectivamente.

5.4.- Descripción del modelo MAIZ-UAN.

Se construyó un modelo de simulación para maíz denominado MAIZ-UAN, para la construcción se utilizó el software STELLA 9.0.2 con cálculos diarios.

El modelo, mediante una serie de ecuaciones lineales considera el efecto del tiempo térmico (unidades térmicas) o GDD (grados días-desarrollo) y el efecto de la radiación tomado cada 30 minutos durante las 24 horas del día a un metro de altura. El modelo de simulación esta constituido por tres Submodulos

que son: Submodulo clima (SC), Submodulo de crecimiento y desarrollo (SCD) y Submodulo de manejo (SM).

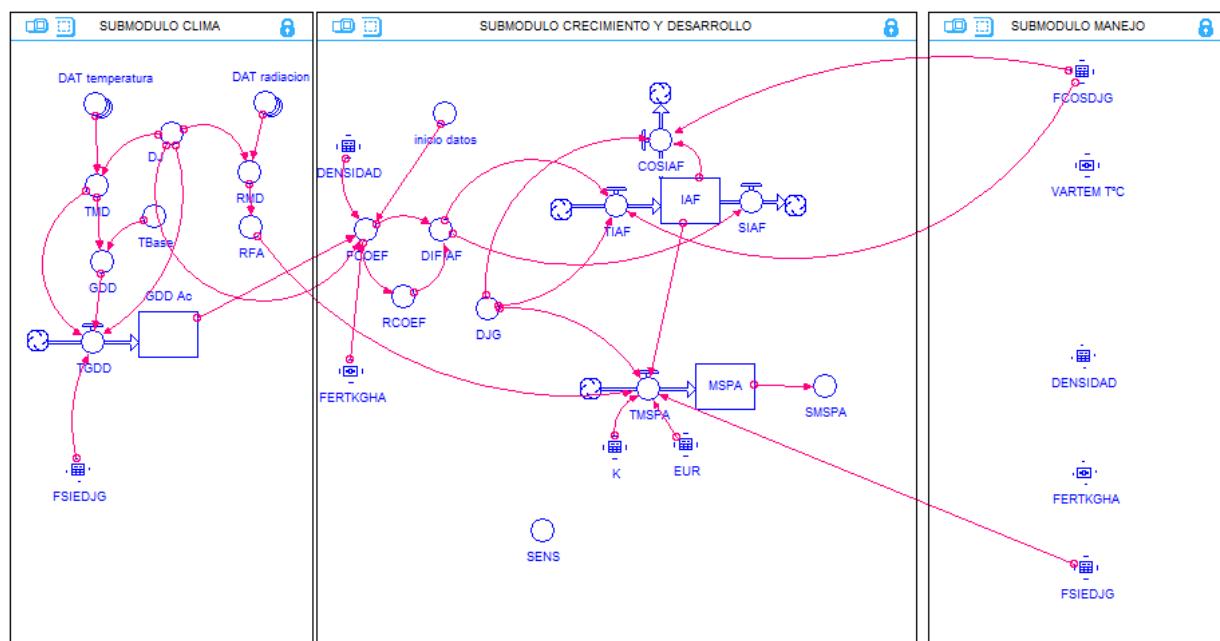


Figura 5. Esquema del modelo maiz UAN, Submodulo clima (SC), Submodulo crecimiento y desarrollo (SCD) y Submodulo manejo (SM) del MAIZ-UAN variedad JAGUAN.

5.4.1.- Submodulo climático (SC)

El submodulo climático representa la dinámica de temperatura y radiación obtenidas diariamente mediante una estación climática semiautomática durante el establecimiento del cultivo y lo acumulado durante tres años, obtenido de las estaciones climáticas el Cuije y el Mezquite (pertenecientes al INIFAP) las más cercanas a la zona de experimentación. Los días del año fueron adecuados en julianos con una función contador de 1-366 días.

La base del SC es un generador de temperaturas medias diarias (TMD) y radiación media diaria (RMD). Este generador se desarrolló con una distribución normal bajo los supuestos de la teoría de límite central con las temperaturas medias y desviaciones estándar, obtenidas de datos de temperatura media durante 3 años del lugar de estudio (ver Cuadro 1).

Cuadro 1. Variables meteorológicas correspondientes (Radiación y Temperatura promedio mensual) a los años 2007-2009 registrada en los ejidos El Mezquite, y El Cuije, Galeana, Nuevo León, México.

Mes	Radiación media mensual		Temperatura media mensual	
	2007-2009		2007-2009	
	Media ± D	Estándar	Media ± D	Estándar
Enero	14.242	4.635	9.948	2.897
Febrero	18.313	4.603	11.250	3.364
Marzo	22.133	4.177	14.025	3.355
Abril	24.002	4.480	16.499	2.253
Mayo	23.106	5.345	17.907	1.890
Junio	23.093	5.327	18.963	2.288
Julio	22.060	5.726	18.870	2.382
Agosto	20.214	4.698	18.894	1.295
Septiembre	18.978	4.426	17.701	2.198
Octubre	18.667	2.855	15.045	2.955
Noviembre	14.653	3.598	11.819	1.949
Diciembre	14.123	4.582	10.680	2.817

Para calcular los grados días desarrollo (GDD) se utilizó el método residual, el cual establece que a la TMD se le resta la temperatura base (8 °C) del cultivo (Temperatura mínima en la que se inician las funciones fisiológicas).

Es decir:

$$GDD = TMD - TBase \quad \text{(ecuación 1)}$$

Donde TMD= temperatura media diaria

TBase= temperatura base (8°C)

Con la variable GDD se estimó GDD Ac (grados días desarrollo acumulado o tiempo térmico) mediante la ecuación siguiente:

$$GDD_Ac(t) = GDD_Ac(t - dt) + (TGDD) * dt \quad (\text{ecuación 2})$$

Donde TGDD representa la tasa de GDD diarios (°C), es decir donde $GDD = TMD - TB$. Cuando TMD es > que TB, (si se cumple) y si TMD es menor o igual a TB, entonces $GDD = 0$, y TMD representa la temperatura media diaria en °C, la cual puede representarse mediante una distribución normal para un día dado del año basándose en 3 años.

Un proceso similar se llevó a cabo para la radiación, con la media y desviación estándar, obtenidas interaccionando con el contador de los días julianos se obtuvo la RMD (radiación media diaria). Una vez obtenida se procedió a calcular la RFA (radiación fotosintéticamente activa) de la siguiente manera:

$$RFA = RMD/2 \quad (\text{ecuación 3})$$

Donde RMD es radiación media diaria, radiación fotosintéticamente activa RFA es muy importante ya que interactúa y es determinante para calcular materia seca parcial aérea MSPA e índice de área foliar IAF en el submodulo crecimiento y desarrollo.

5.4.2.- Submodulo crecimiento y desarrollo (SCD)

En este submodulo se integraron variables tales como; índice de área foliar (IAF) y Materia seca aérea (MSA) en $kg\ ha^{-1}$.

5.4.2.1.- Índice de área foliar (IAF)

La dinámica del índice área foliar se representa mediante la ecuación:

$$IAF(t) = IAF(t - dt) + (TIAF - SIAF - COSIAF) * dt \quad (\text{ecuación 4})$$

Dónde: TIAF es la tasa de índice de área foliar diaria; SIAF y COSIAF representan pérdidas de IAF durante la cosecha.

Donde la ecuación 4 es la diferencia obtenida del IAF en un tiempo actual menos lo generado en el intervalo de tiempo anterior (retraso en el tiempo). El modelo de mayor ajuste fue una función de distribución normal denominado modelo Gaussiano $y=a*\exp(-((b-x)^2)/(2*c^2))$, donde las funciones utilizadas en la ecuación son las siguientes:

$$TIAF= 3.66*EXP(-((GDD_Ac^2)-(2*(GDD_Ac*1.34))+1.34^2))/(2*(4.02^2)))$$

(Ecuación 5 con una R2 de 0.98 y 00 unidades de nitrógeno)

$$TIAF= 3.73*EXP(-((GDD_Ac^2)-(2*(GDD_Ac*1.30))+1.30^2))/(2*(4.02^2)))$$

(Ecuación 6 con una R2 de 0.99 y 60 unidades de nitrógeno)

$$TIAF= 3.71*EXP(-((GDD_Ac^2)-(2*(GDD_Ac*1.23))+1.23^2))/(2*(3.45^2)))$$

(Ecuación 7 con una R2 de 0.96 y 120 unidades de nitrógeno)

Donde GDD_Ac es estimada usando la *ecuación 2*. Las ecuaciones anteriores descritas fueron obtenidas al correlacionar GDD_Ac y la variable función IAF. El modelo de mayor ajuste fue una función de distribución normal denominado modelo Gaussiano $y=a*\exp(-((b-x)^2)/(2*c^2))$, para los tres niveles de fertilización, 120, 60, 00 y tres densidades de siembra, con un valor de $R^2 = 0.96, 0.99$ y 0.98 , ecuaciones (5, 6 y 7) respectivamente.

La ecuación de la función utilizada en el modelo para IAF combinando densidades de siembra y niveles de fertilización está basado en el modelo Gaussiano $y=a*\exp(-((b-x)^2)/(2*c^2))$; encontrado con el software Curve Expert ver 3.0 que fue el que más se ajustó; adecuado la ecuación al programador de STELLA 9.0.2 que usa las funciones de lenguaje BASIC.

```

IF DJ>=inicio_datos THEN ( IF DENSIDAD = 30000 THEN (IF FERTKGHA=120 THEN 3.71*EXP(-((GDD_Ac^2)-
(2*(GDD_Ac*1.23))+(1.23^2)))/(2*(3.45^2))) ELSE IF FERTKGHA=60 THEN 3.73*EXP(-((GDD_Ac^2)-
(2*(GDD_Ac*1.30))+(1.30^2)))/(2*(4.02^2))) ELSE IF FERTKGHA=0 THEN 3.66*EXP(-((GDD_Ac^2)-
(2*(GDD_Ac*1.34))+(1.34^2)))/(2*(4.02^2))) ELSE 0)
ELSE IF DENSIDAD = 50000 THEN (IF FERTKGHA=120 THEN 3.71*EXP(-((GDD_Ac^2)-
(2*(GDD_Ac*1.23))+(1.23^2)))/(2*(3.45^2))) ELSE IF FERTKGHA=60 THEN 3.73*EXP(-((GDD_Ac^2)-
(2*(GDD_Ac*1.30))+(1.30^2)))/(2*(4.02^2))) ELSE IF FERTKGHA=0 THEN 3.66*EXP(-((GDD_Ac^2)-
(2*(GDD_Ac*1.34))+(1.34^2)))/(2*(4.02^2))) ELSE 0)
ELSE IF DENSIDAD = 70000 THEN (IF FERTKGHA=120 THEN 3.71*EXP(-((GDD_Ac^2)-
(2*(GDD_Ac*1.23))+(1.23^2)))/(2*(3.45^2))) ELSE IF FERTKGHA=60 THEN 3.73*EXP(-((GDD_Ac^2)-
(2*(GDD_Ac*1.30))+(1.30^2)))/(2*(4.02^2))) ELSE IF FERTKGHA=0 THEN 3.66*EXP(-((GDD_Ac^2)-
(2*(GDD_Ac*1.34))+(1.34^2)))/(2*(4.02^2))) ELSE 0) ELSE 0) ELSE 0)

```

(Ecuación 8)

5.4.2.1.- Materia seca parcial aérea (MSPA)

La dinámica de materia seca aérea (kg MSA ha⁻¹) se representó como:

$$TMSA(t) = TMSA(t - dt) + (MSA) * dt \quad \text{(ecuación 9)}$$

Dónde: TMSA es la tasa de acumulación de materia seca en g m⁻²d⁻¹. Multiplicando la ecuación de TMSA por 10 obtenemos kg MSA ha⁻¹ (MSA = TMSA*10). Esta tasa fue estimada de acuerdo con la ley de Beer-Lambert, esta ley describe la atenuación del perfil del dosel en función del área foliar acumulada y la orientación de las hojas (Bradley y Crut, 1994). Con este principio y los coeficientes que se utilizaron en el programa STELLA 9.0.2 tal como coeficiente de extinción= 0.5 y EUR (Eficiencia en el uso de la radiación solar)= 1.5, encontramos la tasa de crecimiento del cultivo que se calculó; como sigue:

$$TMSPA = EUR * RFA * (1 - \exp(-K * IAF)) \quad \text{(ecuación 10)}$$

Donde RFA es la radiación fotosintéticamente activa (MJ m⁻² d⁻¹) fue estimada de los datos climáticos registrados en el sitio experimental. La RFA (radiación fotosintéticamente activa) se calculó de la siguiente manera:

$$RFA = RMD/2 \quad \text{(ecuación 11)}$$

Donde RMD es radiación media diaria.

5.4.3.- Submodulo manejo

Este submodulo permite simular diferentes escenarios de manejo, está representado por las densidades de siembra, los niveles de fertilización, la fecha de siembra y la fecha de cosecha y la dinámica existente en ellos. Estas variables se pueden modificar por el usuario de acuerdo al interés de simulación. Es decir, el modelo tiene la capacidad de simular diferentes fechas de siembra, así como programar fechas de cosecha, diversos niveles de fertilización y densidades de siembra diferentes, entre otros aspectos manipulables del cultivo.

5.4.4.- Evaluación del modelo

Para la evaluación del modelo se hizo un análisis de sensibilidad. Se realizaron cien corridas comparativas simulando el funcionamiento del sistema de cultivo de maíz. Para verificar que los resultados del modelo representan la realidad, se compararon con los resultados obtenidos en campo. Se hicieron diferentes corridas en las que se combinaron los valores de algunas variables. Las variables que se manipularon fueron: la densidad de población (D), los niveles de fertilización (NF), el coeficiente de extinción (K), la eficiencia en el uso de la radiación (EUR), fecha de siembra.

Parámetro utilizados en el modelo maíz UAN.

DENSIDAD = 30,000 50,000 70,000 plantas por hectárea

FERTKGHA = 0, 60 y 120 unidades de nitrógeno por hectárea

FSIEDJG (fecha de siembra en días julianos) = 142

FCOSDJG (fecha de cosecha en días julianos) = 305

K (coeficiente de extinción)= 0.5

EUR (eficiencia en el uso de la radiación)= 1.5-2.5

Con los resultados obtenidos en cada corrida se generó una base de datos en una hoja de cálculo de EXCEL luego se pasaron al programa STATISTICA, donde se graficaron los resultados de los simulados por el modelo, con los observados en campo.

VI.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las variables que se presentan como resultados del modelo MAIZ-UAN son: materia seca parcial aérea (MSPA) e índice de área foliar (IAF) estos resultados fueron obtenidos de 100 corridas que se hicieron al modelo dinámico de simulación con tres niveles de fertilización, tres densidades de población y dos variables aleatorias (Temperatura media del día y Radiación solar media del día).

6.2.- Índice de Área Foliar (IAF)

En el Gráfico 1 se presentan los valores observados y simulados de índice de área foliar (IAF) para una densidad de población de 30000 plantas por hectárea con 00 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico el modelo tuvo un buen ajuste siendo parecidos los datos observados con los simulados al seguir la misma tendencia, esto hasta el día 249. Sin embargo después de este día el modelo sobre estima IAF quedándose lo observado por debajo de lo simulado, esto se corrobora con la prueba de t realizada para datos observados y simulados en la cual se observa diferencia estadística NS $p \leq 0.05$ para esta densidad de población y nivel de fertilización con una diferencia de -0.318861 a favor de los datos simulados (ver Cuadro 2).

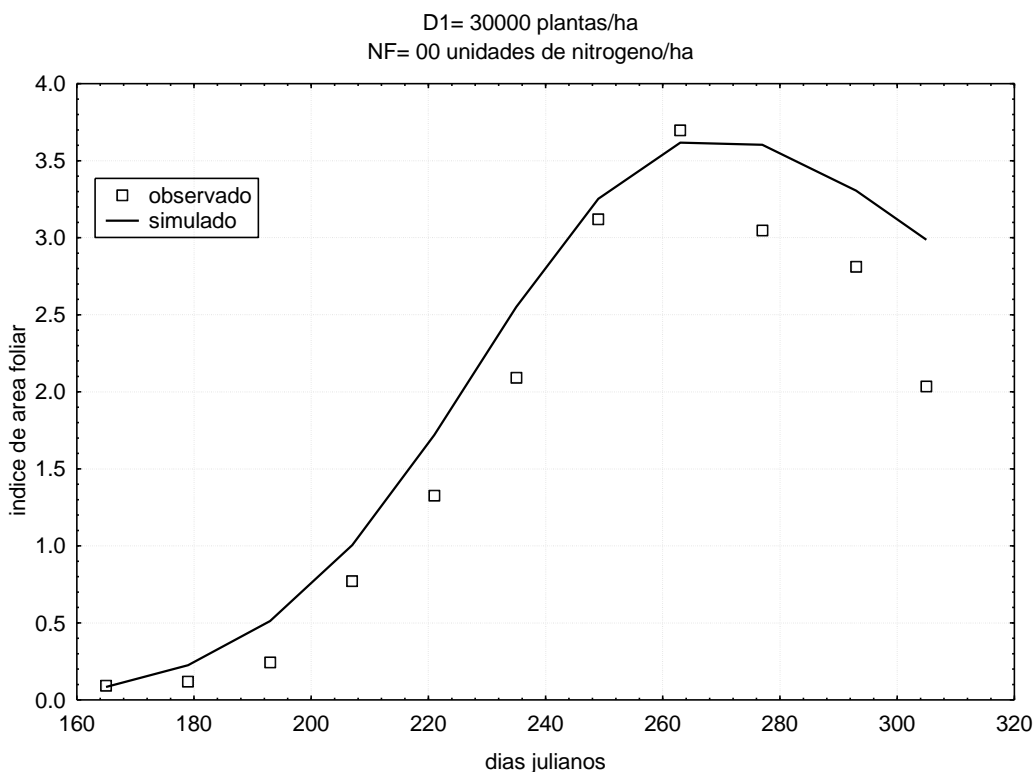


Gráfico 1. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados y observados en un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D1= densidad de población 30000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00 unidades de nitrógeno/ha.

En el Gráfico 2 se presentan los valores observados y simulados de índice de área foliar (IAF) para una densidad de población de 30000 plantas por hectárea con 60 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico el modelo tuvo poco ajuste, más sin embargo continúan siendo parecidos los datos observados con los simulados al seguir la misma tendencia. Sin embargo se observa el modelo sobre estima IAF apareciendo los datos observados por debajo de lo simulados, esto se corrobora con la prueba de t realizada para observados y simulados en la cual se encuentra diferencia estadística NS $p \leq 0.05$ para esta densidad de población y nivel de fertilización con una diferencia de -0.345255 a favor de los datos simulados (ver Cuadro 2).

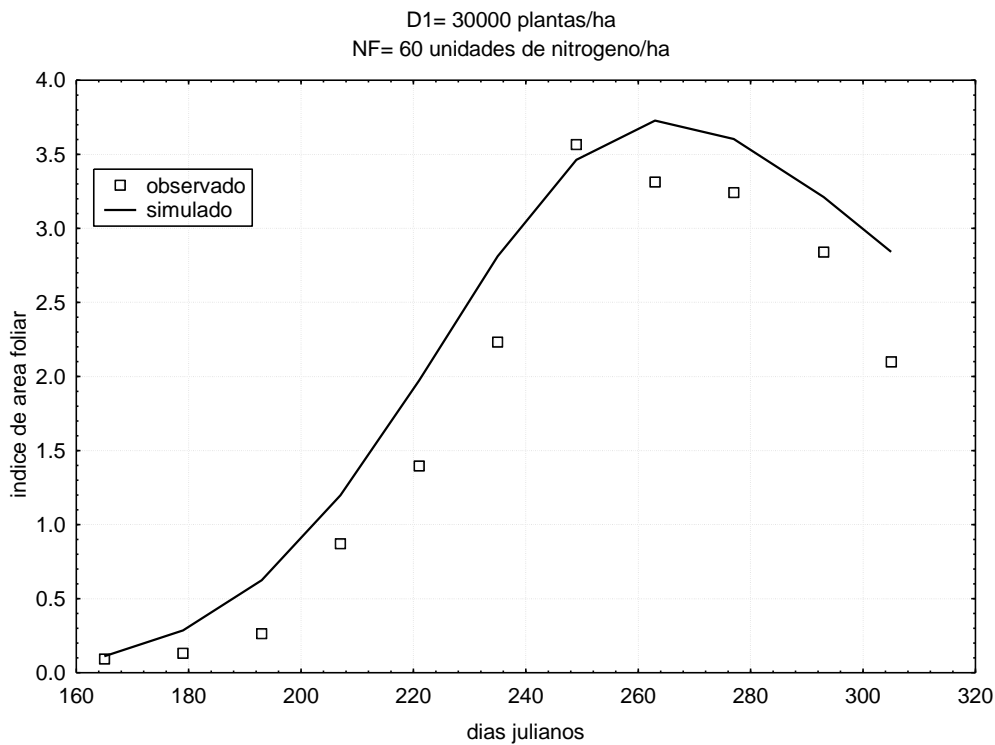


Gráfico 2. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados y observados en un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D1= densidad de población 30000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 60 unidades de nitrógeno/ha.

En el Gráfico 3 se presentan los valores observados y simulados de índice de área foliar (IAF) para una densidad de población de 30000 plantas por hectárea con 120 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico, el modelo tuvo buen ajuste siendo concordantes los observados con los simulados al seguir la misma tendencia, esto se corrobora con la prueba de t realizada para datos observados y simulados donde no se encontró diferencia estadística significativa NS $p \leq 0.05$ entre valores, para esta densidad de población y nivel de fertilización (ver Cuadro 2).

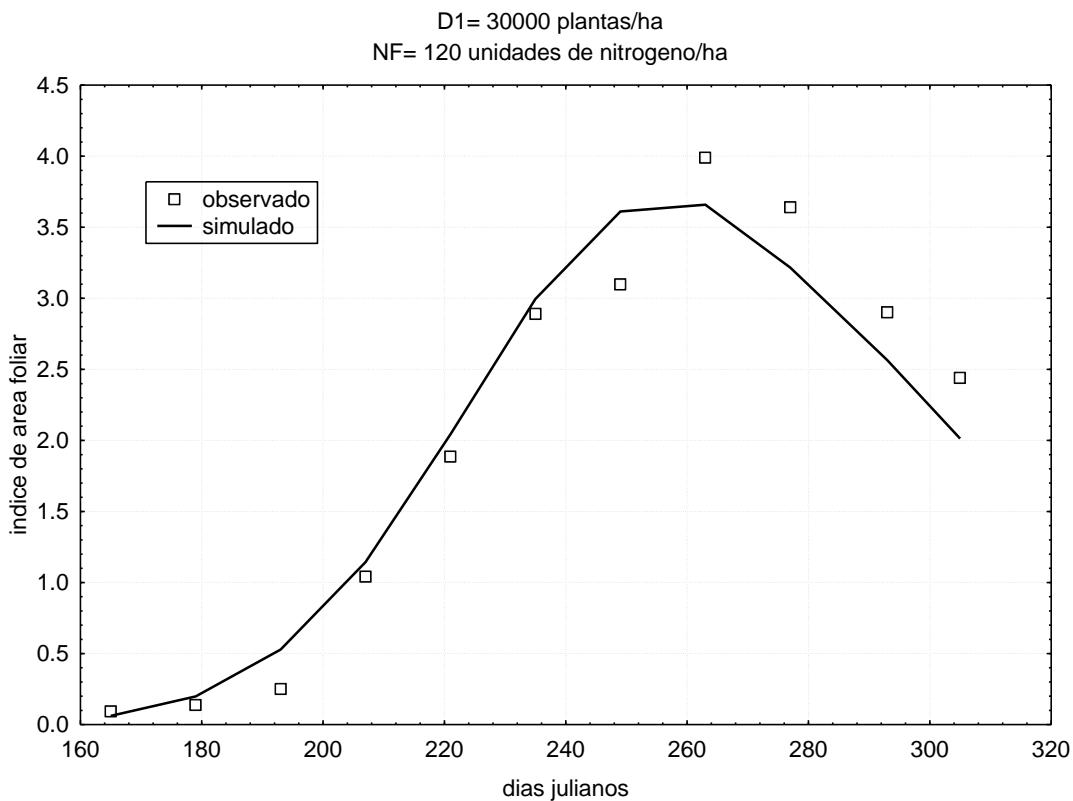


Gráfico 3. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados y observados en un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D1= densidad de población 30000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 120 unidades de nitrógeno/ha.

En el Gráfico 4 se presentan los valores simulados de índice de área foliar (IAF) para una densidad de población de 30000 plantas por hectárea con 00, 60 y 120 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico con a medida que aumenta el nivel de fertilización se incrementa el IAF, dado que la planta de maíz responde positivamente a la fertilización nitrogenada. Sin embargo con 120 unidades de nitrógeno el IAF decae más rápidamente después del día 260.

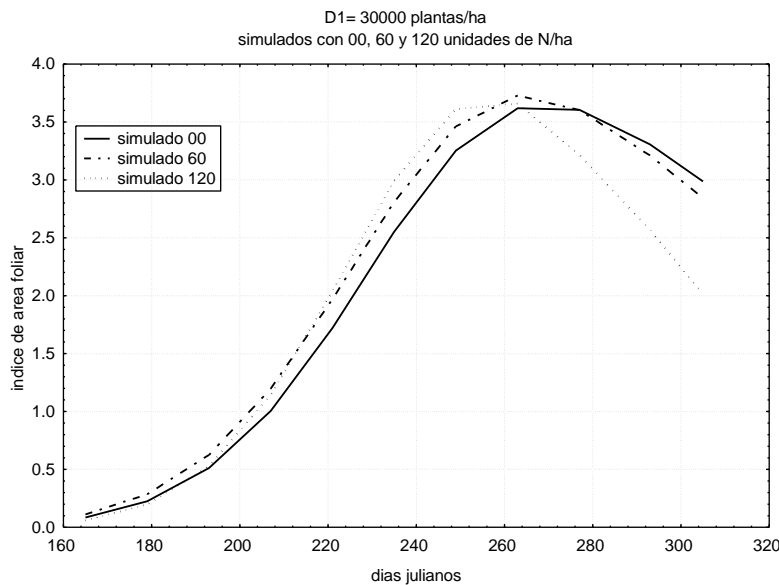


Gráfico 4. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados en un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D1= densidad de población 30000 plantas/ha y nivel de fertilización 00, 60, y 120 unidades de nitrógeno/ha respectivamente.

Cuadro 2. Prueba de t para observados y simulados de índice de área foliar (IAF) con 30000 plantas/a y los tres niveles de fertilización 00, 60, y 120 unidades de nitrógeno/ha NS $p \leq 0.05$. D= densidad de población, NF= nivel de fertilización.

D	NF	PRUEBA DE T PARA OBSERVADOS Y SIMULADOS				
		OBSERVADOS	SIMULADOS	DIFERENCIA	T	P
30,000	0	1.759994	2.078855	-0.318861	-3.58754	0.004949
	60	1.823173	2.168427	-0.345255	-4.60544	0.000972
	120	2.033280	2.003127	0.030153	0.321576	0.754395

En el Gráfico 5 se presentan los valores observados y simulados de índice de área foliar (IAF) para una densidad de población de 50000 plantas por hectárea con 00 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico el modelo tuvo buen ajuste siendo similares los datos observados con los simulados al seguir la misma tendencia. Esto se confirma con la prueba de t realizada para datos observados y simulados donde no se encontró diferencia estadística significativa NS $p \leq 0.05$ entre valores, para esta densidad de población y nivel de fertilización (ver Cuadro 3). También se observa que los datos observados fueron inferiores a partir del día 200 al 260.

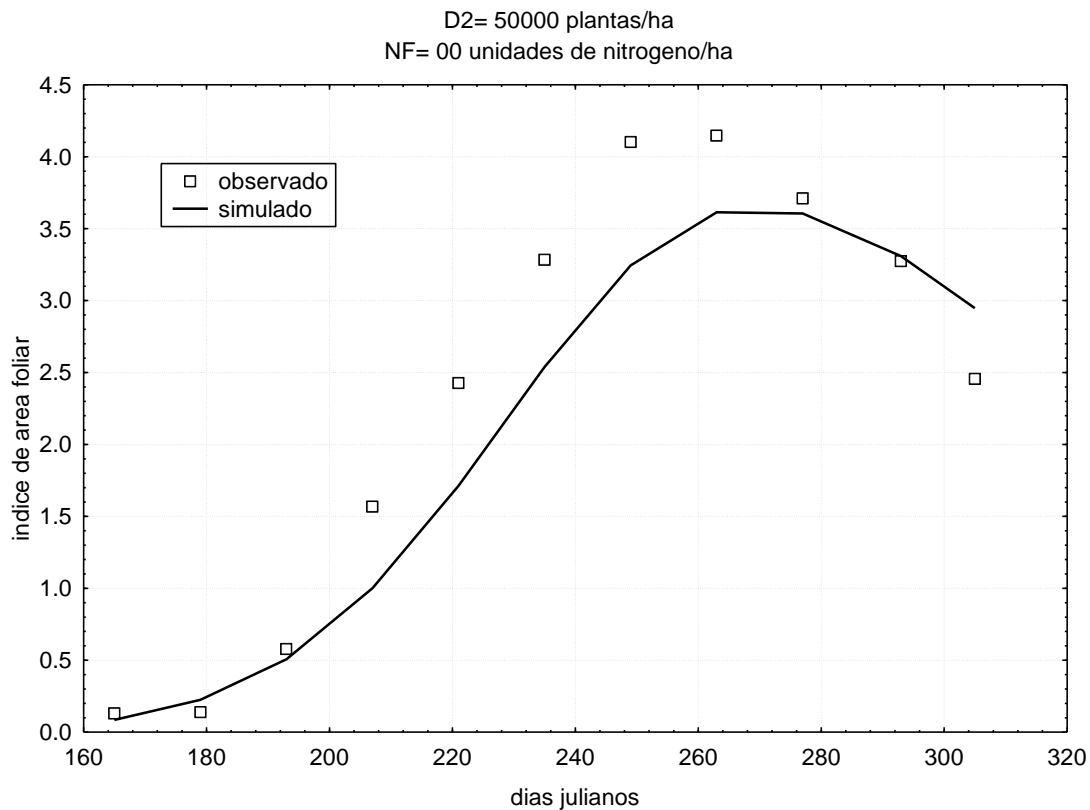


Gráfico 5. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados y observados en un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D2= densidad de población 50000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00 unidades de nitrógeno/ha.

En el Gráfico 6 se presentan los valores observados y simulados de índice de área foliar (IAF) para una densidad de población de 50000 plantas por hectárea con 60 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico el modelo tuvo buen ajuste siendo coincidentes los datos observados con los simulados al seguir la misma tendencia. Esto se confirma con la prueba de t realizada para observados y simulados donde no se encontró diferencia estadística significativa NS $p \leq 0.05$ entre valores, para esta densidad de población y nivel de fertilización (ver Cuadro 3). También se observa que los datos observados fueron superiores a los simulados a partir del día 200 al 249.

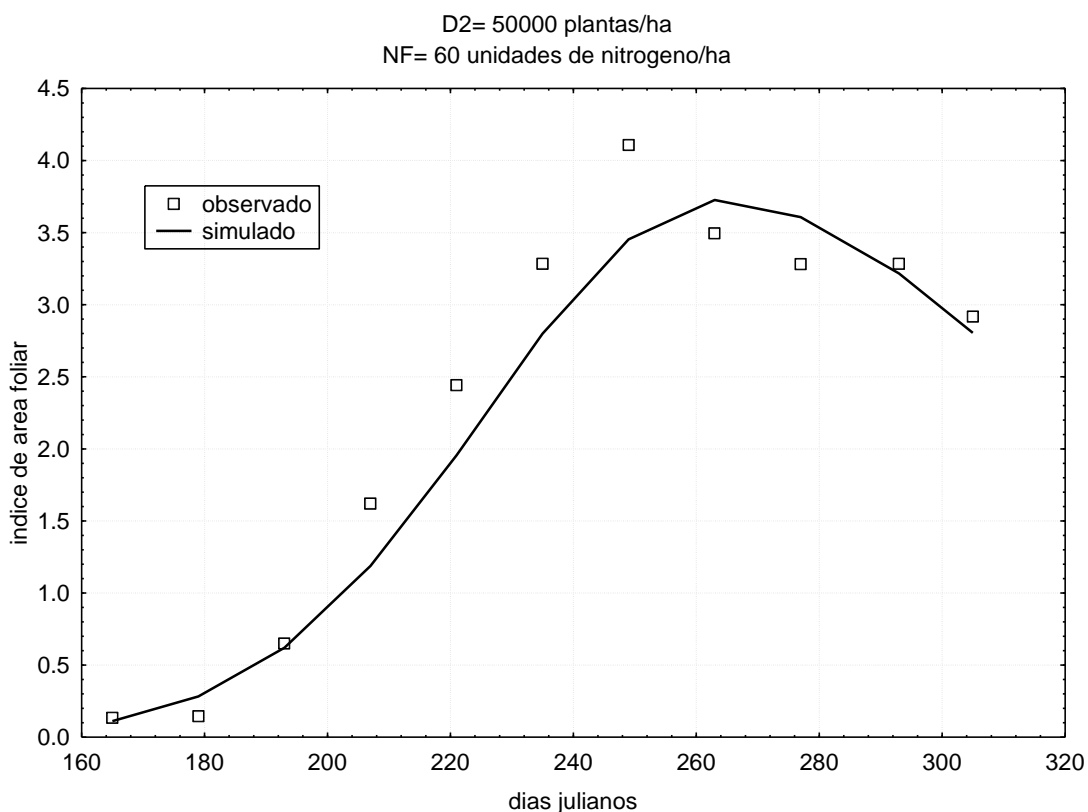


Gráfico 6. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados y observados en un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D2= densidad de población 50000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 60 unidades de nitrógeno/ha.

En el Gráfico 7 se presentan los valores observados y simulados de índice de área foliar (IAF) para una densidad de población de 50000 plantas por hectárea con 120 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico el modelo tuvo buen ajuste siendo coincidentes los datos observados con los simulados al seguir la misma tendencia. Esto se corrobora con la prueba de t realizada para observados y simulados donde no se encontró diferencia estadística significativa NS $p \leq 0.05$ entre valores, para esta densidad de población y nivel de fertilización (ver Cuadro 3). También se observa que los datos observados fueron superiores a los simulados a partir del día 200 al 280.

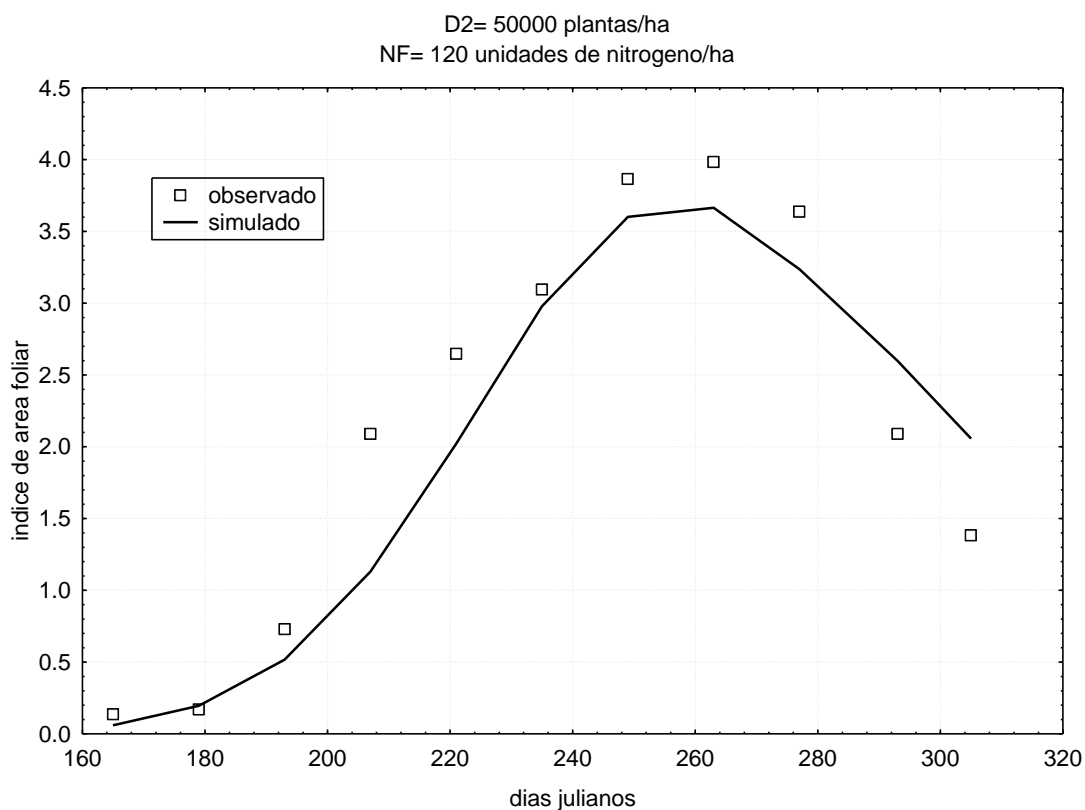


Gráfico 7. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados y observados en un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D2= densidad de población 50000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 120 unidades de nitrógeno/ha.

En el Gráfico 8 se presentan los valores simulados de índice de área foliar (IAF) para una densidad de población de 50000 plantas por hectárea con 00, 60 y 120 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico a medida que aumenta el nivel de fertilización se incrementa el IAF, sin embargo con 120 unidades de nitrógeno el IAF decae mas rápidamente después del día 260 manteniéndose constante y mostrando valores más elevados con 00 y 60 unidades de N/ha.

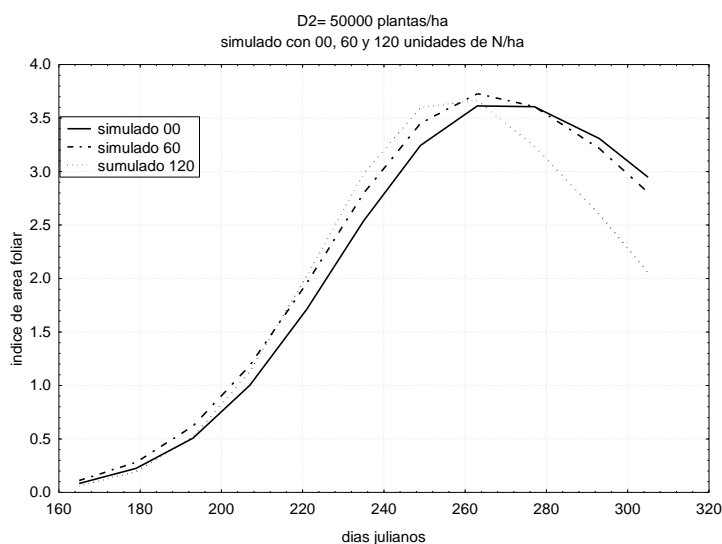


Gráfico 8. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados en un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D2= densidad de población 50000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00, 60, y 120 unidades de nitrógeno/ha.

Cuadro 3. Prueba de t para observados y simulados de índice de área foliar (IAF) con 50000 plantas/ha y los tres niveles de fertilización 00, 60, y 120 unidades de nitrógeno/ha NS $p \leq 0.05$. D= densidad de población, NF= nivel de fertilización.

D	NF	PRUEBA DE T PARA OBSERVADOS Y SIMULADOS				
		OBSERVADOS	SIMULADOS	DIFERENCIA	T	P
50,000	0	2.346904	2.071855	0.275050	2.123433	0.059678
	60	2.305106	2.160482	0.144624	1.478664	0.170024
	120	2.165751	2.005864	0.159888	1.146253	0.278379

En el Gráfico 9 se presentan los valores observados y simulados de índice de área foliar (IAF) para una densidad de población de 70000 plantas por hectárea con 00 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico el modelo tuvo buen ajuste siendo coincidentes los datos observados con los simulados al seguir la misma tendencia. Esto se confirma con la prueba de t realizada para datos observados y simulados la cual no presento diferencia estadística significativa NS $p \leq 0.05$ entre valores, para esta densidad de población y nivel de fertilización (ver Cuadro 4).

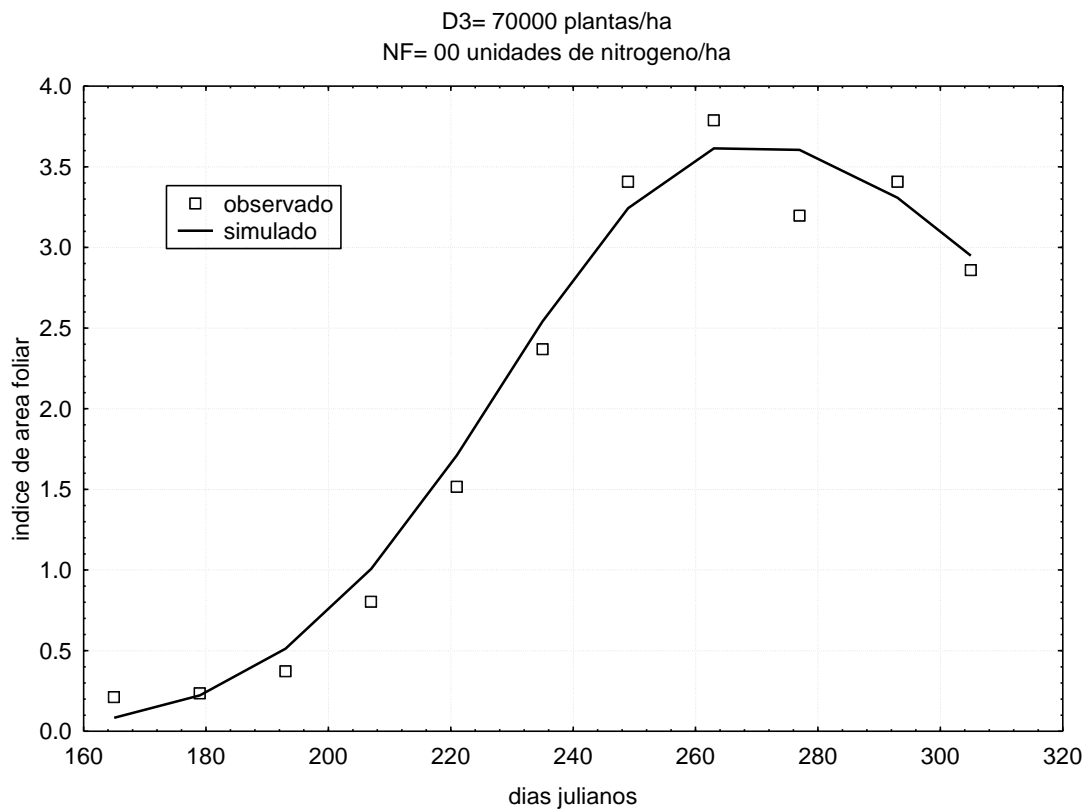


Gráfico 9. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados y observados en un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo o. D3= densidad de población 70000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00 unidades de nitrógeno/ha.

En el Gráfico 10 se presentan los valores observados y simulados de índice de área foliar (IAF) para una densidad de población de 70000 plantas por hectárea con 60 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico el modelo tuvo buen ajuste siendo coincidentes los datos observados con los simulados al seguir la misma tendencia. Esto se corrobora con la prueba de t realizada para datos observados y simulados la cual no presento diferencia estadística significativa NS $p \leq 0.05$ entre valores, para esta densidad de población y nivel de fertilización (ver Cuadro 4). También se observa que los datos observados superan a los datos simulados a partir del día 200 hasta el 240.

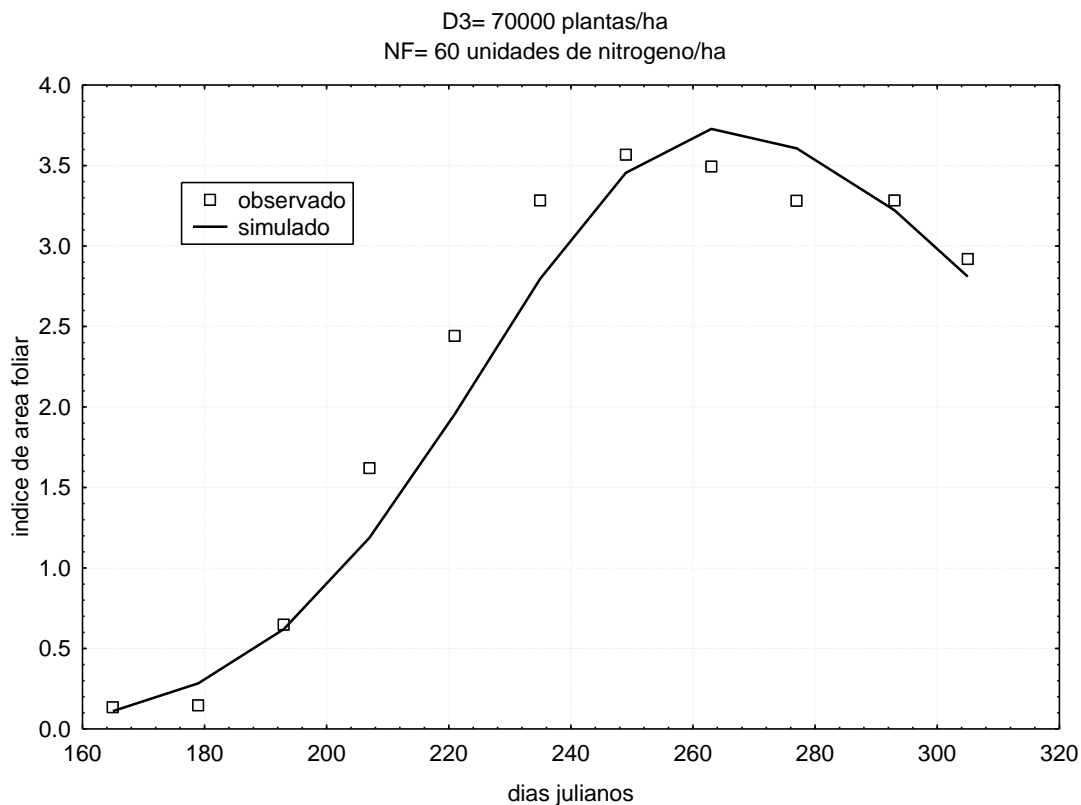


Gráfico 10. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados y observados en un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D3= densidad de población 70000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 60 unidades de nitrógeno/ha.

En el Gráfico 11 se presentan los valores observados y simulados de índice de área foliar (IAF) para una densidad de población de 70000 plantas por hectárea con 120 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico el modelo tuvo buen ajuste siendo coincidentes los datos observados con los simulados al seguir la misma tendencia. Esto se confirma con la prueba de t realizada para datos observados y simulados la cual no presento diferencia estadística significativa NS $p \leq 0.05$ entre valores, para esta densidad de población y nivel de fertilización (ver Cuadro 4). Se observa también que los datos observados superan a los datos simulados del día 200 hasta el 240, luego del 293 a 305 los datos observados son inferiores a los datos simulados.

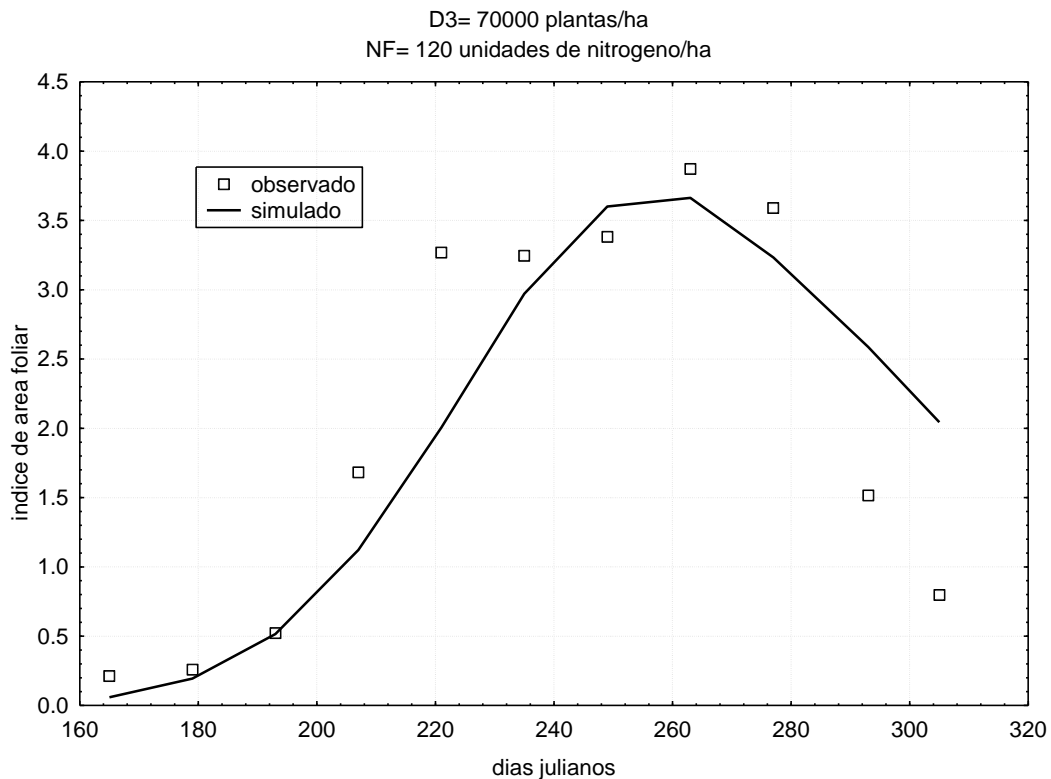


Gráfico 11. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados y observados en un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D3= densidad de población 70000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 120 unidades de nitrógeno/ha.

En el Gráfico 12 se presentan los valores simulados de índice de área foliar (IAF) para una densidad de población de 70000 plantas por hectárea con 00, 60 y 120 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico a medida que aumenta el nivel de fertilización se incrementa el IAF, dado que la planta de maíz responde positivamente a la fertilización nitrogenada, sin embargo con 120 unidades de nitrógeno el IAF decae más rápidamente después del día 260 en tanto que con 00 y 60 se mantiene constante y con valores más altos.

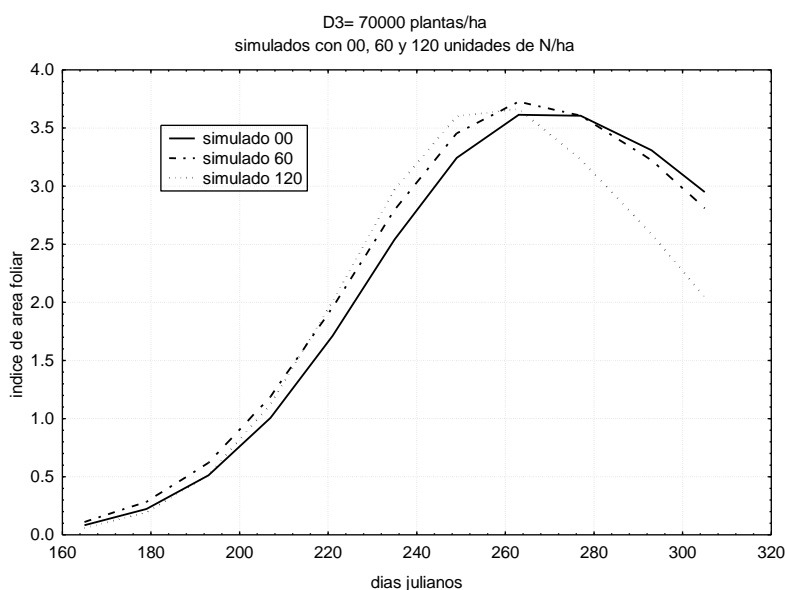


Gráfico 12. Índice de área foliar (IAF) para datos simulados en un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D2= densidad de población 70000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00, 60, y 120 unidades de nitrógeno/ha.

Cuadro 4. Prueba de t para observados y simulados de índice de área foliar (IAF) con 70000 plantas/ha y los tres niveles de fertilización 00, 60, y 120 unidades de nitrógeno/ha NS $p \leq 0.05$. D= densidad de población, NF= nivel de fertilización.

D	NF	PRUEBA DE T PARA OBSERVADOS Y SIMULADOS				
		OBSERVADOS	SIMULADOS	DIFERENCIA	T	P
70,000	0	2.014936	2.072582	-0.057646	-1.01975	0.331882
	60	2.256075	2.161636	0.094438	1.128952	0.285273
	120	2.031844	1.999627	0.032216	0.152212	0.882047

6.1.- Materia Seca Parcial Aérea (MSPA)

En el Gráfico 13 se presentan los valores observados y simulados de materia seca aérea (MSPA) para una densidad de población de 30000 plantas por hectárea con 00 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico el modelo tuvo un buen ajuste siendo parecidos los observados con los simulados al seguir la misma tendencia, esto hasta el día 249. Sin embargo después de este día el modelo sobrestima MSPA quedándose lo observado por debajo de lo simulado, esto es apoyado por la prueba de t realizada para observados y simulados en la cual se encuentra diferencia estadística NS $p \leq 0.05$ para esta densidad de población y nivel de fertilización con una diferencia de -886.930 kg/ha favoreciendo al simulado (ver Cuadro 5).

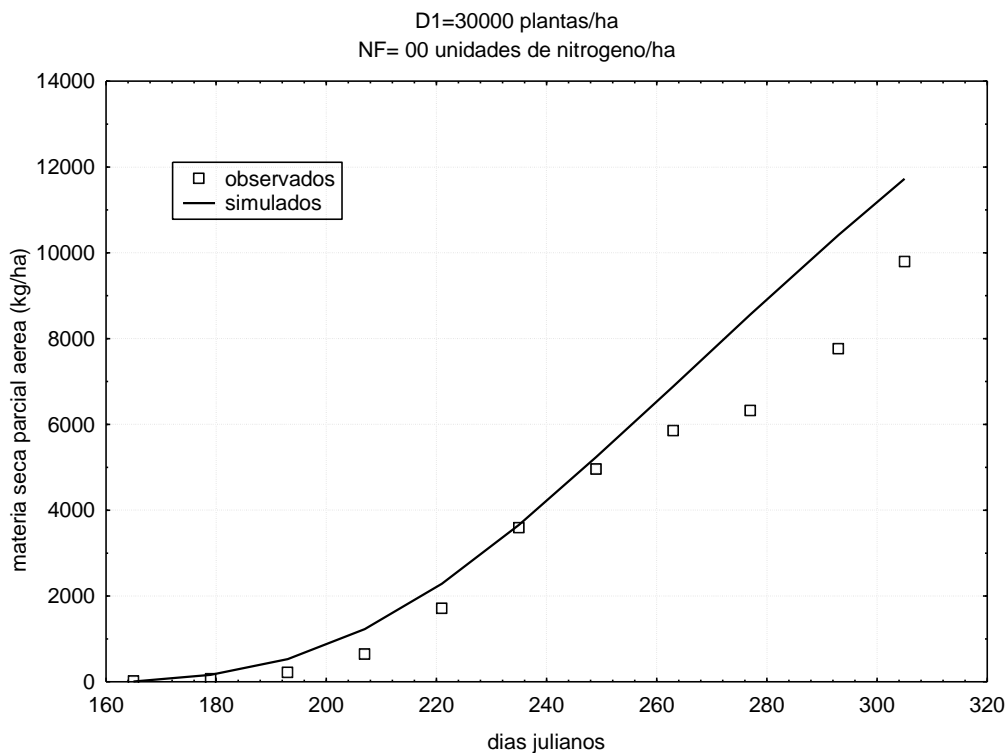


Gráfico 13. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) bajo simulación y observación un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D1= densidad de población 30000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00 unidades de nitrógeno/ha.

En el Gráfico 14 se presentan los valores observados y simulados de materia seca parcial aérea (MSPA) para una densidad de población de 30000 plantas por hectárea con 60 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico, el modelo tuvo un buen ajuste siendo parecidos los observados con los simulados al seguir la misma tendencia. Sin embargo con la prueba de t realizada para observados y simulados se encuentra diferencia estadística para esta densidad de población y nivel de fertilización NS $p \leq 0.05$ con una diferencia de -492.018 kg/ha favoreciendo al simulado (ver Cuadro 5).

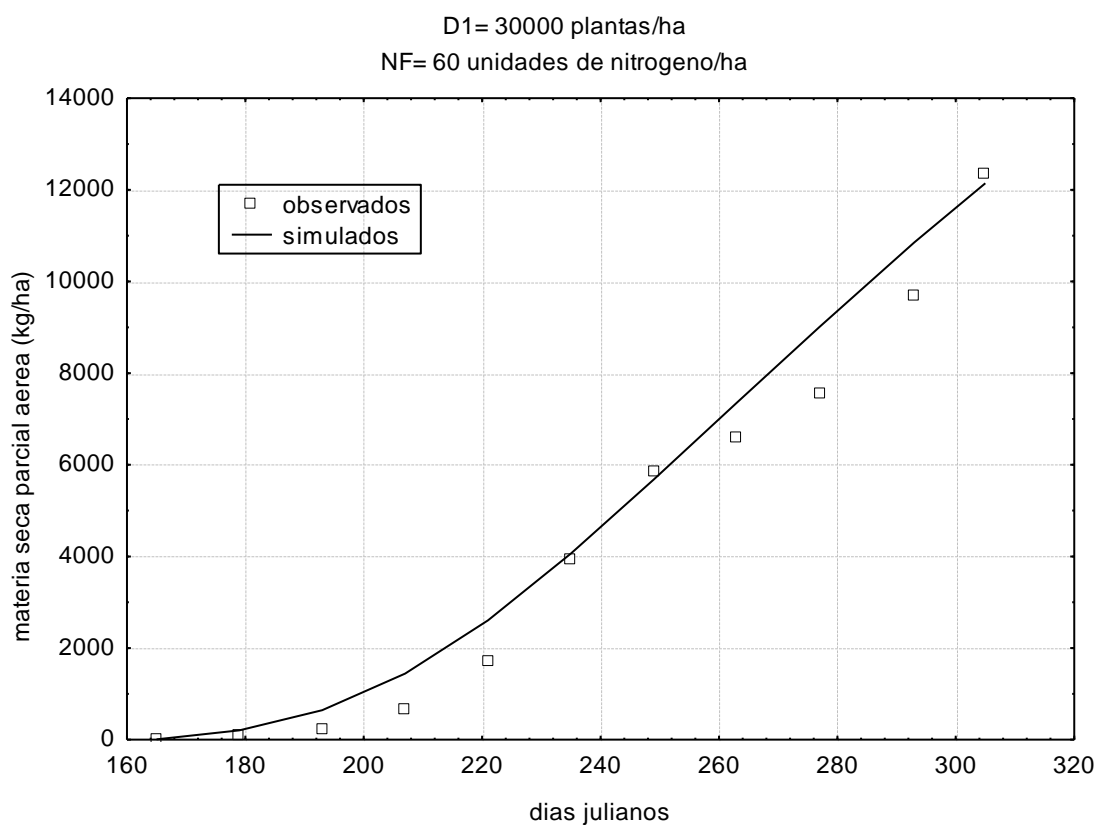


Gráfico 14. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) bajo simulación y observación un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D1= densidad de población 30000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 60 unidades de nitrógeno/ha.

En el Gráfico 15 se presentan los valores observados y simulados de materia seca parcial aérea (MSPA) para una densidad de población de 30000 plantas por hectárea con 120 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico el modelo tuvo un buen ajuste siendo concordantes los observados con los simulados al seguir la misma tendencia, esto se corrobora con la prueba de t realizada para observados y simulados en la que no se encuentra diferencia estadística significativa entre valores NS $p \leq 0.05$ de ambos grupos, para esta densidad de población y nivel de fertilización (ver Cuadro 5).

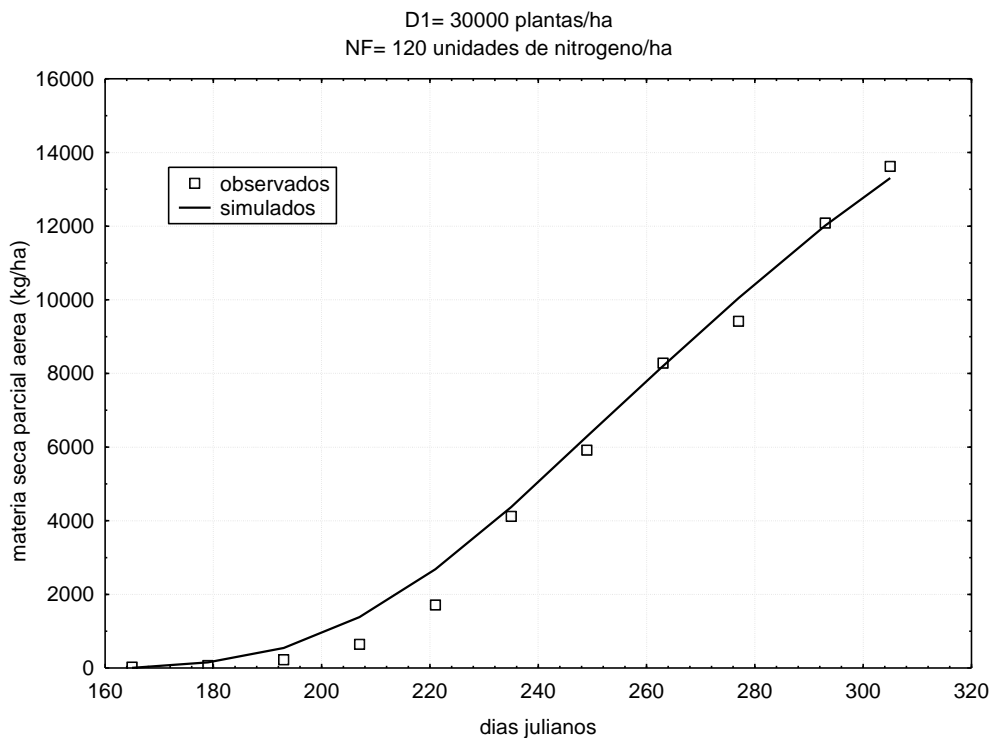


Gráfico 15. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) bajo simulación y observación un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D1= densidad de población 30000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 120 unidades de nitrógeno/ha.

En el Gráfico 16 se presentan los valores simulados de materia seca parcial aérea (MSPA) para una densidad de población de 30000 plantas por hectárea con 00, 60 y 120 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico a medida que aumenta el nivel de fertilización se incrementa la MSPA, dado que la planta de maíz responde positivamente a la fertilización nitrogenada.

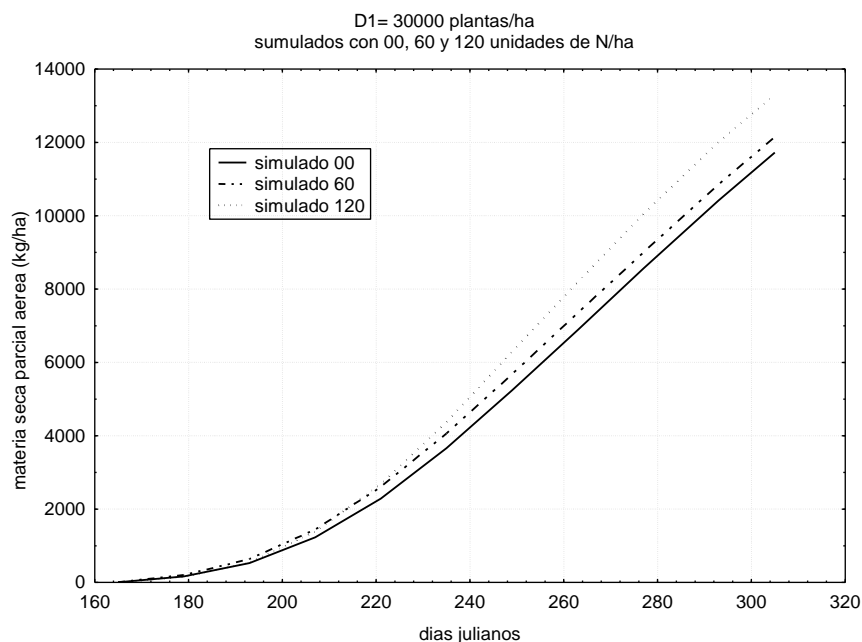


Gráfico 16. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) simulados un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D1= densidad de población 30000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00, 60, y 120.

Cuadro 5. Prueba de t para observados y simulados de materia seca parcial aérea (MSPA) con 30000 plantas/ha y los tres niveles de fertilización 00, 60, y 120 unidades de nitrógeno/ha con NS $p \leq 0.05$. D= densidad de población, NF= nivel de fertilización.

D	NF	PRUEBA DE T PARA OBSERVADOS Y SIMULADOS				
		OBSERVADOS	SIMULADOS	DIFERENCIA	T	P
30,000	0	3723.319	4610.249	-886.930	-3.09635	0.011321
	60	4418.146	4910.163	-492.018	-2.92412	0.015193
	120	5101.429	5362.721	-261.292	-2.19319	0.053049

En el Gráfico 17 se presentan los valores observados y simulados de materia seca parcial aérea (MSPA) para una densidad de población de 50000 plantas por hectárea con 00 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico el modelo tuvo un buen ajuste siendo concordantes los observados con los simulados al seguir la misma tendencia. Esto se corrobora con la prueba de t realizada para observados y simulados en la que no se encuentra diferencia estadística significativa NS $p \leq 0.05$ entre valores, para esta densidad de población y nivel de fertilización (ver Cuadro 6).

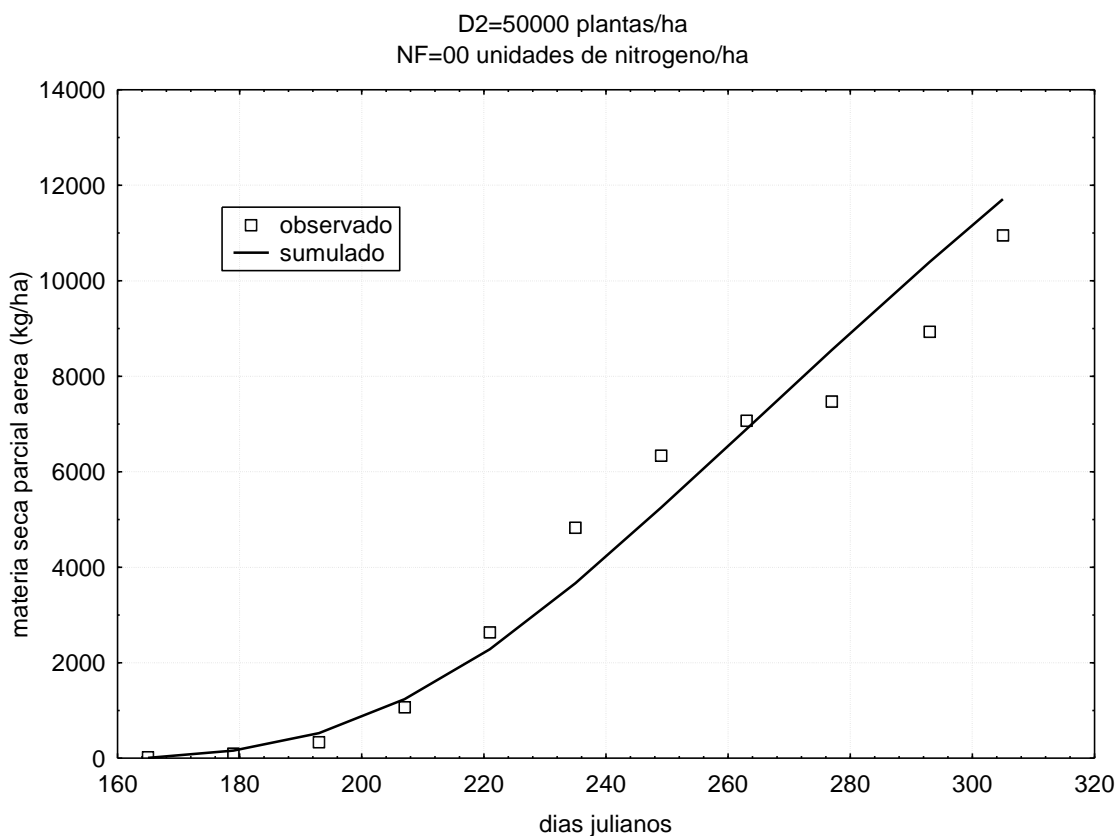


Gráfico 17. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) bajo simulación y observación un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D2= densidad de población, 50000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00 unidades de nitrógeno/ha.

En el Gráfico 18 se presentan los valores observados y simulados de materia seca parcial aérea (MSPA) para una densidad de población de 50000 plantas por hectárea con 60 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico el modelo tuvo un buen ajuste siendo concordantes los observados con los simulados al seguir la misma tendencia. Esto se corrobora con la prueba de t realizada para observados y simulados en la que no se encuentra diferencia estadística significativa NS $p \leq 0.05$ entre valores, para esta densidad de población y nivel de fertilización (ver Cuadro 6).

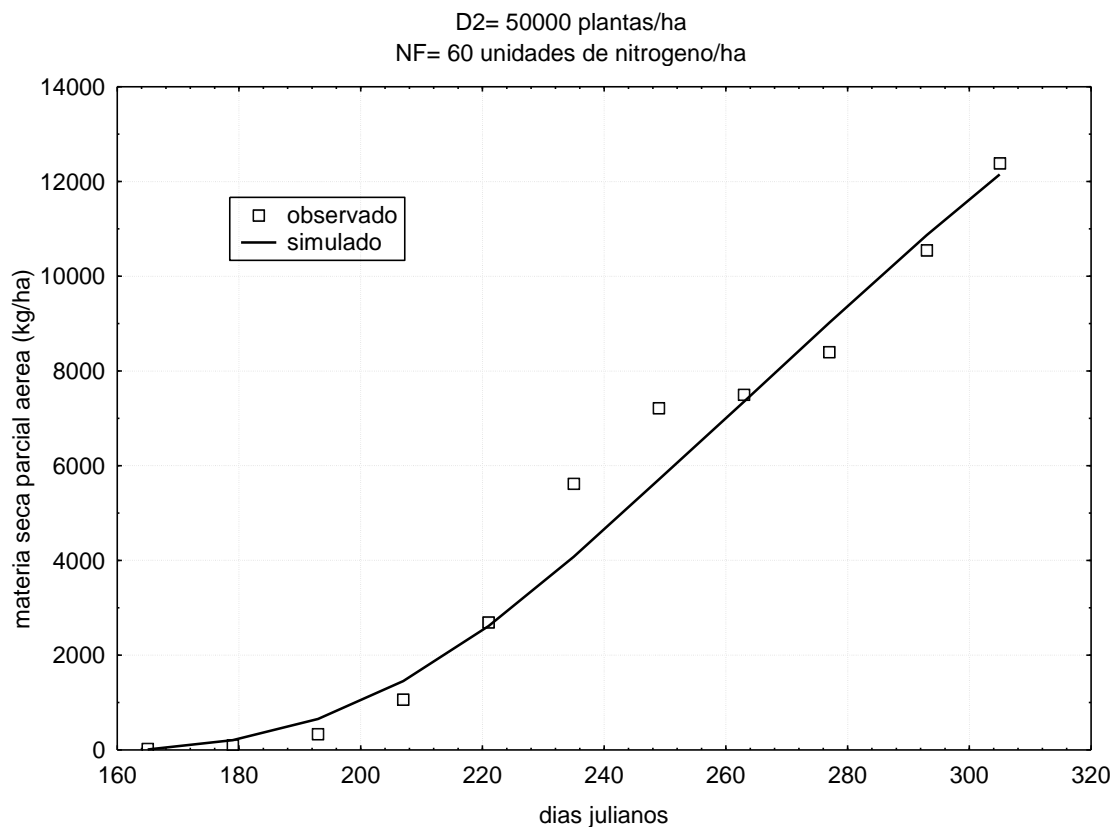


Gráfico 18. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) bajo simulación y observación un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D2= densidad de población, 50000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 60 unidades de nitrógeno/ha.

En el Gráfico 19 se presentan los valores observados y simulados de materia seca parcial aérea (MSPA) para una densidad de población de 50000 plantas por hectárea con 120 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico el modelo tuvo un buen ajuste siendo concordantes los observados con los simulados al seguir la misma tendencia. Esto se corrobora con la prueba de t realizada para observados y simulados donde no se encontró diferencia estadística significativa NS $p \leq 0.05$ entre valores, para esta densidad de población y nivel de fertilización (ver Cuadro 6).

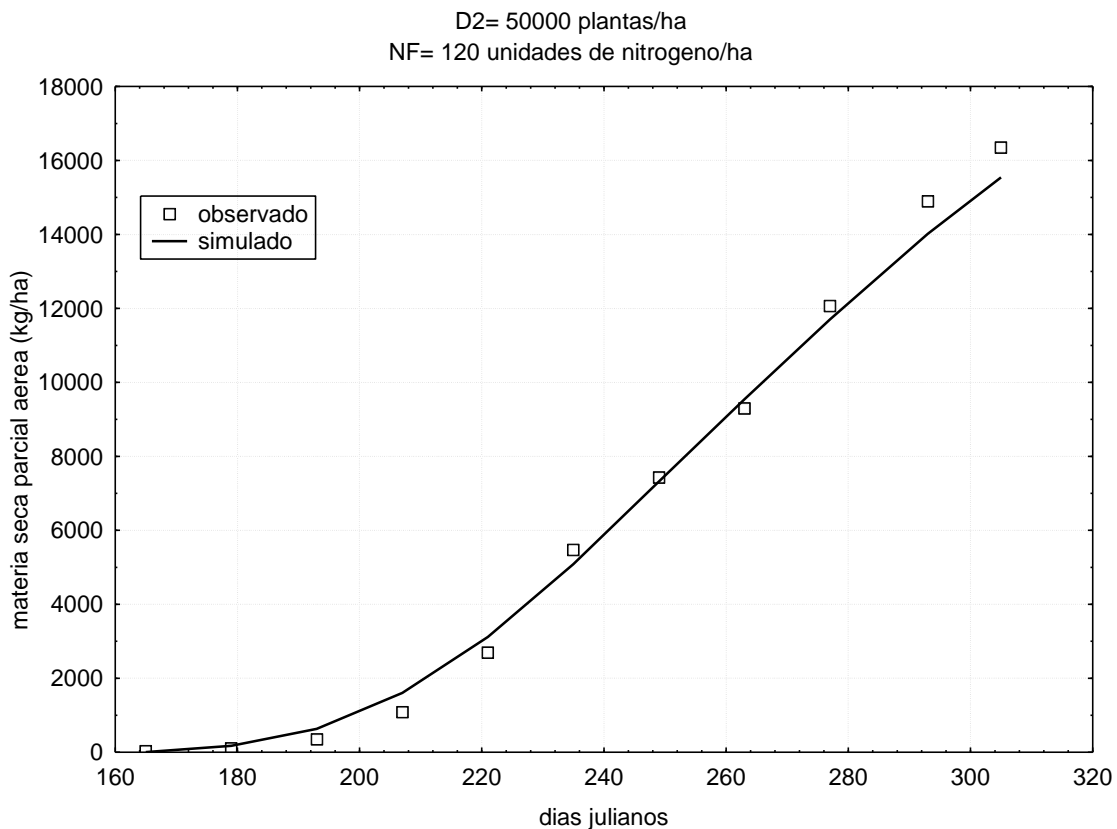


Gráfico 19. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) bajo simulación y observación un cultivo de maíz de la variedad jaguan durante el desarrollo del cultivo. D2= densidad de población, 50000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 120 unidades de nitrógeno/ha.

En el Gráfico 20 se presentan los valores simulados de materia seca parcial aérea (MSPA) para una densidad de población de 50000 plantas por hectárea con 00, 60 y 120 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico a medida que aumenta el nivel de fertilización se incrementa la MSPA, dado que la planta de maíz responde positivamente a la fertilización nitrogenada.

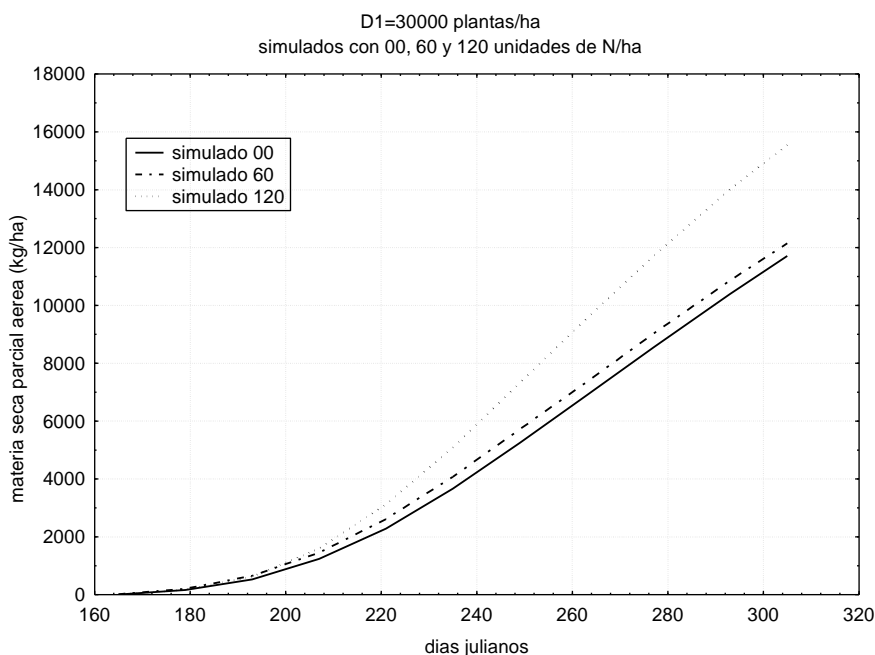


Gráfico 20. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) simulados en un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D2= densidad de población 50000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00, 60, y 120.

Cuadro 6. Prueba de t para observados y simulados de materia seca parcial aérea (MSPA) con 50000 plantas/a y los tres niveles de fertilización 00, 60, y 120 unidades de nitrógeno/ha NS $p \leq 0.05$. D= densidad de población, NF= nivel de fertilización.

D	NF	PRUEBA DE T PARA OBSERVADOS Y SIMULADOS				
		OBSERVADOS	SIMULADOS	DIFERENCIA	T	P
50,000	0	4522.592	4607.407	-84.8149	-0.347109	0.735704
	60	5080.146	4920.323	159.8228	0.736002	0.478638
	120	6343.066	6250.131	92.93478	0.654570	0.527512

En el Gráfico 21 se presentan los valores observados y simulados de materia seca parcial aérea (MSPA) para una densidad de población de 70000 plantas por hectárea con 00 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico, el modelo tuvo un buen ajuste siendo parecidos los observados con los simulados al seguir la misma tendencia, esto se corrobora con la prueba de t realizada para los datos observados y simulados donde no se encontró diferencia estadística significativa NS $p \leq 0.05$ entre valores, para esta densidad de población y nivel de fertilización (ver Cuadro 7).

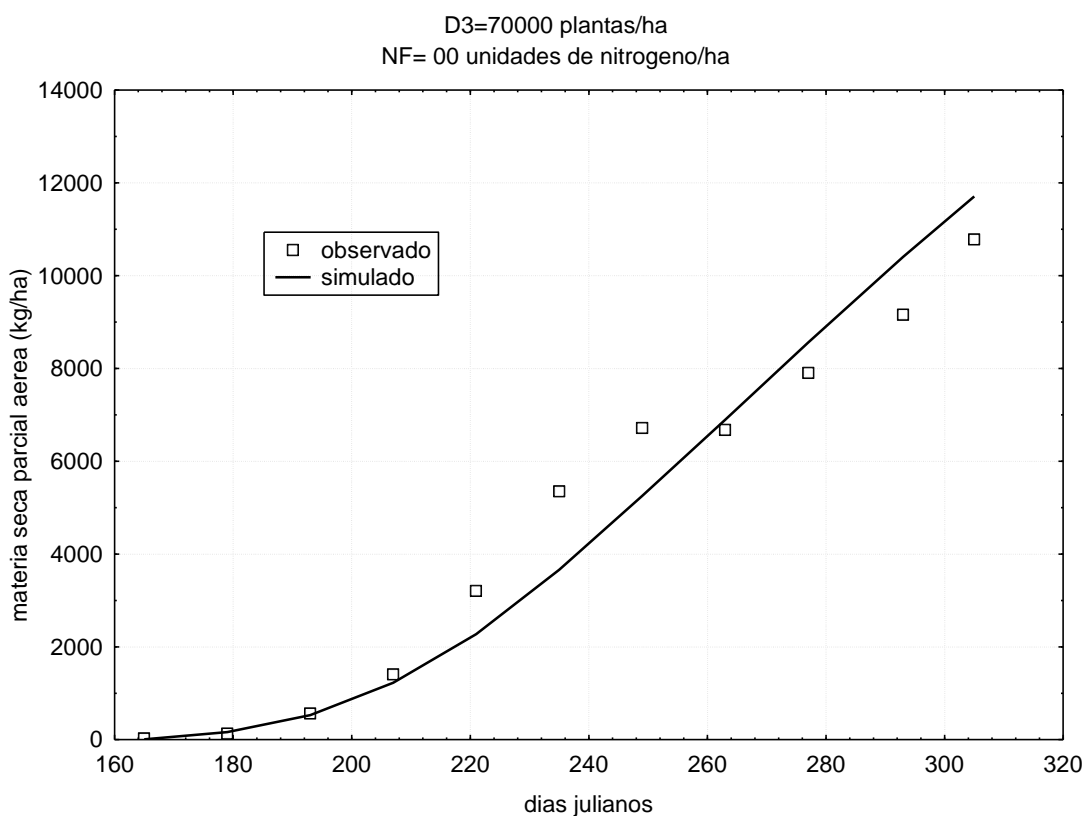


Gráfico 21. Materia Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) bajo simulación y observación un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D3= densidad de población, 70000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00 unidades de nitrógeno/ha.

En el Gráfico 22 se presentan los valores observados y simulados de materia seca parcial aérea (MSPA) para una densidad de población de 70000 plantas por hectárea con 60 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico el modelo tuvo un buen ajuste siendo parecidos los observados con los simulados al seguir la misma tendencia. Esto se corrobora con la prueba de t realizada para observados y simulados donde no se encontró significancia estadística NS $p < 0.05$ entre valores, para esta densidad de población y nivel de fertilización (ver Cuadro 7).

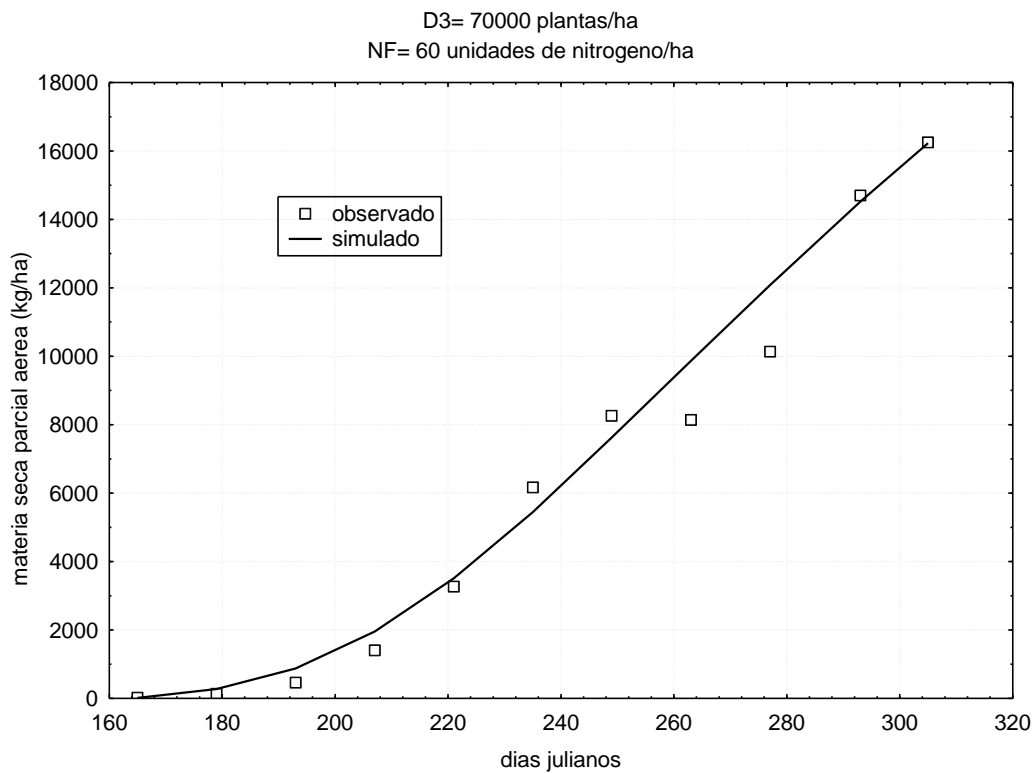


Gráfico 22. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) bajo simulación y observación un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D3= densidad de población, 70000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 60 unidades de nitrógeno/ha.

En el Gráfico 23 se presentan los valores observados y simulados de materia seca parcial aérea (MSPA) para una densidad de población de 70000 plantas por hectárea con 120 unidades de nitrógeno por hectárea. Tal como se observa en el gráfico el modelo tuvo un buen ajuste siendo parecidos los observados con los simulados al seguir la misma tendencia, esto se corrobora con la prueba de t realizada para observados y simulados donde no se encontró diferencia estadística significativa NS $p \leq 0.05$ entre valores, para esta densidad de población y nivel de fertilización (ver Cuadro 7).

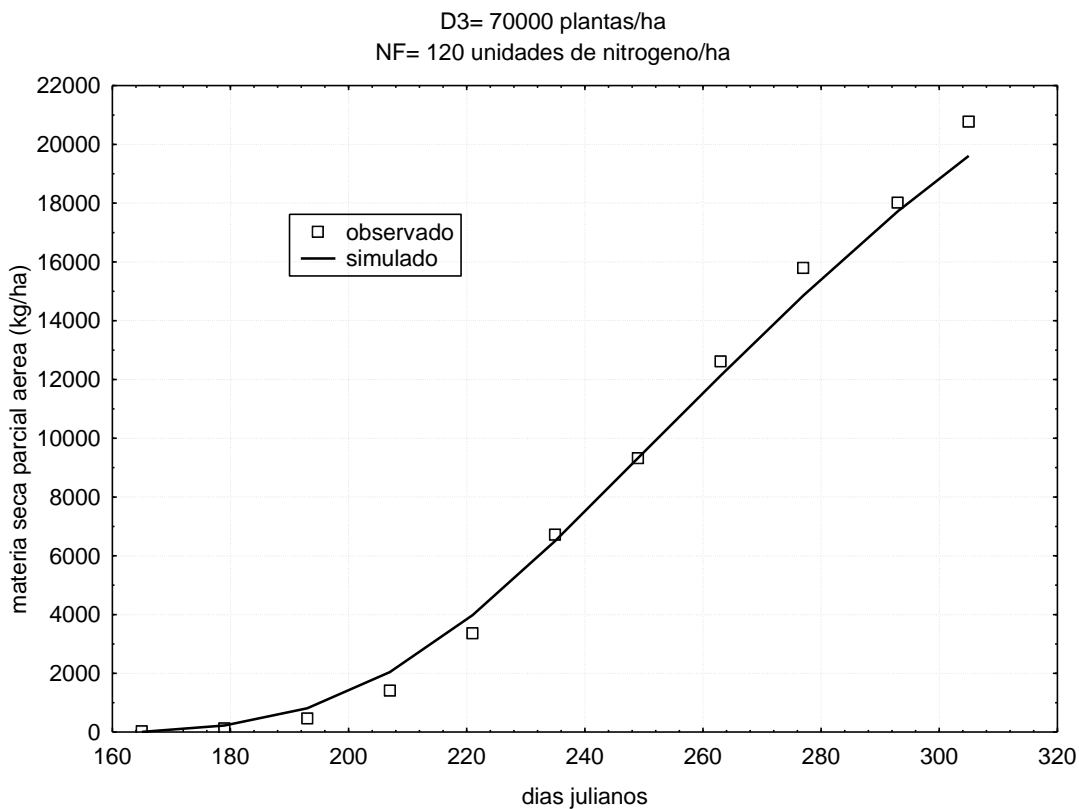


Gráfico 23. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) bajo simulación y observación un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D3= densidad de población, 70000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 120 unidades de nitrógeno/ha.

En el Gráfico 24 se presentan los valores simulados de materia seca parcial aérea (MSPA) para una densidad de población de 70000 plantas por hectárea con 00, 60 y 120 unidades de nitrógeno por hectárea, tal como se observa en el gráfico a medida que aumenta el nivel de fertilización se incrementa la MSPA, dado que la planta de maíz responde positivamente a la fertilización nitrogenada, dando un valor máximo de casi 20 ton/ha con 120 unidades de nitrógeno/ha.

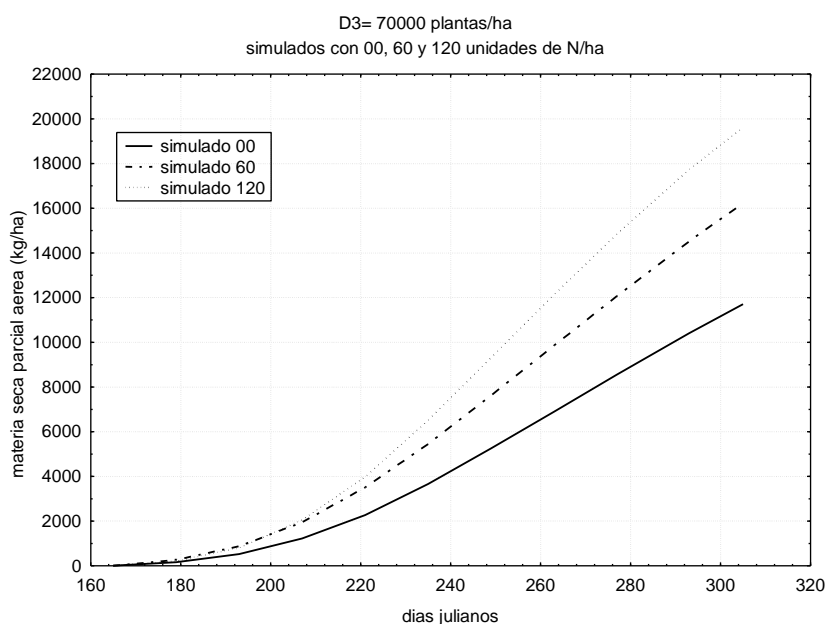


Gráfico 24. Datos de Materia seca parcial aérea (MSPA) simulados en un cultivo de maíz de la variedad Jaguan durante el desarrollo del cultivo. D3= densidad de población 70000 plantas/ha, NF= nivel de fertilización 00, 60, y 120.

Cuadro 7. Prueba de t para observados y simulados de materia seca parcial aérea (MSPA) con 70000 plantas/a y los tres niveles de fertilización 00, 60, y 120 unidades de nitrógeno/ha NS $p \leq 0.05$. D= densidad de población, NF= nivel de fertilización.

D	NF	PRUEBA DE T PARA OBSERVADOS Y SIMULADOS				
		OBSERVADOS	SIMULADOS	DIFERENCIA	T	P
70,000	0	4718.501	4607.908	110.5927	0.393774	0.702013
	60	6269.476	6579.738	-310.262	-1.21541	0.252125
	120	8056.975	7929.413	127.5618	0.733383	0.480165

VII.- CONCLUSIONES

De acuerdo con los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación en la simulación, el modelo fue realizado satisfactoriamente bajo las condiciones establecidas en el mismo.

Los resultados obtenidos permiten concluir que para el índice de área foliar IAF lo simulado por el modelo se ajustó satisfactoriamente a los observado con densidades de 50,000 y 70,000 plantas/hectárea y los tres niveles de fertilización en tanto que con 30,000 el modelo sobreestimo IAF.

Los resultados obtenidos permiten concluir que para materia seca parcial aérea MSPA lo simulado por el modelo se ajustó satisfactoriamente a lo observado con densidades de 50,000 y 70,000 plantas/hectárea y los tres niveles de fertilización en tanto que con 30,000 el modelo sobreestimo MSPA.

VIII.- LITERATURA CITADA

- Akira T.; Yamaguchi J.; 1984 Producción de materia seca, componentes del rendimiento y rendimiento del grano en maíz, colegio de graduados tercera edición. PP. 119.
- Aldrich S. R.; Leng E. R.; 1974. Producción ordena del maíz. Ediciones hemisferio sur. Buenos aires argentina.
- Andrade H. F.; 1992. Radiación y temperatura determinan los rendimientos máximos del maíz. Secretaria de agricultura, ganadería y pesca. Instituto nacional de tecnología agrícola. Estación experimental agropecuaria. Boletín 106. Balace buenos aires argentina.
- Andrade, H. F.; Frugone, M.I. 1993. Intercepted radiation at flowering and kernel number in maize: shade vs. Plant density effects. *Crop Science*, 33:482-485.
- Arcil J. 1995. Dinámica de Sistemas. 1ª Edición Editorial Graficas Marte S.A Madrid España.
- Benoit G. R.; Hasfield A. L.; Reglad J. L.; 1965. The growth an yield of corn III. Soil moisture effects. *Agronomy journal*. 57:223-226.
- Bondeau, A., Kicklighter, D.W., Kaduk, J. 1999. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): importance of vegetation structure on seasonal NPP estimates. *Global Change Biology* 5:35-45.
- Boelman, N.T., Stieglitz, M., Griffin, K.L., Shaver, G.R. 2005. Inter-annual variability of NDVI in response to long-term warming and fertilization in wet sedge and tussock tundra. *Oecologia* 143:588-597.
- Bradley, R.G. and Crout, N.M.J. 1994. The Parch Model for predicting Arable Resource Capture in Hostile Environments. University of Nottingham 139 p.
- Brown, H.E; D.J Moot; and E.I. Teixeira, 2006. Radiation use efficiency and biomass partitioning of Lucerne (*Medicago sativa*) in a temperate climate. *European journal of Agronomy* .en línea. 56 (4). pp:319- 390,2006.
- Carrillo S., J.A. 2000. An examination of the prediction of yield from two potato models.PhD. Thesis. University of Nottingham.

- Cavigilia O.P.; Sadars V.O.; 2001. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water and radiation use efficiency of wheat. *Field Crops Research* 69:259-266.
- Cavigilia O.P.; Sadars V.O.; Andrade F.H.; 2004. Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas. I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double cropped wheatsoybean. *Field Crops Research* 87:117-129.
- Cazanga S. R. R.; 1991. Modelo climático de simulación de la productividad de trigo. Tesis de licenciatura de ing agrónomo, universidad de chile, facultad de ciencias agrarias, veterinarias y forestales. Santiago de chile. Pp 112.
- Coligado M. C.; Brown D. M.; 1975. A bio-photo termal model to predict tassel initiation time in corn (zea mays L.) agric. *Meteorology* 15: 6-13
- Coligado M. C.; Brown D. M.; 1975. Respense of corn (zea mays L.) in the pree tassel initiation period to temperature and photoperiod agric. *Meteorology* 14: 357-367.
- Collino, D.J.; J. L. Dardanelli; M. J.; De Luca and R.W. Racca. 2005. Temperature and water availability effects on radiation and water use efficiencies in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Aust. J. Exp. Agric.* 45: 383-390.
- Cooper P. J. M.; Gregory P.J.; Tully D.; Harris H. C.;1987. Improving water use efficiency of annual crops in the rainfed farming systems of West Asia and North Africa. *Experimental Agriculture* 23:113-158.
- Crofts C. F.; Jackson D.L.; Martin D.M.; Patrick J.C. 1971. Los vegetales y sus cosechas. *Fundamentos de agricultura moderna*. Segunda edición Aedos, Barcelona, España.
- Crowley T. J.; North G. R.; 1988. Abrupt Climate Change and Extinction Events in Earth History. *Science* 240(4855): 996-1002.
- D'ANTUONO, L. F.; ROSSINI, F. (1995). Experimental estimation of linseed (*Linum usitatissimum* L.) crop parameters. *Industrial Crops and Products*. 3: 261-271.
- Domenech J.L.; J. Mateu Mahiques 2004. Teoría del medio ambiente: modelización, castellano de la plana universidad de jaune. Pp 57-60
- Doorembos S.; Kassam A. H.; 1979. Yield response to water. *F.A Irrig. Drain. Paper*. 33:1-193

- Drew D.R.; 1995. *Dinámica de Sistemas Aplicada*. 1ª Edición Editorial Graficas Marte S.A Madrid España.
- DSSAT 2011. *Crop Models for Low-Input Agricultural Systems Using a Soil Organic*
- Duncan W. G.; Shaver D.L.; Williams W. A.; 1993. Insolation and temperature effects on maize growth and yield. *Crop sci.* 13:187-191.
- Eckert D. J.; Hicks D. R.; 1986. Maturity rating systems for corn cooperative extension service. Iowa State University.
- Enrico C.; Pasquele S.; 2005. Pig slurry applications to alfalfa: productivity, solar radiation utilization, N and P removal. *Field Crops Research.* 95 (2-3): 135-155.
- Ferre D. C.; 1980. Canopy Development and Yield Efficiency of Golden Delicious Apple Trees in Four Orchard Management Systems. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 105(3): pp. 376-380.
- Fisher K. S.; Palmer F. E.; 1984. Tropical maize in P. R. Glodwarthy and N. M. Fisher the physiology of tropical field crops. Wiley pp. 213-248.
- Forján H., 2003. Los modelos de simulación de crecimiento y desarrollo de los cultivos. *AgroBarrow Digital* N° 27. INTA. Rivadavia 1439 (1033) Buenos Aires, Argentina.
- Francis C. A.; 1971. Influencia del medio ambiente en el crecimiento y desarrollo del maíz. Tópico presentado en la conferencia de los becarios del CIAT noviembre 25. 1971.
- Frey N. M.; 1981. Dry matter accumulation in kernels of maize. *Crop. Science.* 21:118-122.
- Gaedner B. R.; Pearce R. B.; Mitchel R. L.; 1985. *Physiology of crop plants* Iowa State University. Press. USA. 327 pp.
- Garbulsky, M.F., Peñuelas, J., Papale D., Filella, I. 2008. Remote estimation of carbon dioxide uptake of a Mediterranean forest. *Global Change Biology*, doi.:10.1111/j.1365-2486.2008.01684.x
- Gerakis P.; Papacosta T.P.; 1979. Growth dynamics of zea mayz L population differing un genotype and density and grow under illmonance stress, *Ecol. Plant.* 14:2-13

- Gijsman A. J., G. Hoogenboom, W. J. Parton, and P. C. Kerridge. 2002. Modifying DSSAT crop models for low-input agricultural systems using a soil organic matter–residue module from CENTURY. *Agron. J.* 94:462–474.
- Grant W., E. Pedersen y S. Marin. 1997. *Ecology and Natural Resource Management. Systems Analysis and Simulation.* 1ª Edición Editorial John Wiley & Sons, Inc. Texas A&M University, USA.
- Harrel C. 2000. *Simulation: Using Promodel.* McGraw-Hill Companies. USA pp 287.
- Heichel, G.H., Delaney, R.H. and Cralle, H.T. 1988. Carbono asimilación, partición and utilización. En: Hanson, A.A., Barnes, D.K y Hill, R.R. (ed) *Alfalfa and alfalfa improvement.* Agronomy Monograph N° 29, CSSA/SSSA, Madison, WI, (6), p 196-227.
- Hirose T.; Bazzaz F.A.; 1998. Trade-off between light- and nitrogen-use efficiency in canopy photosynthesis. *Annals of Botany.* 82: 195-202.
- Holman, F. 2000. El uso de modelos de simulación como herramienta para la toma de decisiones en la promoción de nuevas alternativas forrajeras. Presentado en la XVI reunión latinoamericana de producción animal (ALPA), Marzo 28-31. Montevideo, Uruguay.
- Hunt R. 1982. *Plant growth curves. The functional approach to plant growth analysis.* Arnold. E. Edit. Great Britain. 247 p.
- Huggins D.R.; Pan W. L.; 1993. Nitrogen efficiency component analysis: an evaluation of cropping systems differences in productivity. *Agronomy Journal* 85:898-905.
- Jackson J.E.; 1980. Light interception and utilization by orchard systems. *Hort. Rev.* 2, pp. 208-67.
- Jeffers J. 1978. *An Introduction to Systems Analysis: With Ecological Applications.* Editorial Eduardo Arnold Publishers. USA.
- Jones, J. W., B. A. Keating, y C. H. Porter. 2001. Approaches to modular model development. *Agricultural Systems.* 70:421–443.
- Kiniry R. J.; Jones J. R.; 1986. *CERES maize: a simulation model of maize growth and development* Texas A & M university press college station tx.

- Keulen H. V. Wolf. J.; 1986. Modeling of agricultural production weather, soil and crop. Simulation monographs. Pudoc. Wageningen.
- Martin, J. F.; Tiller D. R.; 2000. Simulating with Stella. En: Odum T. H and E. C. Odum, 2000. (Eds). Modelling for all scales. Academic Press. San Diego, California. USA. p. 133-149.
- Mayaki W.C.; Teare I.D.; Stone L.R.; 1976. Top and root growth of irrigated and nonirrigated soybeans. Crop. Science 16(1):92-94.
- Newman J. E. Blair B. O.; Dale R. F.; smith L.H.; Stirm W. L.; Schaal L. A., 1969. Growing degree days, a new system of rating crop maturities could help you predict harvest dates more accurately. Cropsoils 20:9-12.
- Odum H. T. 1994. Ecological and General Systems: Introduction to Systems Ecology. 3ª. Edicion, university press of Colorado. USA.
- Odum, T. H y E. C. Odum. 2000. Modelling for all scales. Academic Press. San Diego, California. USA. p. 3-4.
- Oreskes N.; 2004. Beyond the Ivory Tower. The Scientific Consensus on Climate Change. Science 306 (5702): 1686,
- Poponov I.; Aufhamer W.; Kaul H.P.; Ehmele F. P.; 1996. Nitrogen efficiency components of winter cereals. European Journal of Agronomy 5:115-12.
- Ping Y. H., K. M. Zhen, P. Reffye y M. Dingkuhn. 2004. A Dynamic, Architectural Plant Model Simulating Resource-dependent Growth. Annals of Botany. 93:591-602.
- RAE. Real academia española. 1984. Diccionario de la lengua española. Editorial espasa-calpe S.A., Madrid España.
- Ritchie S.; Hanway J.J.; 1982. How a corn plant develops. Iowa state univ. Thecnol. spec. rep. 48 pp.
- Russelle M. P.; Wilhelm W. W.; Olson R.A.; Power J. F.; 1984. Growth analysis based on degree days crop sci 24: 28-32.
- Shannon R.E., 1988, "Simulación de Sistemas. Diseño, desarrollo e implementación", Trillas, México.
- Seicz G.; 1974. Solar radiation in crop canopies. J. Appl. Ecol. 11, pp. 1117-1156.

- Slinclair T.R.; Horie T.; 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation-use efficiency: A review. *Crop Science* 29:90-98.
- Stapper, M., and G. F. Arkin. 1980. CORN. A Dynamic Growth and Development Model for Maize (*Zea mays* L.). Program and Model Documentation no. 80-2. Texas Agric. Exp. Station. USA.
- Tarifa E. E. 2001. Teoría de Modelos y Simulación. Introducción a la Simulación. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Jujuy.
- Tapia C. A.;. 2001. Sistemas, Modelos y Simulación. Facultad de ingeniería de la universidad de buenos aires Argentina.
- Téllez, O. O. S. 1999. Validación del modelo EPIC, para simular el índice de área foliar, acumulación de materia seca nitrogenada y rendimiento de grano en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) bajo diferentes condiciones de humedad en el suelo. Tesis. M. C. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila,
- Thompson J. R.; 1979. An introduction to seed technology. First published. Printed in Great Britain.
- Thornley JHM. 1998. Grassland Dynamics: An ecosystem simulation model CAB International,
- Tollenar M.; 1977. Sink-source relationship during reproductive development in maize. A review *Maydica* 22:49-75.
- Villalpando J. F. I.: 1990. Metodología de investigación en agroclimatología. SARH-INIFAP. Guadalajara Jalisco.
- Vourlitis, G.L., Oechel, W.C., Hope, A., Stow, D., Boynton, B., Verfaillie, J., Zulueta R., Hastings, S.J. 2000. Physiological models for scaling plot measurements of CO₂ flux across an arctic tundra landscape. *Ecological Applications* 10:60-72.
- Waggoner P. E.; 1984. Agriculture and carbon dioxide. *Am. Sci.* 72: 171-184.
- Waring, R.H., Law, B.E., Goulden, M.L., Bassow, S.L., McCreight, R.W., Wofsy S.C., Bazzaz, F.A. 1995. Scaling gross ecosystem production at Harvard forest with remote-sensing - a comparison of estimates from a constrained

quantum-use efficiency model and Eddy-correlation. *Plant Cell and Environment* 18:1201-1213.

Warrington I. J.; Kanemasu E. T.; 1983. Corn growth response to temperature and photoperiod I. seedling emergence tassel initiation and anthesis. *Agronomy journal*. 75:749-754.

Whisler F. D.; Acock D. N.; Baker R. E.; Fye H. F.; Hodges J.R.; Lambert H. E.; Lemmon j. m.; Reddy V. R.; 1986. Crop simulation model in agronomy systems. *Adv. Agron.* 40:141-208.

Willey R.W.; Heath S.B.; 1969. The quantitative relationships between plant population and crop. *Advances in Agronomy*, 21:291-321.

Wunshe J.; Lakso A.; Robinson T.; Lenz F.; Dennings S.; 1996. The Basis of Productivity in Apple Production Systems: The role of light interception by different shoot types. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 121(5): pp. 886-893.

Yuren C. M. T.; 1986. *Leyes y teorías de modelos*, editorial trillas, sexta reimpresión. Pp 53-70.

(www.sagarpa.gob.mx, 2011)

(www.fao.org, 2011)

(www.icasa.net, 2011)