
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

**CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y
AGROPECUARIAS
DIVISIÓN DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

COORDINACIÓN DE POSGRADO



**Modelación del índice de área foliar y su relación
con el rendimiento, en función del arreglo espacial
de plantas en el cultivo de maíz.**

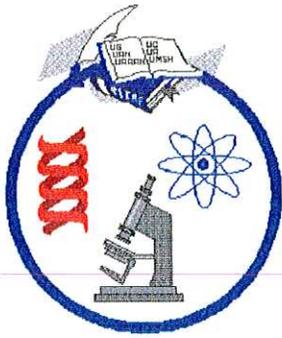
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS Y FORESTALES

PRESENTA:
CARLOS ALBERTO TINOCO ALFARO

DIRECTOR DE TESIS:
DR. ALFONSO RAMÍREZ FONSECA

ZAPOCAN, JAL., ENERO DE 2006



POSGRADO INTERINSTITUCIONAL
EN CIENCIAS AGRICOLAS Y
FORESTALES
PICAF

Esta tesis titulada "**Modelación del índice de área foliar y su relación con el rendimiento, en función del arreglo espacial de plantas en el cultivo de maíz**" fue realizada bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para la obtención del grado de:



UAA



UAAAN



UdeC



UdeG



UMSNH



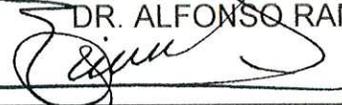
UAN

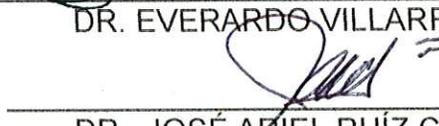
DOCTOR

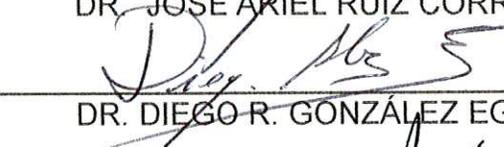
EN CIENCIAS AGRÍCOLAS Y FORESTALES

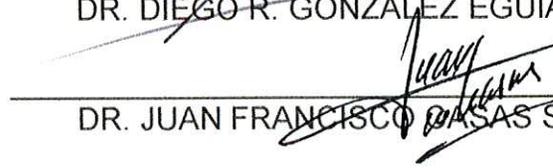
CONSEJO PARTICULAR

TUTOR:  _____
DR. ALFONSO RAMÍREZ FONSECA

ASESOR:  _____
DR. EVERARDO VILLARREAL FARIÁS

ASESOR:  _____
DR. JOSÉ ARIEL RUÍZ CORRAL

ASESOR:  _____
DR. DIEGO R. GONZÁLEZ EGUIARTE

ASESOR:  _____
DR. JUAN FRANCISCO CASAS SALAS

AGRADECIMIENTOS

Al Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de la Universidad de Guadalajara como uno de los principales integrantes del posgrado interinstitucional en Ciencias Agrícolas y Forestales (PICAF). Por brindarme la oportunidad de ingresar y realizar mis estudios.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales agrícolas y Pecuarias por permitirme desarrollarme profesionalmente e impulsarme en realizar estudios de posgrado.

Al Doctor Alfonso Ramírez Fonseca, por su participación entusiasta como director de esta tesis, ya que con sus atinadas observaciones y comentarios facilitó la culminación de la misma. Reconozco y admiro su desempeño como un excelente investigador y agradezco además su compañerismo y gran amistad brindada a lo largo de los años de conocerlo.

Al Doctor Everardo Villarreal Farías por impulsarme en la realización de mis estudios de posgrado, la amplia disponibilidad de su tiempo dedicado en la dirección de esta tesis y sobre todo por participar en mi formación profesional y ser un ejemplo de capacidad intelectual, vocación de servicio, constancia y perseverancia por mejorar con sus ideas y conocimientos la situación del sector agropecuario de México.

Al Doctor José Ariel Ruiz Corral, por su apoyo y atinadas sugerencias en la realización de esta tesis y también por transmitirme conocimientos importantes de su especialidad, que en gran medida sirvieron para sustentar el trabajo de

investigación. Aún con el poco tiempo de conocerlo, reconozco su amplia capacidad como investigador y a un excelente compañero de trabajo.

A todos los maestros de la CUCBA de la U de G, que me brindaron la oportunidad de cursar su materias y en especial al Doctor Diego González Eguiarte, por darme las primeras sugerencias en la elaboración del protocolo de esta tesis.

A la Sra. Ana María Sánchez Herrera, quien sin su apoyo incondicional, sus valiosas sugerencias su motivación y sobre todo su gran amistad, hubiera sido imposible para mi haber terminado mis estudios y esta tesis. No hay palabras para agradecer y recocer su gran calidad humana.

Al MC. Luis Carlos Alvarado Gómez y la Ing. Elsa Suriano Tadeo, por su gran amistad y por participar con sus amplios conocimientos, tiempo y motivación en la realización de esta tesis, creo que juntos hicimos un excelente equipo de trabajo que nos permitió un aprendizaje sin igual.

A mis compañeros de trabajo: MC.. Maximino Romero Figueroa, Juana Limón Francisco, Ángel Rodríguez González, Ángel García Morales, Juan Aguirre Ramírez, Lucindo Garduza León, Marino Gutiérrez Moreno , por su amistad y participar conmigo en los actividades de investigación del sur de Veracruz.

A mis compañeros del Campo Experimental Papaloapan: Ing. Daniel E. Uriza Ávila, Dr. Francisco Enríquez Quiroz, MC Laureano Rebolledo Martínez, MC. Andrés Zambada Martínez, Dr. Néstor Francisco Nicolás, Dr. Rigoberto Zetina Lezama, MC. Javier Cumpian Gutiérrez, Contador Merced Vázquez Ortiz y Elisa Pintado H.

A mis compañeros docentes de la FISPA-UV, al MVZ Antonio Fernández Figueroa y al Mc. Alejandro Retureta A. por su amistad, apoyo e impulso que siempre me brindaron en la realización de esta tesis.

A los productores experimentadores de la colonia Hidalgo, Agrícola Michapan y Boca del Río, por su amistad y por ser ellos quien a través de su trabajo participativo dieron la idea principal para le realización de esta tesis.

A mis grandes amigos del grupo INIFAP-MASECA: Sergio De Carlo Guzmán, Jaime Macias Cervantes, José Luis Mendoza Robles, Flavio Rodríguez Montalvo, Alfonso Ramírez Fonseca Roberto Valdivia Bernal, Valerio Palacios Corona y Guillermo Aguilar Castillo, con quienes compartí grandes experiencias profesionales. Así mismo quiero dar un agradecimiento especial a Juan Ángel Quijano Carranza, Roberto Paredes Melesio Y Everardo Villarreal Farías, quienes con su amistad, calidad humana y liderazgo le dieron una gran solidez a este grupo de trabajo.

Al Dr. Heriberto Román Ponce y Dr. Sergio Uribe Gómez, por su amistad y su impulso para culminar esta tesis.

A mis amigos: Joel Tamez Tamez y Nancy Domínguez por su amistad de muchos años y con los que siempre he contado en todo momento.

DEDICATORIAS

A Dios. Por darnos amor, fortaleza, salud, unión familiar y guiarnos por caminos correctos a cada uno de los integrantes de toda mi familia y permitirme lograr lo que siempre he deseado tanto en lo personal como lo profesional.

A mi madre Leonor Alfaro Vélez. Por su gran amor y preocupación de toda la vida porque todos sus hijos saliéramos adelante y estuviéramos siempre unidos para apoyarnos y consolidar una gran familia, de la cual ella se que esta sumamente orgullosa.

A mi padre Guadalupe Tinoco Gutiérrez. por heredarme ese interés por el campo e involucrarme con el maíz a través de pequeñas vivencias de mi infancia.

A mis hijos Juan Pablo y Jesús Carlos. Por todo el amor incondicional que siempre me dan, por ser unos hijos excelentes, inteligentes y muy buenos conmigo y toda la familia, estoy muy orgulloso de ustedes y los quiero mucho. Esta tesis y todos mis logros son suyos por ser una de mis grandes motivaciones y por apoyarme directamente en la elaboración de esta tesis, por su preocupación, el ánimo y las porras que me daban para terminarla.

A mi hermana J. Esther. Por querernos a todos sus hermanos, por preocupase demasiado en apoyarnos para resolver nuestros problemas, por buscar en todo momento que sus ratos felices sean con nosotros y por dar todo su amor incondicionalmente a todos los que la rodeamos y queremos. Hermana gracias por todo el amor que siempre me has dado.

A mi Hermano Jaime. Por ser mi compañero y amigo de trabajo en la infancia, por haberme cuidado en esos momentos de odisea mercantil, pero sobre todo por ser siempre el gran respaldo de toda la familia, a la cual le has dado la confianza y seguridad con tu presencia y tus acciones, estoy muy orgulloso de ser tu hermano.

A mi hermano Laurita. Por haber aportado en su momento toda la ternura y paciencia en la familia y porque donde te encuentres, se que nos sigues queriendo y cuidando.

A mi hermano Joel. Por ese carácter alegre que nos contagia a toda la familia y por ser una persona que siempre nos ha apoyado y dado excelentes consejos a todos.

A mi hermano Leobardo. Por ser un gran ser humano, siempre con una motivación alta por salir adelante y por enseñarnos con tu bondad todo lo bueno que hay en ti.

A mi hermana Maribel. Porque aunque eres la más pequeña de la familia, eres para mi, la más aventada, admiro tu valentía por salir adelante en la vida y te quiero mucho por estar al pendiente de lo que nos pasa y con pocas palabras alentarnos a no preocuparnos.

A mis sobrinos: Hiraam, David, Adrián, Laurita, Vanesa, Andrea y Paola, por ser la alegría y los ángeles de la familia y también a un angelito que nos dejó mucho amor y siempre esta en nuestro corazón (Dieguito).

A mis cuñadas y cuñado: Bertha, Claudia, Marisela y Carlos, por haber decidido integrarse a nuestra familia, pero sobre todo por formar una nueva familia con mis hermanos y mostrarme siempre su cariño sincero.

A mis tías. Florencia y Francisca por su gran apoyo en la realización de mis estudios, ya que con su cariño e impulso incondicional me ayudaron a cumplir con mis aspiraciones de educación. Así mismo dedico esta tesis a mi tía Margarita, Pilar, Esther y Amanda. A mis tíos Rodrigo, Daniel, Javier Y Marcelo, Así como a la memoria de mi abuelita Guadalupe y Pilar.

CONTENIDO	Página
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE CUADROS	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	4
Objetivos específicos	4
HIPÓTESIS	5
2. REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1. Fundamentos teóricos de sistemas y modelos	6
2.2. Contribución de los modelos en la agricultura	7
2.3. Etapas de crecimiento del cultivo de maíz	8
2.3.1. Crecimiento y desarrollo	8
2.4. Fotosíntesis	12
2.4.1. Patrón fotosintético del maíz	13
2.5. Radiación	13
2.6. Índice de área foliar (IAF)	15
2.6.1. Métodos para estimar el área foliar en maíz	16
2.6.2. El IAF en función de híbridos, distancia de siembra y niveles de nitrógeno	17

	Página
2.6.3. Senescencia de hojas	18
2.6.4. El IAF y rendimiento	19
2.7. Modelos de simulación dinámica	19
3. MATERIALES Y MÉTODOS	23
3.1. Localización del experimento	23
3.2. Clima	23
3.3. Suelos	23
3.4. Diseño experimental	23
3.5. Tratamientos	24
3.6. Siembra	25
3.7. Descripción de los híbridos utilizados	25
3.8. Conceptualización del modulo de intercepción de luz del modelo MSPC	25
3.9. Posible estructura del modulo de intercepción de luz a partir de una nueva estrategia para estimar el índice de área foliar.	27
3.10. Variables evaluadas	28
3.10.1. Área foliar	28
3.10.2. Índice de área foliar	28
3.10.3. Rendimiento de grano	28
3.10.4. Condiciones climáticas	29
3.10.4.1. Determinación de las unidades calor	29
3.10.4.1.1. Determinación de la edad fisiológica	29

	Página
3.11. Estrategia metodológica para encontrar el mejor modelo de IAF	30
3.12. Validación del modelo generado	30
3.13. Estrategia para encontrar el modelo que prediga el rendimiento en función del IAF estimado en floración	31
3.14. Análisis estadísticos	32
3.14.1. Variable de IAF	32
3.14.2. Rendimiento	32
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
4.1. Precipitación durante los tres años de estudio	33
4.2. Temperatura promedio decenal	33
4.3. Caracterización fenológica de los genotipos evaluados	34
4.4. Comportamiento del índice de área foliar (IAF)	35
4.4.1. Genotipos	35
4.4.2. Distancia entre plantas	35
4.4.3. Distancia entre surcos	36
4.4.4. Interacción distancia entre surcos por distancia entre plantas	38
4.5. IAF promedio por genotipo y número de plantas por mata en los tres años	38
4.6. Modelación del IAF para cada uno de los muestreos en los tres años de estudio	39
4.6.1. Año de 1999	39
4.6.2. Año 2000	40
4.6.3. Año 2001	41

	Página
4.7. Modelos de IAF en edad fisiológica (0.5) y floración (1.0)	42
4.8. Modelos anuales y de los tres años, que explican el IAF en función de la densidad de población	44
4.9. Validación del modelo que explica el IAF, con datos del año 2005, de 22 parcelas de productores del sur de Veracruz	45
4.10. Modelos del índice de área foliar sobre rendimiento en los tres años de estudio	46
4.11. Efecto del índice del área foliar sobre el rendimiento 1999	47
4.12. Efecto del índice del área foliar sobre el rendimiento en el año 2000	48
4.13. Efecto del índice del área foliar sobre el rendimiento 2001	48
4.14. Efecto del índice del área foliar sobre el rendimiento con los datos de los tres años	49
4.15. Comportamiento del rendimiento durante los tres años de estudio	50
4.16. Los híbridos y su relación con el rendimiento	50
4.17. Las distancias entre surcos y su relación con el rendimiento	51
4.18. Las interacciones entre híbridos y distancias entre surcos sobre el rendimiento	51
4.19. Las distancias entre plantas y su relación con el rendimiento	53
4.19.1. Distancia de plantas	53
4.20. Las interacciones entre híbridos y distancias entre plantas en el rendimiento	54
4.20.1. Interacción híbrido y distancia de plantas (2000)	54
4.21. Las interacciones entre distancias entre surcos y distancias entre plantas en el rendimiento	55
4.21.1. Interacción distancia de surcos y distancia de plantas (2001)	55
5. CONCLUSIONES	56
6. LITERATURA CITADA	58

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Porcentaje de luz interceptada a través del índice de área foliar y comportamiento de la tasa de crecimiento y el peso seco	11
Figura 2.	Modulo de intercepción de luz del modelo de simulación MSPC	26
Figura 3.	Diagrama la posible nueva estructura del modulo de intercepción de luz.	27
Figura 4.	Distribución y volumen de la precipitación pluvial registrada durante el ciclo de cultivo en los tres años de estudio.	33
Figura 5.	Comportamiento de la temperatura promedio decenal durante el ciclo de cultivo de 1999 a 2001.	34
Figura 6.	Interacción de la distancia entre surcos por distancia entre plantas	38
Figura 7.	IAF en una y dos plantas a la misma densidad en dos genotipos	39
Figura 8.	Comportamiento del IAF con los modelos generados para la edad fisiológica (0.5).	43
Figura 9.	Comportamiento del IAF con los modelos generados para la edad fisiológica (1.0).	43
Figura 10.	Relación entre el índice de área foliar y la densidad de población	45
Figura 11.	Validación del modelo IAF con datos del 2005 de 22 parcelas de productores del Sur de Veracruz.	46
Figura 12.	Relación del índice de área foliar sobre el rendimiento obtenido durante 1999, en Acayucan, Ver.	47

	Página
Figura 13. Relación del índice de área foliar sobre el rendimiento durante el año 2000, en Acayucan Ver.	48
Figura 14. Relación del índice de área foliar sobre el rendimiento durante el año 2001, en Acayucan Ver.	49
Figura 15. Relación del índice de área foliar sobre el rendimiento en los tres años de estudio.	49
Figura 16. Comportamiento productivo de maíz, en la interacción entre híbridos y distancia de surcos durante 1999, en la localidad de Acayucan Ver.	52
Figura 17. Comportamiento productivo de maíz, en la interacción entre híbridos y distancia de surcos durante el año 2000, en la localidad de Acayucan Ver.	53
Figura 18. Interacción entre híbridos y distancia de plantas. Acayucan, Ver. 2000.	54
Figura 19. Efectos de la interacción distancia de surcos y distancia entre plantas. Acayucan, Ver. 2001.	55

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Tratamientos evaluados durante los ciclos primavera-verano de los años 1999, 2000 y 2001. Acayucan, Ver.	24
Cuadro 2. Pendiente de la recta para distancias de plantas considerando la edad fisiológica e índice de área foliar en los muestreos previos a floración.	36
Cuadro 3. Pendiente para distancias de surcos considerando la edad fisiológica e índice de área foliar en los muestreos previos a floración.	37
Cuadro 4. Parámetros de los análisis de regresión para cada edad fisiológica de muestreo en 1999.	40
Cuadro 5. Parámetros de los análisis de regresión para cada edad fisiológica fecha de muestreo en el 2000.	41
Cuadro 6. Parámetros de los análisis de regresión para edad fisiológica de muestreo en el 2001.	41
Cuadro 7. Modelos de IAF en función de la densidad de población en edades fisiológicas (0.5) y (1.0).	42
Cuadro 8. Modelo propuesto para definir el comportamiento del IAF con los valores de los tres años.	44
Cuadro 9. Modelos de regresión con los valores del IAF en floración sobre el rendimiento.	47
Cuadro 10. Nivel de significancia para la variable rendimiento, en la evaluación de híbridos, distancias de surcos y de plantas en Acayucan Ver.	50

RESUMEN

En el sur de Veracruz se cultivan 250,000 hectáreas de maíz con un rendimiento potencial de 9 t ha^{-1} ; sin embargo, el promedio regional no supera las 2 t ha^{-1} . Lo anterior se explica por el manejo inadecuado de la densidad de población y el arreglo espacial de plantas, los cuales limitan la producción del cultivo, ya que al actuar por sí solos o en interacción con otros componentes generan fugas de rendimiento de 2 a 3.5 t ha^{-1} . La necesidad de explicar la manera en que ambos factores afectan el crecimiento, desarrollo y producción del maíz, implicó incursionar en el uso de modelos de simulación dinámica, en los cuales no se contempla aún el impacto de las variaciones en la distribución y número de plantas por hectárea. Con el estudio, se buscó aportar una estructura de un modelo determinado, que permitiera predecir con mayor precisión el crecimiento y producción del cultivo, al modelar el índice de área foliar en función de la densidad de población y el arreglo espacial de plantas. El trabajo se realizó Acayucan Veracruz, de 1999 a 2001, bajo un diseño de bloques al azar con arreglo de parcelas subdivididas, manejándose en parcelas grandes a los híbridos H-512 y H-513, en parcelas medianas tres distancias de surcos y en chicas tres distancias de plantas. Las variables estudiadas fueron: a) rendimiento de grano b). Precipitación pluvial y las temperaturas mínimas y máximas c) área foliar semanal de dos y 4 plantas, utilizando el método destructivo, que consistió en medir y multiplicar el ancho y el largo de cada hoja por 0.75, para después hacer la sumatoria del área de todas las hojas de la planta. Con el área muestreada se determinó el índice de área foliar (m^2 de hoja por m^2 de suelo). Con los datos de rendimiento y el índice de área foliar, se realizaron análisis de varianza para determinar la diferencias entre los factores. Así mismo se realizaron análisis de regresión con variables como plantas por metro lineal, distancia entre surcos y entre plantas, para encontrar cual de ellos explicaba el comportamiento del índice de área foliar en la etapa de floración. Los resultados indicaron que no hubo diferencias de índice de área foliar entre genotipos y que los mejores resultados de IAF y rendimiento, se tuvieron con distancias entre surcos de 70 y 80 cm y de 20 a 40 cm entre plantas. Con los datos de IAF de los tres años de estudio y los rendimientos estimados, se generaron dos modelos, el primero fue para explicar el comportamiento del IAF a partir de la densidad de población y el segundo para predecir el rendimiento a partir del IAF.

ABSTRACT

In the south of Veracruz 250.000 hectares of maize with a potential yield of nine tons are cultivated; nevertheless, the regional average don't surpass the two tons by hectare. The density of population and the spacial arrangement of plants are the factors that limit the production of maize, both of them in interaction with others components generate lost of yields of three and half tons by hectare. The necessity to explain the way in which both factors affect the development and yields of the maize, implied to use simulation models; nevertheless, more of them don't considered the impact of the variations in the distribution and number over the leaf area index (LAI). The project looked for to contribute, with a structure that predicted with more accurancy the growth and production of maize throughout the LAI modeling, on the density and the spacial arragement of plants. The work was made in Acayucan Veracruz, from 1999 to 2001, under a design of randomized blocks with adjustment of split plots, handling in great plots two hybrids H-512 y H-513, in medium and small plots three distances of rows (70, 80 y 90cm) and three distances of plants (20, 40 y 60cm). The variables evaluated were: a) grain yield b). Rainfall, low and maximes temperatures c) leaf area in two or four plants, using a destructive method. It consists in meter width for large of leaf for 0.75, and after to do a summatory of all leaves. With the showed leaf area was determinated the leaf area index (m² de hoja por m² de suelo). With the results of yield and leaf area index were made the variance analisis to determinate the estatical significance of the factors. By the way, was made a regression analisis with diferents parameters to look for one of them to explain the behavior of the leaf area index in his florewing fase. The results indicated that there was any differences of LAI in genotypes and the best results were obtained with rows distances of 70 y 80 cm and 20 a 40 cm of plants. With the LAI of three years and the yields, were made a model to explain the behavior of LAI using population density. Other model was making for predicted yield using LAI.

1. INTRODUCCIÓN

En los Distritos de Desarrollo Rural de San Andrés Tuxtla, Jáltipan y las Choapas ubicados en el sur del estado de Veracruz, se cultivan aproximadamente 250,000 hectáreas de maíz que benefician a 80 mil productores y sus familias, el 60 % de dicha superficie es sembrada en temporal en el ciclo de primavera-verano y el resto con humedad residual en el otoño-invierno (SIAP 2004). Un análisis de carácter económico, realizado en la región por la SAGARPA (2005), indicó una severa disminución en la rentabilidad del cultivo de maíz, llegando incluso a presentar pérdidas, al combinar altos costos de los insumos de los insumos con la limitada productividad en los sistemas actuales y el bajo precio al comercializar la materia prima obtenida.

Tinoco (2005), aplicando un modelo de simulación dinámica para rendimiento de maíz, con datos climáticos de las regiones centro y sur del estado y la información sobre eficiencias fisiológicas del cultivo de maíz definidas en esos mismos lugares, encontró que el rendimiento potencial por luz y agua es de nueve y siete toneladas para siembras de temporal y humedad residual respectivamente; sin embargo; el rendimiento promedio actual difícilmente supera las dos toneladas por hectárea.

Por otro lado este autor al realizar un diagnóstico de los sistemas de producción con maíz a fin de identificar o establecer una hipótesis sobre las posibles variables técnicas que más influyen en el bajo aprovechamiento del

potencial disponible, encontró que la densidad de población y el arreglo espacial de plantas actuando individualmente o interaccionando con dosis y épocas de fertilización fueron las de mayor impacto al provocar fugas de rendimiento que alcanzaron las 3.5 t ha^{-1} .

De acuerdo con Monteith (1977), La densidad y el arreglo espacial de plantas, tienen un efecto directo sobre el crecimiento y desarrollo de las mismas, por lo que sugirió como necesario realizar un análisis cuantitativo de ellos, para esto es básico medir el material vegetal presente y la magnitud de asimilación de esa estructura vegetal. La forma de conocer a detalle ambos procesos es a través del análisis del peso de materia seca total por unidad de área y en espacial del índice de área foliar (IAF).

De acuerdo con Watson, 1947, citado por Elings 2000, el IAF definido como los metros cuadrados de hojas por metro cuadrado de suelo es importante debido a las funciones que las hojas tienen en la asimilación de CO_2 e intercepción de la radiación.

En estudios realizados por Van Heemst (1988), Se encontró una relación entre la intensidad relativa de luz y el índice de área foliar acumulado, teniéndose que la luz se extingue exponencialmente en función del incremento del área foliar.

Generar conocimientos que ayuden a explicar la manera en que la densidad de población, el arreglo espacial de plantas y los propios genotipos afectan el

crecimiento y desarrollo del cultivo y en consecuencia, la producción de grano de maíz, implica incursionar en estudios con enfoque de sistemas y una de las herramientas utilizadas para analizar a los sistemas y su evolución en el tiempo son los modelos dinámicos, que son una representación abstracta de la realidad en un lenguaje matemático, éstos han probado que pueden reproducir el comportamiento de los sistemas como un todo, con un grado aceptable de precisión, al predecir lo que pasaría bajo condiciones diversas, de manera que pueden ser utilizados para tomar la mejor decisión a la hora de introducir cambios en los sistemas de producción. En la construcción de los modelos para representar una realidad se debe considerar que estos lo hagan de la forma más simplificada y en donde solo se incluyan las variables o elementos esenciales del sistema, además de establecer la relación entre variables que se convertirán en parámetros $Y = f(X)$. (Aracil, 1997).

El presente estudio tiene como base el trabajo desarrollado por Quijano *et al.*, (1995), quienes iniciaron la construcción de un modelo de simulación del potencial ecológico (MSPEC), capaz de estimar el potencial productivo en función de la disponibilidad de luz, temperatura y de las características fisiológicas del genotipo. Modelo que ha estado mejorándose constantemente en su concepción y estructura con la incorporación de nuevos parámetros, de tal suerte que se ha logrado simular con una mayor precisión el proceso de crecimiento del cultivo de maíz. Es importante mencionar que en el modelo hasta ahora desarrollado, no se contempla la influencia que sobre el mismo representan las variaciones causadas por la distribución y número de plantas por hectárea.

Se considera que al desarrollar un modelo del comportamiento de IAF, además de incorporar y mejorar la estructura del MSPC, se tendrían dos ventajas adicionales, como las de alimentar a otros modelos como el CERES (Jones and Kiniry, 1986), EPIC (Williams *et al.*, 1989), ALMANAC (Kiniry *et al.*, 1992) en los que la información sobre el índice de área foliar es de relevante importancia. Así mismo un uso adicional del modelo de IAF, se relacionaría con actividades de predicción de cosechas (Báez, 2002).

De acuerdo con los antecedentes señalados, se contemplaba en este estudio encontrar los parámetros que mejor definan el proceso de desarrollo del IAF, en función de sus principales componentes como lo son: la densidad de población (DP), la distancia entre surcos, la distancia entre matas y el genotipo.

OBJETIVO GENERAL

Generar un modelo que mejor explique la formación del área foliar en floración, expresado ésta como el índice de área foliar, y la relación existente con el rendimiento, considerando variantes en densidad de población, en función de arreglos espaciales de plantas en el terreno.

Objetivos específicos

- Identificar la o las variables que mejor expliquen la relación que existe con el índice de área foliar a través de un modelo matemático, para usarse con fines predictivos.

- Generar un modelo que explique la expresión del rendimiento en función del índice de área foliar medido en floración.
- Analizar el comportamiento del rendimiento, en función de la distancia entre plantas, surcos y los genotipos evaluados.

HIPÓTESIS

El arreglo espacial diferenciado de plantas en el cultivo de maíz, como componente del IAF y éste a su vez del rendimiento, explican la expresión del mismo y permiten modelar su comportamiento.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Fundamentos teóricos de sistemas y modelos

Para explicar una realidad compleja, la ciencia actual establece la necesidad de trabajar con un enfoque de sistemas. El enfoque de sistemas se maneja en las diversas ciencias, así en ecología se habla de análisis de sistemas, en socioeconomía de dinámica de sistemas, en biología de teoría de sistemas y en la industria de ingeniería de sistemas. Los pasos a seguir en la simulación de sistemas comprende la definición de un problema, definición del plan de estudio, formulación de un modelo matemático, construcción de un programa para computadora para la solución del modelo, validación del modelo y Análisis de resultados (Aracil 1997).

Un modelo es la representación abstracta de la realidad, definida esta como un sistema y su veracidad estará en función del grado de certeza con que conceptualice al sistema. Los modelos pueden tener una base empírica y teórica. La empírica, la constituyen los datos que caracterizan al sistema o elemento y junto con la base teórica es posible comprender todas aquellas relaciones universales para explicar y describir el sistema.

Existen diversos tipos de modelos: a). Modelo matemático, el cual es una ecuación que representa el comportamiento de un sistema, b). Modelo estático representa un fenómeno sin manejar la variable tiempo, c). Modelo dinámico, se maneja la variable tiempo y su representación se da a través de ecuaciones

diferenciales, d). Modelos determinísticos, hacen predicciones definidas cuantitativamente, e). Modelo estocástico, contiene elementos al azar con el cual se predicen valores y su varianza y f). Los modelos de simulación dinámica, los cuales utilizan la metodología de dinámica de sistemas de Forrester, (1971), en la cual confluyen los principios de la teoría general de sistemas, de la teoría de los sistemas retroalimentados (cibernética) y de la informática (Aracil 1997).

Los modelos de simulación dinámica de un sistema cultivo; cuando contienen las variables esenciales del mismo y utilizan parámetros que establecen relaciones universales, podrán ser utilizados en diversos ambientes o condiciones de manejo, con el simple hecho de incluir las variables relevantes del nuevo sistema como son: genotipo, suelo, clima, riegos, etc. (Quijano, *et al* 1998)

2.2. Contribución de los modelos en la agricultura

Quijano et al (1998) y Aracil, (1997), coincidieron en señalar que la existe una gran aplicación del uso de los modelos en las actividades agrícolas y de investigación, resaltando dentro las más importantes a las siguientes;

1. En la expresión o presentación de hipótesis matemáticas que permitan realizar una descripción o cuantificación de problemas ecológicos.
2. Los modelos pueden proveer un modelo conceptual, el cual puede ayudar a centrar la atención sobre áreas donde el conocimiento es poco y puede estimular a generar nuevas ideas y actividades experimentales.

3. El modelo matemático puede facilitar el uso para asesores.
4. la modelación permite plantear experimentación, facilitando el diseño de experimentos que den respuesta a preguntas particulares o discriminen entre diversas alternativas.
5. Se pueden plantear estrategias o tácticas de un programa de investigación interdisciplinaria.

2.3. Etapas de crecimiento del cultivo de maíz

2.3.1. Crecimiento y desarrollo

Además de acumular peso, los cultivos también pasan a través de estados sucesivos de desarrollo fenológico. El crecimiento se define como el incremento en peso o volumen total de la planta o de sus órganos; mientras que el desarrollo se considera como el paso a través de etapas fenológicas sucesivas y se caracterizan por el orden y la tasa de aparición de los órganos vegetativos y reproductivos de las plantas.

Si la tasa de desarrollo es alta, la producción total de biomasa será baja, debido a que el periodo de crecimiento lineal es corto. Un periodo de crecimiento corto dará como resultado una biomasa vegetativa pobre, por otra parte una elevada inversión en biomasa vegetativa puede llevar a una baja producción de órganos de almacenamiento, debido a que los valores de respiración de

mantenimiento serán altos. El patrón de distribución de materia seca por tanto, no se relaciona con la edad del cultivo, sino con el estado de desarrollo.

Para el desarrollo, es importante la tasa de asimilación bruta, la cual depende de condiciones como la radiación solar, la temperatura, de la disponibilidad de nutrientes y agua, y de la presencia de plagas enfermedades y malezas. Bajo condiciones en que no haya limitaciones de nutrientes y en ausencia de plagas, enfermedades y malezas, la tasa de asimilación bruta estará determinada por la energía solar y esto es lo que se conoce como tasa de asimilación potencial. La ganancia de materia seca por unidad de tiempo se da en función de la energía solar, siendo importante la eficiencia en el uso de la luz y la propia energía interceptada. Parte de los carbohidratos generados en la fotosíntesis son utilizados por la planta como material de construcción para su crecimiento y otra como fuente de energía para realizar los diferentes procesos fisiológicos (respiración). Cerca del 40% de los carbohidratos producidos en el proceso de asimilación, son consumidos en la respiración, de tal forma que si a la tasa de asimilación se le resta la tasa de respiración, se obtiene la tasa de incremento de peso seco. (Van Heemst, 1986).

Van Heemst, (1986), Al analizar algunos estudios sobre las curvas de tasas de crecimiento y de acumulación de la materia seca en función del tiempo identificó tres periodos o etapas de desarrollo (Figura 1).

- 1). El cultivo presenta plantas individuales que no crean una competencia entre si, de tal forma que tanto la tasa de crecimiento como la acumulación de materia seca se incrementan exponencialmente, pudiendo señalar que en esta etapa las altas densidades pudieran no tener un efecto significativo de competencia.

- 2). El cultivo puede llegar a índice de área foliar 5 y cubrir completamente el suelo, maximizando la intercepción de luz y por lo tanto la tasa de crecimiento permanece constante y de acumulación de materia seca se incrementa en forma lineal. En esta etapa las altas densidades de población pueden provocar que el tiempo de crecimiento sea menor, ya que la planta crece rápido por búsqueda de luz.

- 3). La senescencia de las hojas ocasiona un fuerte decremento de la tasa de crecimiento y de la acumulación de la materia seca.

Un periodo de crecimiento corto dará como resultado una biomasa vegetativa limitada, especialmente en lo que se refiere a hojas para la intercepción de luz, lo cual llevara a una pobre cosecha. Por otra parte demasiada inversión en biomasa vegetativa, también puede llevar a una producción relativamente baja de órganos de almacenamiento, debido a que en ese caso, los valores de respiración de mantenimiento son altos.

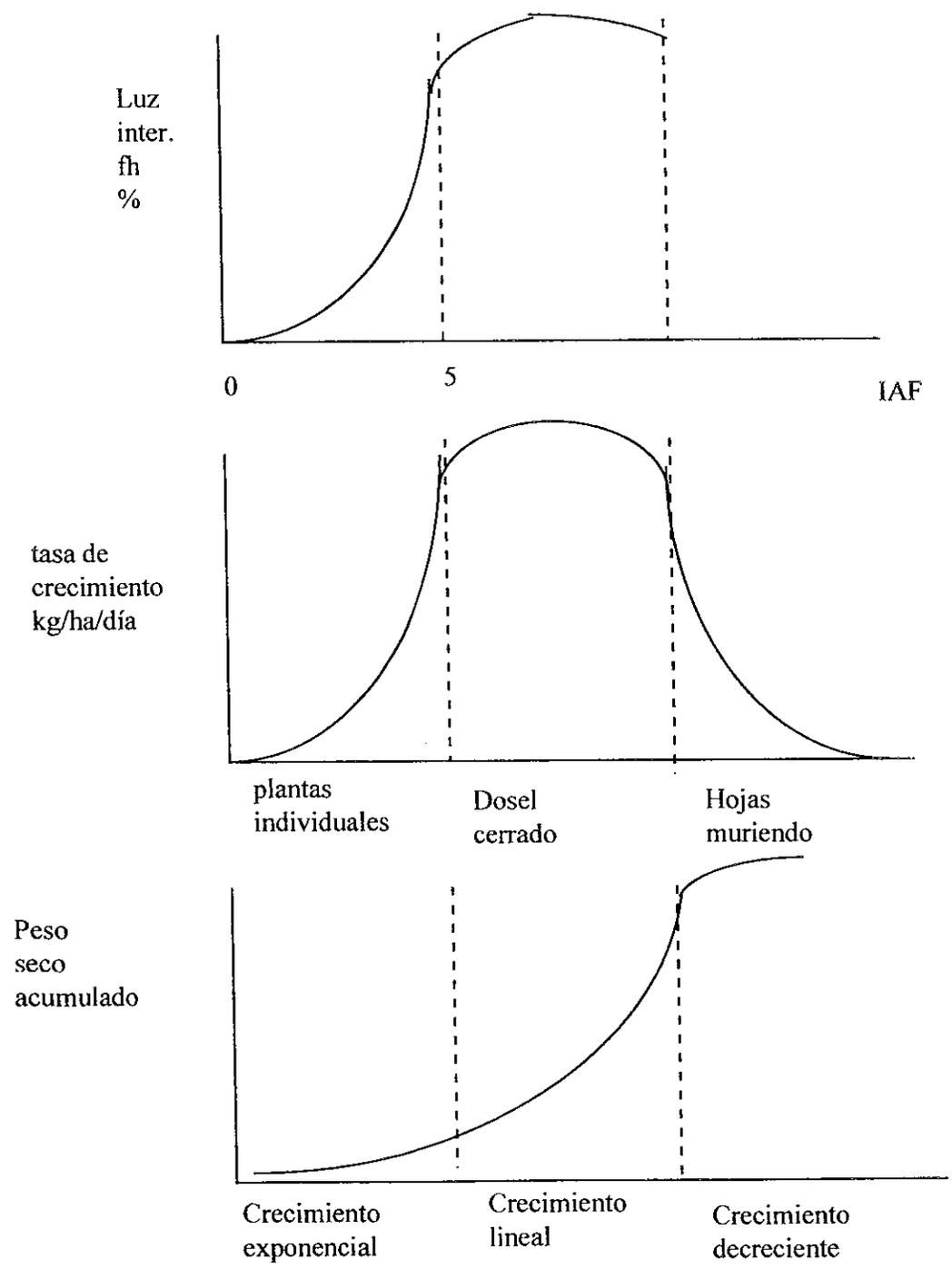


Figura 1. Porcentaje de luz interceptada a través del índice de área foliar y comportamiento de la tasa de crecimiento y el peso seco

2.4. Fotosíntesis

La fotosíntesis es el fenómeno biológico más importante sobre la tierra, debido a que ésta es la fuente de toda la energía primaria para la humanidad. La representación química de la fotosíntesis: $6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{O} + \text{energía} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{16}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$, en donde las plantas usan las moléculas de glucosa para su crecimiento y desarrollo.

La fotosíntesis tiene lugar en los cloroplastos, los cuales contienen clorofila, ésta es una sustancia capaz de absorber la energía solar y a través de una serie de complejas reacciones químicas ser capaz de convertir esta energía solar en materiales nutritivos.

La luz visible comprende un espectro de colores que van del rojo, naranja, amarillo, verde y azul, de éstos, la molécula de clorofila absorbe luz de la porción roja y azul y refleja o transmite la porción verde del espectro. El reflejo de la luz verde es lo que hace que sea posible ver el color verde de estas. Un alto porcentaje de fotosíntesis se encuentra asociado con plantas sanas, el color verde intenso a la fertilización que fomenta el desarrollo de clorofila.

El dióxido de carbono principal ingrediente del proceso de fotosíntesis comprende el 90 % del peso de la materia seca de la planta y los nutrientes tomados del suelo comprenden el 10 % restante.

Los antecedentes presentados sobre la fotosíntesis tienen una aplicación práctica en la producción de cultivos al tratar de encontrar las prácticas de cultivo que mejorarán la eficiencia de la fotosíntesis, al decir que cultivos sembrar, que densidad de población, ancho de surcos, profundidad de siembra sería posible utilizar (Stoskopof, 1981)

2.4.1. Patrón fotosintético del maíz

Las plantas se clasifican de acuerdo a la fijación de CO_2 y el metabolismo de los carbohidratos en especies C3, CAM y C4, ubicándose el maíz en este último grupo, el cual se caracteriza por absorber rápidamente el CO_2 , y en el que la primera sustancia que se forma, es un ácido de cuatro carbonos (ácido oxalacético). Las plantas de este grupo no presentan fotorrespiración, por lo tanto tienen una alta eficiencia fotosintética. La tasa de asimilación de CO_2 del cultivo, al igual que una hoja individual, depende de la radiación recibida. Si el cultivo no forma una cubierta cerrada, tal como ocurre al inicio y al final del ciclo de crecimiento, no toda la radiación que llega es interceptada, y la asimilación del CO_2 es menor que en un dosel cerrado (Stoskopof, 1981).

2.5. Radiación

La radiación y la temperatura que reciben las hojas de las plantas son los principales factores de clima que intervienen sobre la tasa de fotosíntesis, de tal forma que la cantidad de luz interceptada por la población de plantas, se considera como el principal elemento determinante del tiempo y la velocidad de crecimiento del cultivo, ya que tiene que ver con la acumulación de carbono y

biomasa del cultivo. Por lo anterior el crecimiento y mantenimiento de las hojas es esencial para obtener altos rendimientos de los cultivos (Sinclair, 1989)

Para simular la intercepción de luz por el dosel de una planta se usa la ley de BEER (Monsi and Saeki, 1953), en la cual se señala que del flujo de energía total que llega sobre el cultivo, se transmite en un plano horizontal sobre el dosel del cultivo y es interceptada por las hojas considerando dos parámetros medibles que son el índice de área foliar (IAF) y el coeficiente de extinción del cultivo (K_c), lo anterior es manejado a través de la siguiente ecuación: Intercepción de luz = $(1 - e^{-K_c \cdot IAF})$, en donde K_c es el coeficiente de extinción para la luz visible, siendo su valor entre 0.5 y 0.8, dependiendo de la geometría del cultivo. Egherevba (1975), reportó que a medida que se reducen las distancias entre surcos de maíz, aumenta la intercepción de luz. Las mayores intercepciones de luz a menudo incrementan los rendimientos Alessi *et al.*, 1977; Karlen and Camp, 1985; Parvez *et al.*, 1989; Mac Gowa *et al.*, 1991).

Cuando el recorrido de la luz del sol es paralelo a la dirección de los surcos, la longitud promedio de la sombra es igual al promedio de espaciamientos de plantas dentro de las hileras y el promedio de sombreado de plantas es igual al ancho de hileras. Cuando la luz del sol es perpendicular a la dirección de los surcos, el ancho promedio de sombreado es igual al espaciamiento entre hileras.

La cantidad de luz interceptada por el dosel de la planta se da en función del IAF, los espacios entre plantas y el coeficiente de extinción. Muchos modelos

de cultivos calculan la intercepción de luz usando la ecuación de Monsi and Saeki, (1953), sin ajustar el coeficiente de extinción por efecto del espaciamiento de surcos. (Spitters and Aerts, 1983; Jones and Kiniry, 1986; Williams *et al.*, 1989; Chapman *et al.*, 1993). Sin embargo Rosenthal *et al.*, en 1989 usaron una ecuación empírica ($K_c = 0.59 - 21 * \text{espacio entre surcos}$), en el modelo SORKAM obteniendo una mejor predicción de intercepción de luz conforme el espaciamiento entre surcos disminuía. La ecuación utilizada se obtuvo a través de un estudio de K_c en cuatro cultivos, encontrando que los valores de éste disminuyeron significativamente conforme se incrementó el espacio entre surcos.

Mediante el uso de algunas metodologías se ha calculado la intercepción de luz, utilizando variables como la arquitectura de la planta altura, ancho de planta o su circunferencia, un coeficiente empírico, el patrón de siembra y el ángulo de los rayos solares (Arkin *et al.*, 1978, Hodges and Evans, 1990; Boote and Loomis, 1991).

En algunos estudios se encontró que el ángulo de las hojas es muy similar entre híbridos y cuando sus hojas tienen un ángulo que las ubica como hojas erectas, éstos provocan que la luz pase al suelo y no sea interceptada, a menos que se manejen altas densidades.

2.6. Índice de área foliar (IAF)

El conjunto de hojas de las plantas, es el órgano más importante en la intercepción de luz, especialmente el parámetro de área foliar. La capacidad de un

cultivo para interceptar la radiación fotosintéticamente activa y sintetizar carbohidratos para el crecimiento, es una función no lineal del Índice de área foliar. De éste modo la estimación IAF es esencial entre otras cosas para determinar el crecimiento de cultivos, acumulación de materia seca, estimar niveles de competencia y trabajar con modelos de simulación. En relación con esta última, la correcta simulación del cambio en el tiempo del índice de área foliar es el primer requerimiento para la correcta simulación del rendimiento de un cultivo. En algunas variedades de maíz el IAF óptimo es de 4 a 5, ya que por encima de estos valores la velocidad de crecimiento disminuye; sin embargo, también existen genotipos con valores de 8 y rendimientos sobresalientes (Elings, 2000).

2.6.1. Métodos para estimar el área foliar en maíz

Los estudios de análisis de crecimiento y las investigaciones sobre la interceptación de luz requieren medir el área foliar, ya que ésta es una importante descriptor del dosel del cultivo. Las revisiones de diversos autores citadas por Daughtry, (1983), indican que existen por lo menos 14 categorías de métodos, los cuales varían grandemente en su precisión y dificultad para realizarlos. En la evaluación realizada por el autor de cuatro de los métodos más importantes, encontró que en cada uno de ellos la densidad de población debió ser determinada para calcular el índice de área foliar. El primer método se realizó con un medidor digital. El segundo procedimiento comprendió la relación entre el área foliar y el peso del follaje (área foliar específica). La tercera metodología se desarrolló multiplicando el largo y ancho de cada hoja por 0.75 y haciendo al sumatoria de todas hojas de las plantas. El cuarto método se relacionó con la

medición del área foliar de 10 plantas y posteriormente se dividió para sacar un factor de área por planta. De los cuatro métodos el primero fue el mejor con un coeficiente de variación menor del 2%.

Montgomery, (1911) estableció que existe una relación matemática entre el ancho y la longitud de la hoja y el Índice de área foliar y que éstos pueden servir para estimar el área foliar utilizando un factor de corrección de 0.75. Posteriormente en una modificación a este método, Lal and Subba Rao (1951), proponen una transformación logarítmica de la longitud y el ancho de la hoja. El área foliar total de la planta, puede por tanto, ser obtenida por mediciones de la longitud y ancho de hojas representativas (Stewart and Dwyer, 1999). Francis *et al.*, (1969) en un estudio de siete híbridos de cruce simple, sugiere multiplicar el área de la hoja número siete, contando de abajo hacia arriba, por un factor de corrección de 9.04 para así obtener el área foliar total. Ellos notaron, sin embargo, que este coeficiente varía ampliamente para poblaciones mejoradas creciendo en diferentes densidades y en estos casos es necesario considerar dichas variantes. En otro estudio Pearce *et al.* (1975), propuso multiplicar el área de la hoja número ocho, por un factor de 9.39.

2.6.2. El IAF en función de híbridos, distancia de siembra y niveles de nitrógeno

En estudios realizado por Tanaka y Yamaguchi (1984), encontraron que los genotipos difieren hasta en una unidad en el comportamiento del IAF, altura de plantas (50cm) y los niveles de rendimiento que variaron hasta en 2 t ha^{-1} , lo cual

se explica por el mayor porte o altura del híbrido. Así mismo en la medida que se incrementó la distancia entre surcos y plantas en los dos genotipos, se redujo el IAF drásticamente; En relación con los incrementos de los niveles de nitrógeno, se observó un aumento del IAF, este mismo comportamiento se encontró para las variables de altura de planta y rendimiento.

Otegui, (1996), señaló que debido a la escasa plasticidad vegetativa y reproductiva y al menor porte y área foliar de las plantas de maíz de ciclo corto, la densidad de siembra y el espaciamiento entre hileras fueron las principales prácticas de manejo a ajustar, de tal forma que es importante probar diferentes manejos, relacionados con la densidad de siembra y espaciamiento entre hileras para maíces de distinto ciclo.

2.6.3. Senescencia de hojas

La senescencia de hojas en las plantas de maíz se puede dar por diferentes factores: altas temperaturas (acumulan unidades calor), enfermedades de los diversos órganos de las plantas, estrés de humedad o translocación de nitrógeno hacia los órganos reproductivos en crecimiento. Así mismo la senescencia se puede acelerar en cultivos con altas densidades debido a que las hojas bajas al estar situadas en una condición de baja exposición de luz empiezan a perder su actividad. El porcentaje relativo de muerte de hojas debido a mutuo sombreado es linealmente proporcional a valores de índice de área foliar mayores de 4. Una hipótesis de la senescencia o autodestrucción de las hojas se da en dos vertientes, la primera se relaciona con la pérdida de la actividad fotosintética del

área foliar y la segunda con un decremento de la asimilación de CO₂ por las hojas (Goudriaan, And Van 1994).

2.6.4. El IAF y rendimiento

Tanaka y Yamaguchi, (1984), determinaron que el número de plantas interviene de manera importante sobre los bajos o altos rendimientos ya que tienen una fuerte influencia sobre el número de granos producido por metro cuadrado como se ejemplifica en la siguiente ecuación:

$$\# \text{ de granos/m}^2 = f(\# \text{ plantas} + \# \text{ mazorcas/m}^2 + \# \text{ granos /mazorca}).$$

Como complemento de la función anterior se debe señalar que se ha determinado que el número de granos por hilera de mazorcas disminuye con las altas densidades de población, debido a un incremento del índice de área foliar. De lo anterior se puede concluir que es necesario mantener un balance de la relación índice de área foliar - número de granos, de tal forma que se logre un alto rendimiento

2.7. Modelos de simulación dinámica

Durante la década de los ochenta la tecnología de la informática hizo posible simular procesos agrícolas de manera rápida y económica. La simulación de los modelos de crecimiento y desarrollo del maíz fueron usados en muchos países para analizar la respuesta de los cultivos a el medio ambiente y a su manejo. Dentro de los modelos iniciales se encuentran "CERES" (Síntesis de los

recursos cultivo-medio ambiente) y "EPIC (Calculo del impacto erosión-productividad). Estos dos modelos difieren en sus objetivos, escalas espaciales, niveles de características biofísicas y el número de procesos y alternativas de manejo simuladas. Por ejemplo "CERES", tiene mayor complejidad y detalle sobre fonología de cultivos, crecimiento de hojas, partición de biomasa y componentes de rendimiento; sin embargo "EPIC", consideran en mayor medida procesos biofísicos como erosión del suelo, alternativas de manejo sobre labranza, drenaje artificial y rotación de cultivos, los cuales son ignorados por la mayoría de modelos. El uso de ambos modelos en el mundo ha tenido que involucrar una calibración adecuada y su respectiva validación. Las ventajas que se han presentado con su uso son: a) han podido ser usados rápida y económicamente para predecir el comportamiento individual de cultivos y/o sistemas complejos de cultivos; b) se ha logrado con su uso incrementar la rapidez y reducido los costos en la toma de decisiones en la agricultura y c) han sido empleados en la capacitación de profesionistas para entender el comportamiento de complejos sistemas de cultivo (Jones *et al.*, 1990). En el módulo de intercepción de luz del modelo CERES, Las variables necesarias para que este corra son: latitud, densidad de población, espaciamiento entre hileras, espaciamiento entre plantas, día del año, valores diarios de índice de área foliar, número de hojas por planta, altura de planta, diámetro de planta y radiación solar.

Quijano *et al.*, (1998), desarrolló el modelo de simulación del potencial ecológico de la producción de los cultivos (MSPEC. IM), el cual estima la producción diaria de materia seca, tanto en condiciones de producción potencial

como de limitación de humedad. Los componentes del modelo son: a) la edad fisiológica del cultivo, calculada a partir de la acumulación de unidades calor (UC), o días grado por encima de cierta temperatura base. El método utilizado para la acumulación de UC es el método residual. Para propósitos de estandarización de la tasa de desarrollo, se considera una escala que va del 0 al 1 para el periodo entre la emergencia y el inicio del llenado del grano, y del 1 al 2 para el periodo entre el inicio de llenado de grano y la madurez fisiológica: b) La asimilación bruta de CO₂, para la cual se considera un índice de nubosidad, calculado a partir de la relación entre la radiación global total y la radiación medida, este índice permite definir para cada día la fracción del día que está nublado y despejado, para el cálculo de la tasa de fotosíntesis; el área foliar se estima con base en el área foliar específica y el peso seco de las hojas, lo cual permite corregir la tasa de asimilación por la intercepción incompleta de la luz y c) la distribución de la materia seca, en la cual se toma como base la etapa de desarrollo del cultivo para determinar las prioridades de crecimiento del mismo. En esta parte del modelo se calcula el crecimiento del área foliar y los diferentes órganos de la planta a partir de la edad fisiológica. La tasa de respiración, la senescencia de los órganos y los efectos del déficit hídrico sobre el rendimiento final de grano también tienen relación con la edad fisiológica y se calculan en esta sección. Las constantes que representan la eficiencia de conversión y respiración de mantenimiento para cada órgano se obtuvieron de Heemst (1986). En general, se sigue un esquema de construcción de modelos basado en el concepto de variables de estado y cambios de flujo de acuerdo con Rabbing *et al.*, (1989), en el cual se enfatiza la existencia de un ciclo de retroalimentación positiva en el cual se involucran la tasa de

fotosíntesis, el área foliar y el peso de hojas, y uno de retroalimentación negativa, involucrando a los mismos componentes y la respiración de mantenimiento. Las entradas al modelo son: 1) de clima; datos diarios de temperaturas extremas, precipitación, evaporación y radiación solar; 2) de suelo, el porcentaje de arena, limo y arcilla, y la profundidad de la capa arable y 3) del genotipo, las unidades calor requeridas para completar la etapa vegetativa, es decir de la emergencia al 50% de floración, y de esta última hasta la madurez fisiológica. Adicionalmente el modelo requiere datos sobre el patrón de distribución de la materia seca en función del estado de desarrollo

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización del experimento

El estudio se desarrolló bajo condiciones de temporal durante los ciclos primavera-verano de los años 1999, 2000 y 2001, en el municipio de Acayucan, Veracruz, específicamente en el sitio con las coordenadas 17° 20' de latitud norte y 94° 38' de longitud oeste.

3.2. Clima

El clima de acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por García (1968), es Aw2, caracterizado por ser el más húmedo de los cálidos subhúmedos, con 10% de lluvia invernal durante los meses más secos, una precipitación media anual de 1800 milímetros y una temperatura de 28 ° C.

3.3. Suelos

El tipo de suelo predominante es luvisol (INEGI, 1980), con relieve plano, textura migajón arcillo arenosa, contenido de materia orgánica de 4%, pH de 5.5 (ligeramente ácido) y una buena fertilidad natural definida por buen contenido de N-P-K.

3.4. Diseño experimental

El diseño de tratamientos fue un factorial 2x3x3 y el diseño experimental utilizado fue de bloques al azar con arreglo de parcelas subdivididas; en parcelas grandes se establecieron los híbridos H-512, de cruza doble y H-513, de cruza

simple, ambos son de los más establecidos en la región; en parcelas medias, se consideró a la distancia entre surcos con 70, 80 y 90 cm y en parcelas chicas, las distancias entre plantas con 20, 40 y 60 centímetros, con una planta por mata en el caso de 20 cm y dos plantas por mata para 40 y 60 cm.

3.5. Tratamientos

La combinación de los niveles de los tres factores dio un total de 18 tratamientos; la unidad experimental conformada por cuatro surcos de 6 m de largo y la parcela útil fueron los dos surcos centrales y solo 5 m de longitud. En el cuadro 1 se presentan las características particulares de cada uno de los tratamientos.

Cuadro 1. Tratamientos evaluados durante los ciclos primavera-verano de los años 1999, 2000 y 2001. Acayucan, Ver.

Tratamiento	Híbrido	Distancia surcos	Distancia plantas	Plantas por mata	Densidad de población
1	H-512	70	20	1	71,428
2	H-512	70	40	2	71,428
3	H-512	70	60	2	47,619
4	H-512	80	20	1	62,500
5	H-512	80	40	2	62,500
6	H-512	80	60	2	41,666
7	H-512	90	20	1	55,555
8	H-512	90	40	2	55,555
9	H-512	90	60	2	35,714
10	H-513	70	20	1	71,428
11	H-513	70	40	2	71,428
12	H-513	70	60	2	47,619
13	H-513	80	20	1	62,500
14	H-513	80	40	2	62,500
15	H-513	80	60	2	41,666
16	H-513	90	20	1	55,555
17	H-513	90	40	2	55,555
18	H-513	90	60	2	35,714

3.6. Siembra

Los experimentos se sembraron el 30 y 28 de junio, para los años 1999 y 2001 y en el 2000 fue el 11 de julio. La dosis de fertilización para los tres años fue 138-69-60 y el manejo general del cultivo se realizó con base a las recomendaciones técnicas generadas para la región (Tinoco *et al.*, 2002).

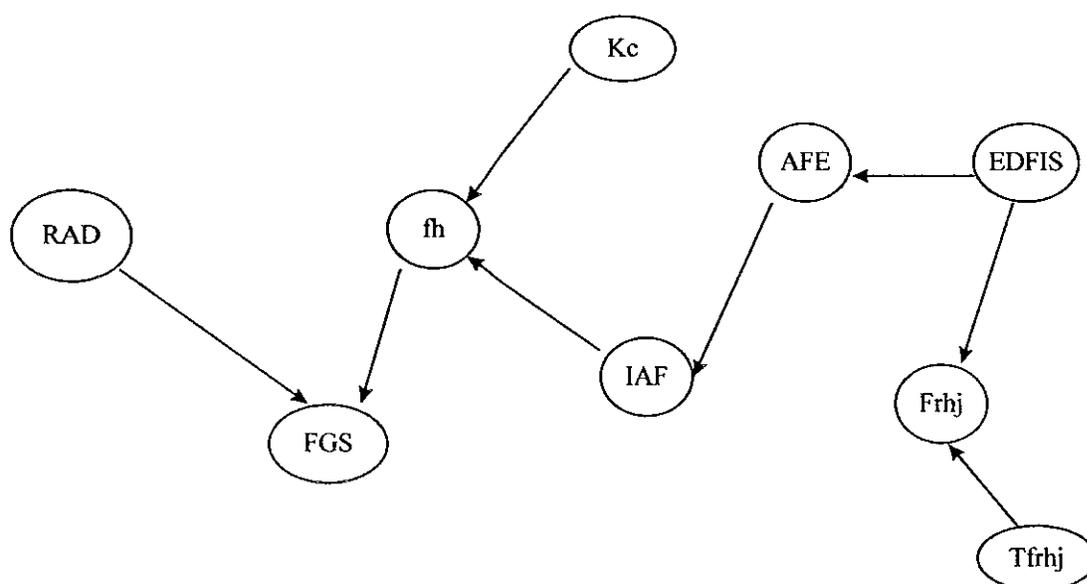
3.7. Descripción de los híbridos utilizados

El híbrido H-512, es un genotipo de cruza doble, mientras que H-513 es de cruza simple, ambos son de altura intermedia (2.29 y 2.35m) y con resistencia al acame. H-512 se caracteriza por tener una altura de mazorca de 1.3 m; en tanto que H-513 es más baja con 1.13m. El número de hojas es similar para ambos materiales genéticos con 15. Los dos híbridos tienen un periodo similar a floración con 55 días en promedio. Su longitud promedio de mazorca es de 16.5cm, con un número de hileras de 14, la textura del endospermo es semidentada y semicristalina para H-513, mientras que para H-512, lo es dentada. El color del endospermo es blanco para ambos y con una cobertura de mazorca de buena para H-512 y excelente en H-513.

3.8. Conceptualización del modulo de intercepción de luz del modelo MSPC

Considerando el avance que ya se tiene en el modelo de potencial productivo, en la Figura 2, se representa el modulo de intercepción actual, analizando los elementos que intervienen y el tipo de relación entre ellos. Como observaciones importantes de este modulo se puede señalar que la fracción de luz interceptada esta en función del índice de área foliar (IAF) y del coeficiente de

extinción de luz (K_c). Así mismo se tiene que el IAF, se estima a partir del área foliar específica (m^2 de hojas/ peso de hojas en kg) y esta depende de la edad fisiológica del cultivo y de la fracción de hojas y tallos generadas para dichas edades, lo cual le adiciona complejidad y disminuye la precisión si los parámetros no se determinan correctamente.



RAD: radiación

AFE: Área foliar específica.

FGS: Asimilación bruta

EDFIS: Edad fisiológica.

fh: Fracción de luz interceptada por el cultivo.

Frhj: Fracción de hoja

K_c : Coeficiente de extinción de luz.

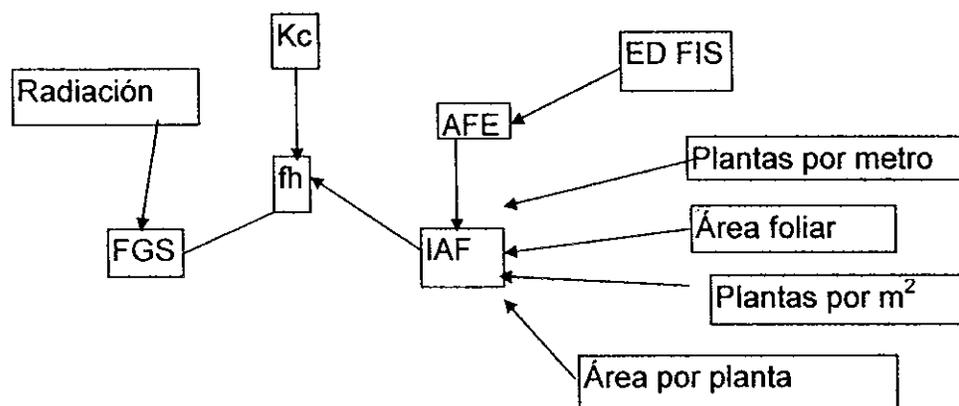
Tfrhj: Tasa de fracción de hoja.

IAF: Índice de área foliar.

Figura 2. Módulo de interceptación de luz del modelo de simulación MSPC

3.9. Posible estructura del modulo de intercepción de luz a partir de una nueva estrategia para estimar el índice de área foliar.

Considerando la revisión de literatura sobre el índice de área foliar y la estructura de intercepción de los modelos de simulación CERES y EPIC, en la Figura 3, se presenta de una manera hipotética las posibles variables que pudieran determinar en forma directa el índice de área foliar. Dichas variables son: la densidad de población, el arreglo espacial de plantas, el área foliar, el número de plantas por metro lineal y metro cuadrado.



FGS: Asimilación bruta

IAF: Índice de área foliar.

fh: Fracción de luz interceptada por el cultivo.

AFE: Área foliar específica.

Kc: Coeficiente de extinción de luz.

EDFIS: Edad fisiológica.

Figura 3. Diagrama la posible nueva estructura del modulo de intercepción de luz.

3.10. Variables evaluadas

3.10.1. Área foliar

Esta variable se midió semanalmente a partir de los 30 días de edad del cultivo hasta la madurez fisiológica del maíz; sin embargo con fines de análisis, se tomaron los datos hasta floración, ya que de acuerdo a los estudios de Tanaka y Yamaguchi, (1984), se señala que el área foliar del maíz llega a sus valores máximos en la etapa de floración. La estimación del área foliar se midió en dos matas por tratamiento (2 a 4 plantas), en las distancias de 20 cm entre plantas se tuvo una planta por mata; mientras que para las distancias de 40 y 60 cm entre plantas se manejaron dos plantas por mata. El método de medición fue el destructivo (Whilhelm, 2000 y Montgomery, 1911).

3.10.2. Índice de área foliar

Después de medir el área de cada una de las hojas, se realizó una sumatoria de todas las hojas de las plantas, extrapoliándose al área por metro cuadrado, para así estimar el índice de área foliar, el cual indica los metros cuadrados de hoja por metro cuadrado de suelo.

$$\text{IAF} = (\text{área foliar} / \text{área de muestreo})$$

3.10.3. Rendimiento de grano

Se cosecharon dos surcos centrales de 5 m de largo, largo, con los cuales se realizó una estimación del rendimiento en t ha^{-1} al 14% de humedad.

3.10.4. Condiciones climáticas

Durante el ciclo del cultivo, se midió diariamente la precipitación y temperatura máxima y mínima. Con estas dos últimas variables se estimaron las unidades calor, las cuales fueron utilizadas para determinar la edad fisiológica de cada muestreo de IAF en campo.

3.10.4.1. Determinación de las unidades calor

Con los valores de temperaturas máximas y mínimas, se calculó la edad fisiológica del maíz en cada etapa de muestreo con la siguiente fórmula $UC = ((T_{\text{máxima}} - T_{\text{mínima}})/2) - 10$, en donde 10 representa una temperatura base para maíz.

3.10.4.1.1. Determinación de la edad fisiológica

De acuerdo a Van Heemst (1986), se maneja una escala numérica de 0 a 2 para expresar el desarrollo del cultivo, ubicando la emergencia en 0, la antésis en el valor de 1 y la madurez fisiológica en 2, de este modo se definió la tasa de desarrollo como la porción de la escala que se acumula por unidad de tiempo, estimándose la edad en que se encontraba el cultivo en cada una de las etapas de muestreo, a través de la siguiente fórmula:

Edad fisiológica = (Unidades calor acumuladas al período de tiempo / Unidades calor a flor)

3.11. Estrategia metodológica para encontrar el mejor modelo de IAF

Los datos de índice de área foliar por año y el integrado de los tres años fueron graficados para ver su distribución y a partir de éstos, determinar las mejores relaciones y las posibles líneas de tendencia de los datos. Las variables manejadas fueron: a) número de muestreo semanal, b) valores de densidad de población, c) distancias de surcos, d) distancias de plantas, e). plantas por metro cuadrado, f) Plantas por metro lineal y g) Combinaciones de las variables anteriores. Las ecuaciones de líneas de tendencia que se probaron fueron las siguientes:

Ecuación lineal: $Y = C + bx$

Ecuación logarítmica: $Y = C + b \ln x$

Ecuación cuadrática: $Y = C + bx + bx^2$

Ecuación exponencial: $Y = b e^{cx}$

La selección del mejor modelo se definió en función del coeficiente de determinación, error típico y la significancia estadística del modelo de regresión generado.

3.12. Validación del modelo generado

Con los datos de densidad de población de parcelas de productores y su monitoreo del IAF en floración, se validó el modelo comparando las datos reales con los estimados.

3.13. Estrategia para encontrar el modelo que prediga el rendimiento en función del IAF estimado en floración

Con los datos de índice de área foliar por año, el integrado de los tres años y el rendimiento, se graficaron para ver la distribución de los datos y a partir de éstas, determinar las mejores relaciones y las posibles líneas de tendencia de los datos. Las ecuaciones de líneas de tendencia que se probaron fueron las siguientes:

Ecuación lineal: $Y = C + bx$

Ecuación logarítmica: $Y = C + b \ln x$

Ecuación cuadrática: $Y = C + bx + bx^2$

Ecuación exponencial: $Y = b e^{cx}$

La selección del mejor modelo se definió en función del coeficiente de determinación y la significancia estadística del modelo de regresión generado.

Para las dos estrategias anteriores, la realización de los análisis de regresión y selección de las mejores ecuaciones de las líneas de tendencia de los datos, se utilizó el paquete estadístico de SAS (SAS Institute. Inc., 1990) y la hoja de cálculo de Excel (Microsoft, 2003).

3.14. Análisis estadísticos

3.14.1. Variable de IAF

Los análisis de varianza para esta variable se realizaron en cada uno de los tres años de estudio, manejando como repeticiones a los muestreos semanales.

3.14.2. Rendimiento

Los análisis de varianza se realizaron para cada año del estudio, analizando tres repeticiones por experimento.

La identificación de los mejores niveles de los factores que resultaron con significancia estadística se realizó a través de la prueba de comparación de medias por el método de Tukey.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Precipitación durante los tres años de estudio

La distribución y volumen de precipitación decenal de cada uno de los tres años de estudio se presenta en la figura 4, observándose en los tres años, aceptables condiciones de distribución y el volumen más alto durante 1999, lo cual de manera indudable influyó en un buen desarrollo y producción del cultivo durante los tres ciclos.

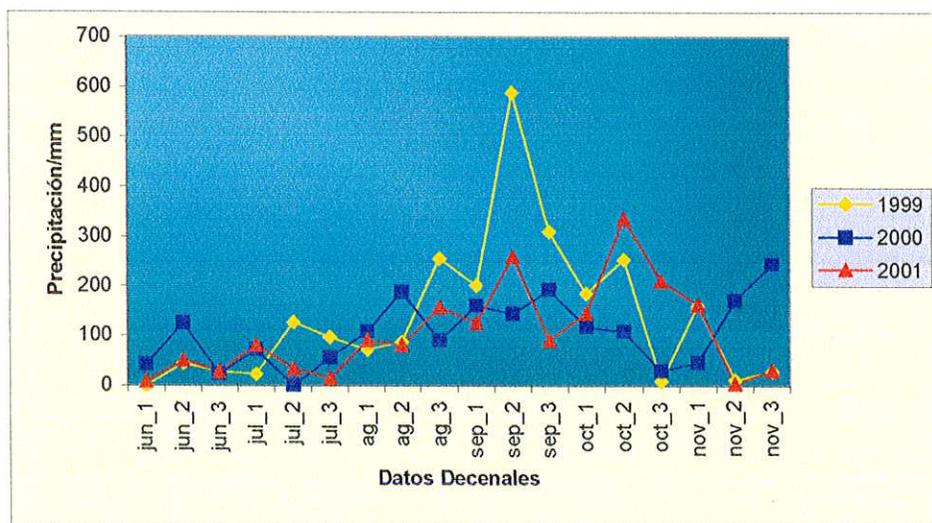


Figura 4. Distribución y volumen de la precipitación pluvial decenal registrada durante el ciclo de cultivo en los tres años de estudio.

4.2. Temperatura promedio decenal

En relación con las temperaturas promedio, en la Figura 5, se muestra que los valores para los tres años tienen un comportamiento uniforme, observándose que en 1999 y 2000, los valores más bajos se tuvieron de la segunda decena de

octubre a la tercera de noviembre, periodo que coincide con la etapa de llenado de grano, lo cual en cierta manera favoreció el mejor desarrollo del cultivo.

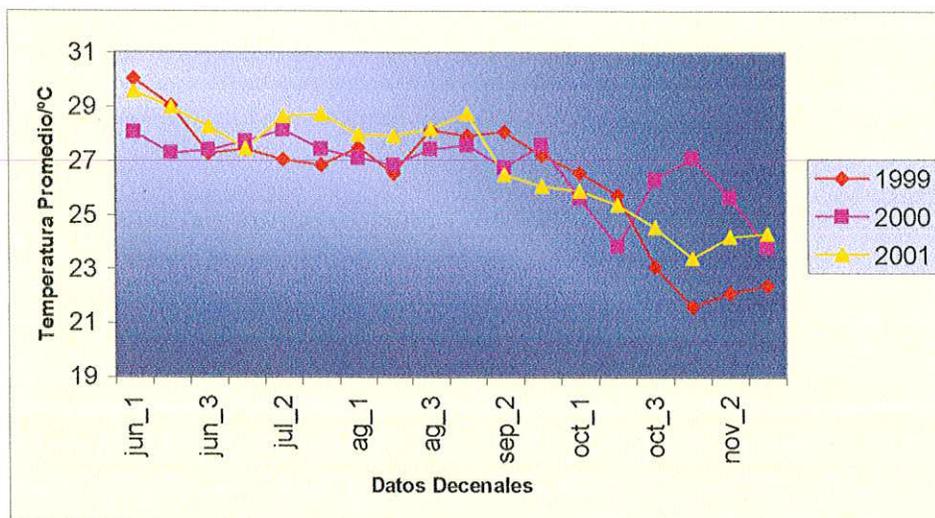


Figura 5. Comportamiento de la temperatura promedio decenal durante el ciclo de cultivo de 1999 a 2001.

El análisis integrado de las temperaturas permite concluir que las mejores condiciones se presentaron durante el año de 1999, especialmente en los meses de octubre y noviembre, lo cual hace suponer mejores condiciones que favorecieron el desarrollo y producción del cultivo en ese año.

4.3. Caracterización fenológica de los genotipos evaluados

Como parte de la caracterización fenológica de los genotipos evaluados, se encontró que las unidades calor acumuladas (UCA) a floración para ambos híbridos fueron 950, Con respecto a la madurez fisiológica, ésta se presentó a en 1542 unidades calor. Ambos resultados de esta variable ubican a los dos genotipos como genotipos de ciclo intermedio, semejantes a la mayoría de los híbridos comerciales que se siembran en la región.

4.4. Comportamiento del índice de área foliar (IAF)

En los análisis de varianza realizados con los valores de IAF, considerando como repeticiones a cada uno de los muestreos realizados durante el ciclo de cultivo, arrojó los siguientes resultados para cada una de las fuentes de variación.

4.4.1. Genotipos

Los resultados en los tres años de la evaluación para este factor mostraron significancia estadística solo durante 1999, sobresaliendo el H-512, con 3.03 de IAF. Para el 2000 y 2001, ambos materiales tuvieron un comportamiento similar con valores de IAF promedio de 2.5 y 2.2 respectivamente. Estos resultados coinciden en parte con Birch, *et al* ., (1988); citado por Elings (2000), quien encontró diferencias genéticas en el IAF al estudiar cinco genotipos de maíz, observando variaciones en los parámetros que describen el IAF.

4.4.2. Distancia entre plantas

La prueba de comparación de medias en los tres ciclos de estudio del comportamiento del IAF, indican que las mejores distancias entre plantas fueron las de 20 y 40 cm, con índices de área foliar que van de 2.4 a 3.2.

Para esta misma variable, los análisis de regresión realizados con los valores de IAF de cada tratamiento como variable dependiente y la edad fisiológica desde desarrollo vegetativo hasta floración, permitió generar para cada tratamiento un modelo lineal simple, presentándose los valores de pendiente (β_s) en el Cuadro 2, observándose que en los tres años que los valores para cada una de las distancias y el promedio de las mismas, fueron similares para 20 y 40 cm entre plantas (IAF > 6), no así con la distancias de 60 cm entre plantas, que presenta los valores más bajos de pendiente (IAF < 5).

La coincidencia obtenida tanto en los resultados de los análisis de varianza como en los de regresión, permite concluir que el mejor comportamiento de IAF se obtiene con las distancias entre plantas de 20 y 40 cm, lo cual se explica por la más rápida y mejor cobertura del follaje, que favorece una mayor intercepción de luz, en comparación con la distancia de 60 cm.

Cuadro 2. Pendiente de la recta para distancias de plantas considerando la edad fisiológica e índice de área foliar en los muestreos previos a floración.

Tratamientos D. plantas	Pendiente 1999	(b ₁) Pendiente 2000	(b ₁) Pendiente 2001
H-512 20	6.101	7.97	7.805
H-512 20	4.566	5.231	6.126
H-512 20	6.118	5.283	6.5
H-513 20	7.147	8.421	7.361
H-513 20	8.185	5.368	7.297
H-513 20	7.04	5.592	5.38
Promedio	6.526	6.310	6.744
H-512 40	6.597	7.316	7.303
H-512 40	6.184	5.982	6.103
H-512 40	7.821	5.542	6.188
H-513 40	5.712	8.378	7.306
H-513 40	6.549	5.154	6.944
H-513 40	5.617	4.804	5.581
Promedio	6.413	6.196	6.570
H-512 60	4.77	5.244	4.619
H-512 60	6.523	4.041	4.362
H-512 60	4.563	3.071	3.837
H-513 60	4.679	5.309	4.512
H-513 60	5.489	3.308	3.937
H-513 60	4.651	3.884	3.437
Promedio	5.112	4.142	4.117

4.4.3. Distancia entre surcos

Los análisis de varianza en cada uno de los años del estudio y la prueba de comparación de medias indicaron que los mayores valores de IAF (2.4 a 3.5), se obtuvieron con las distancias de 70 y 80 cm.

Para este factor, también se realizaron análisis de regresión con los valores de IAF de cada tratamiento como variable dependiente y la edad fisiológica desde desarrollo vegetativo hasta floración, generándose para cada tratamiento un modelo lineal simple, presentándose en el Cuadro 3, los valores de pendiente (β_s), de los cuales se puede señalar que los mayores incrementos de IAF se lograron obtener con las distancias entre surcos de 70 y 80 cm. Para este factor también se constata que los mejores resultados se obtienen con las menores distancias entre surcos, debido a sus mayores densidades de población que repercuten en una adecuada cobertura de follaje e intercepción de luz.

Cuadro 3. Pendiente para distancias de surcos considerando la edad fisiológica e índice de área foliar en los muestreos previos a floración.

Tratamientos Surcos	D. Pendiente (b) 1999	Pendiente (b) 2000	Pendiente (b) 2001
H-512 70	6.101	7.97	7.805
H-513 70	6.597	7.316	7.303
H-512 70	4.77	5.244	4.619
H-513 70	7.749	8.421	7.361
H-512 70	5.712	8.378	7.306
H-513 70	4.679	5.309	4.512
Promedio	5.934	7.106	6.484
H-512 80	4.566	5.231	6.126
H-513 80	6.184	5.982	6.103
H-512 80	6.523	4.041	4.362
H-513 80	8.185	5.368	7.297
H-512 80	6.549	5.154	6.944
H-513 80	5.489	3.308	3.937
Promedio	6.249	4.847	5.794
H-512 90	6.118	5.283	6.5
H-513 90	7.821	5.542	6.188
H-512 90	4.563	3.071	3.837
H-513 90	7.04	5.592	5.38
H-512 90	5.617	4.804	5.581
H-513 90	4.651	3.884	3.437
Promedio	5.968	4.696	5.153

4.4.4. Interacción distancia entre surcos por distancia entre plantas

En los años 1999 y 2000, se tuvo una diferencia altamente significativa para esta interacción, encontrándose que los mejores resultados de IAF, se lograron tener con las distancias de plantas de 20 y 40 cm para las tres distancias entre surcos (70, 80 y 90cm). El comportamiento señalado se presenta en la Figura 6, en la que principalmente se observa que en los dos años, la distancia de 70 cm entre surcos tuvo los valores más altos de IAF (3.5), con las dos distancias entre plantas (20 y 40 cm) y que con la distancia de 90cm entre surcos, los valores disminuyen drásticamente, aunque las mejores distancias entre plantas sean las de 20 cm.

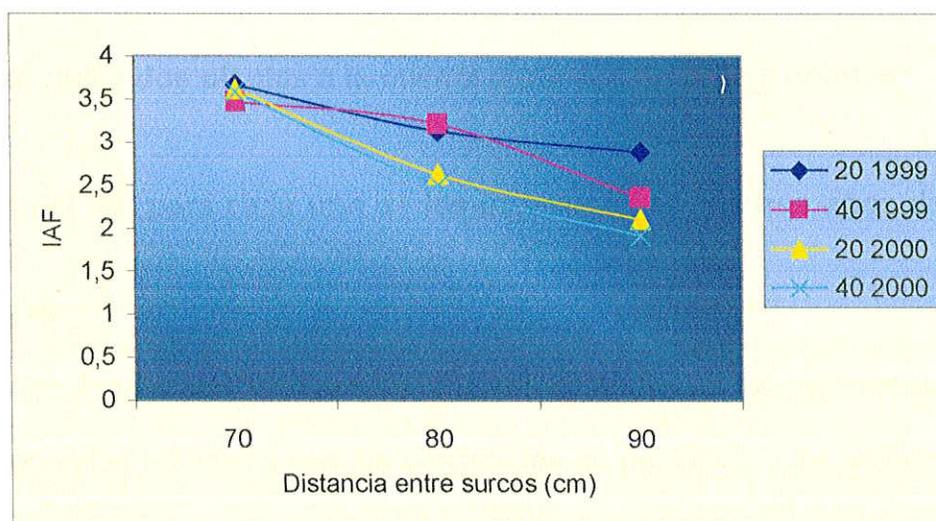


Figura 6. Interacción de la distancia entre surcos por distancia entre plantas

4.5. IAF promedio por genotipo y número de plantas por mata en los tres años

En la figura 7, se observa que los valores de IAF con una y dos plantas para los dos genotipos evaluados fueron similares, lo cual indica que el utilizar cualquiera de las dos opciones, no impactaría en cambios importantes en el

comportamiento del IAF. Algo que habría que señalar es que si se observan diferencias entre las densidades, ya que a medida que estas aumentan, los valores de IAF son mayores hasta en una unidad, lo cual era de esperarse, ya que al aumentar el número de plantas se incrementa el IAF.

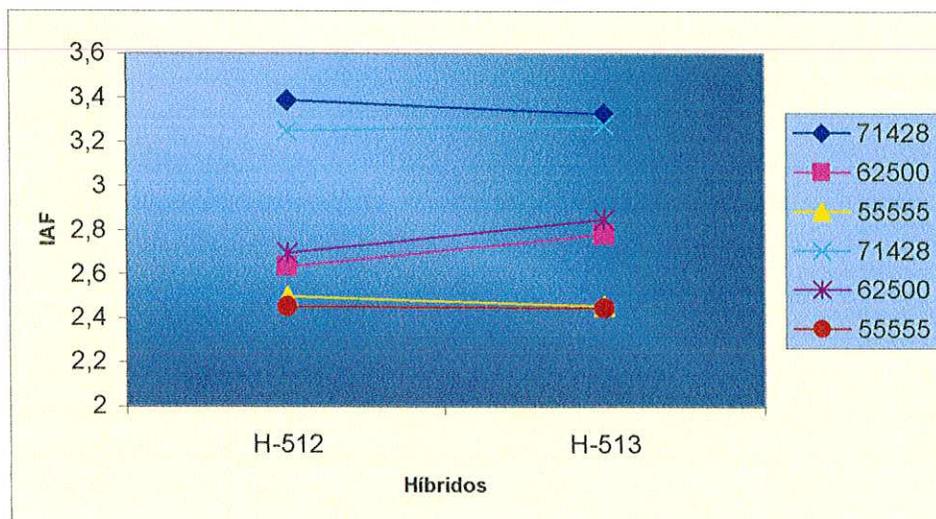


Figura 7. IAF en una y dos plantas a la misma densidad en dos genotipos

4.6. Modelación del IAF para cada uno de los muestreos en los tres años de estudio

4.6.1. Año de 1999

En el Cuadro 4, se presentan los resultados de cada uno de los parámetros del análisis de regresión obtenidos con las densidades de población y los valores del índice de área foliar, observándose que para el híbrido H-512 las pendientes en cada edad fisiológica durante todo el ciclo de cultivo, se encontraron en un rango de $4.14E-05$ a $6.07E-05$, con un valor promedio de $4.96E-05$, y una desviación estándar de $7.06E-06$. Con respecto al genotipo H-513, el rango de pendientes del IAF fue de $2.44E-05$ a $5.87E-05$, con un promedio de $4.3E-05$ y una desviación estándar de $1.06E-06$. Los datos para los dos genotipos indican que la

pendiente de la recta definida por las densidades de población da aumentos muy similares en IAF y que los modelos generados son semejantes para todos los muestreos. Es importante señalar que tanto los coeficientes de correlación como los de determinación desde el punto de vista estadístico, tuvieron valores aceptables de 0.92 y 0.85 respectivamente.

Cuadro 4. Parámetros de los análisis de regresión para cada edad fisiológica de muestreo en 1999.

	Ed fis 0.67	0.81	0.92	1.11	1.31	1.55	1.71	1.91	2
H-512									
Cof correl	0.94	0.98	0.95	0.93	0.91	0.93	0.94	0.93	0.92
Coef X 1	4.14E-05	4.94E-05	4.75E-05	6.07E-05	5.30E-05	5.65E-05	5.21E-05	4.75E-05	3.80E-05
Coef. Deter	0.89	0.96	0.89	0.87	0.84	0.87	0.88	0.87	0.85
H-513									
Cof correl	0.93	0.93	0.95	0.96	0.95	0.93	0.94	0.93	0.93
Coef X 1	2.44E-05	5.08E-05	4.01E-05	5.08E-05	4.33E-05	5.87E-05	4.58E-05	3.55E-05	3.73E-05
Coef. Deter	0.87	0.87	0.90	0.93	0.91	0.86	0.88	0.87	0.87

4.6.2. Año 2000

En el Cuadro 5, se presentan los valores de cada uno de los parámetros del análisis de regresión, teniéndose que los valores de la pendiente durante el ciclo de cultivo, para el híbrido H-512 se ubicaron en un rango de 1.45E-06 a 6.26E-05, con un valor promedio de 3.94E-05 y una desviación estándar de 2.3E-05, en tanto que para H-513, el rango fue de 1.81E-06 a 7.61E-05, con un promedio de 3.96E-05 y una desviación estándar de 2.9E-06. Como elementos relevantes se puede señalar que los datos promedio de la pendiente fueron similares para ambos genotipos, de lo cual se puede señalar que a través de aumentos constantes de densidad de población se logran aumentos iguales en el IAF.

Cuadro 5. Parámetros de los análisis de regresión para cada edad fisiológica de muestreo en el 2000.

	Eñ 0.34	0.48	0.6	0.73	1.0	1.2	1.4	1.6	1.81	2
H-512										
Coef correl	0.94	0.93	0.95	0.96	0.96	0.97	0.96	0.99	0.95	0.96
Coeficien X 1	1.45E-06	2.08E-06	1.93E-05	4.38E-05	5.38E-05	5.45E-05	5.81E-05	6.26E-05	5.11E-05	4.71E-05
Coef determ	0.89	0.87	0.91	0.92	0.93	0.94	0.92	0.97	0.91	0.92
H-513										
Coef correl	0.94	0.93	0.94	0.97	0.95	0.96	0.94	0.98	0.95	0.94
Coeficien X 1	1.81E-06	6.79E-06	1.44E-05	4.26E-05	6.63E-06	7.35E-05	7.61E-05	6.40E-05	5.42E-05	5.58E-05
Coef determ	0.89	0.87	0.88	0.93	0.91	0.92	0.89	0.97	0.91	0.88

4.6.3. Año 2001

Los valores de cada uno de los parámetros del análisis de regresión, se presentan en el Cuadro 6, observándose que las pendientes en cada una de las edades fisiológicas muestreadas durante el ciclo de cultivo, para el híbrido H-512, se ubicaron en un rango de 1.16E-07 a 7.86E-05, con un valor promedio de 4.17E-05 y una desviación estándar de 3.25E-05; mientras que para H-513, el rango obtenidos fue de 1.72E-07 a 6.66E-05, con un promedio de 3.95E-05 y una desviación estándar de 2.71E-06. Al igual que en los dos años anteriores, los datos promedio de la pendiente para ambos genotipos fueron similares, lo cual da una idea de consistencia en el comportamiento de los valores de IAF, en función de las densidades de población durante los tres años del estudio.

Cuadro 6. Parámetros de los análisis de regresión para cada edad fisiológica de muestreo en el 2001.

	Eñ 0.2	0.32	0.46	0.6	0.72	0.85	0.98	1.17	1.39	1.61	1.81	2
H-512												
Coefic. correl	0.95	0.96	0.96	0.95	0.95	0.96	0.95	0.95	0.97	0.98	0.98	0.95
Coefic X1	1.16E-07	1.15E-06	3.18E-06	8.54E-06	2.12E-05	5.07E-05	5.00E-05	6.25E-05	7.71E-05	7.24E-05	7.49E-05	7.86E-05
Coefic determ	0.89	0.91	0.91	0.91	0.91	0.92	0.90	0.91	0.95	0.95	0.96	0.91
H-513												
Coefic. correl	0.95	0.92	0.94	0.95	0.95	0.97	0.95	0.94	0.97	0.98	0.99	0.97
Coefic X1	1.72E-07	1.18E-06	4.60E-06	1.61E-05	2.77E-05	5.47E-05	6.49E-05	5.67E-05	6.01E-05	6.60E-05	6.24E-05	5.92E-05
Coefic determ	0.91	0.85	0.89	0.91	0.90	0.94	0.91	0.89	0.94	0.97	0.98	0.95

4.7. Modelos de IAF en edad fisiológica (0.5) y floración (1.0)

Con los valores de IAF en ambas etapas de desarrollo del cultivo, se generaron modelos que explican el comportamiento de ambos genotipos (Cuadro 7), con valores en cierto grado contrastantes de pendiente en 1999 en edad fisiológica (0.5) y muy similares en los tres años en la edad fisiológica 1.

Cuadro 7. Modelos de IAF en función de la densidad de población en edades fisiológicas (0.5) y (1.0).

Genotipo	1999	2000	2001
Ed fis 0.5 H-512	$Y = -0.325 + 4.13E-05 (X)$	$Y = -0.171 + 1.92E-05 (X)$	$Y = -0.005 + 3.17E-06 (X)$
Ed fis 0.5 H-513	$Y = 0.159 + 2.44E-05 (X)$	$Y = 0.034 + 1.44E-05 (X)$	$Y = -0.19 + 4.6E-06 (X)$
Ed Fis 1 H-512	$Y = 0.774 + 4.75E-05 (X)$	$Y = 0.133 + 5.37E-05 (X)$	$Y = -0.274 + 6.25E-05 (X)$
Ed Fis 1 H-513	$Y = 0.622 + 4.01E-05 (X)$	$Y = 0.55 + 6.62E-05 (X)$	$Y = 0.191 + 5.67E-05 (X)$

En la figura 8, se presenta el comportamiento de IAF con los modelos generados para la edad fisiológica (0.5), observándose que los valores más altos de IAF se tuvieron en el año de 1999, producto de las mejores condiciones climáticas, especialmente de precipitación). El año 2001, se presentaron los valores más bajos de IAF y en el 2000 y 2001 ambos híbridos tuvieron un comportamiento similar para esta edad fisiológica (0.5).

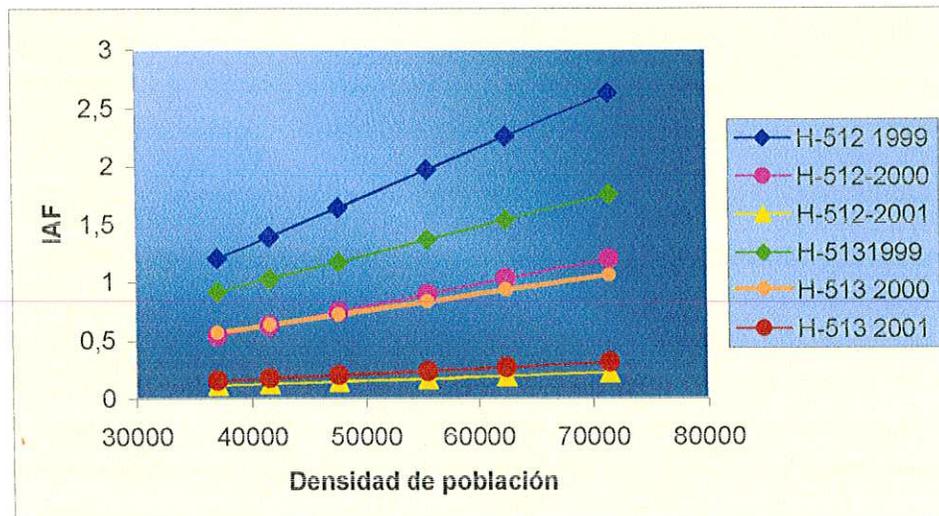


Figura 8. Comportamiento del IAF con los modelos generados para la edad fisiológica (0.5).

En la figura 9, se observa un comportamiento más uniforme del IAF en cada una de las densidades de población, en especial a partir de las 60 000 plantas por hectárea. El comportamiento del IAF en esta etapa coincide con lo señalado por Williams et al. 1988, quien indica que en esta etapa el crecimiento y expansión de hojas se explican como una función lineal.

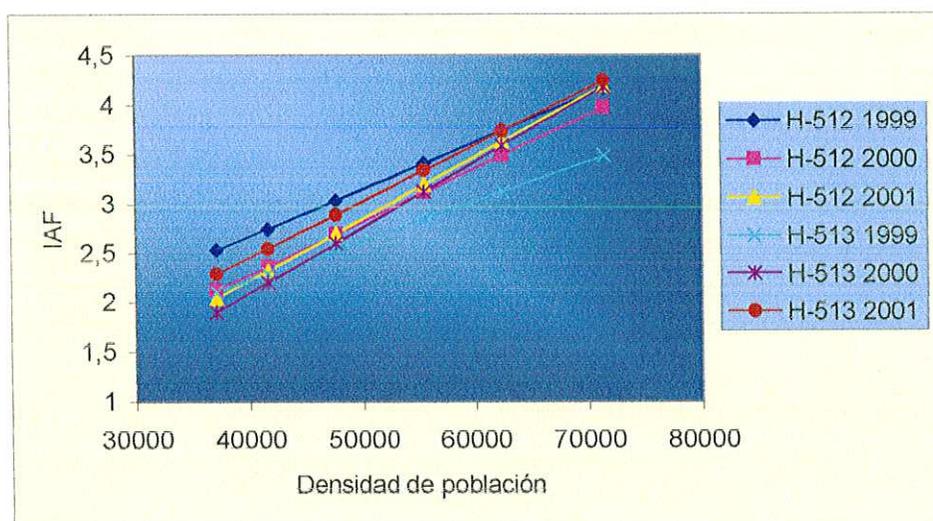


Figura 9. Comportamiento del IAF con los modelos generados para la edad fisiológica (1.0).

4.8. Modelos anuales y de los tres años, que explican el IAF en función de la densidad de población

En el Cuadro 8, se presentan los modelos que explican el IAF para la etapa de floración en función de la densidad de población para cada uno de los años. Así mismo el modelo más completo, que integra la información de los tres años, en el que al correr el análisis de regresión, genera el modelo lineal $y = -0.1897 + 5.866.0E-05(x)$, con un coeficiente de correlación de 0.93, un coeficiente de determinación de 0.87 y el error típico más bajo de $0.03E-04$. Se puede considerar que esta ecuación podría ser incluida en un modelo de simulación durante la etapa de floración, para estimar los valores de IAF que alimentarán a dicho modelo, con solo incluir la densidad de población o número de plantas por metro cuadrado. Es importante señalar que los valores tanto de la pendiente como de la intercepción de las cuatro ecuaciones de regresión son muy parecidos y su similitud se puede constatar en la figura 10, en la cual se observa que los valores de IAF estimados son semejantes en cada una de las densidades de población y que los valores máximos en la etapa de floración ($IAF > 4$), se obtuvieron con 70,000 plantas por hectárea.

Cuadro 8. Modelo propuesto para definir el comportamiento del IAF con los valores de los tres años.

Año	Modelo	Coeficiente correlación	Coeficiente determinación	Error típico	Valor de F
1999	$Y = -0.01546 + 5.576E-05(x)$	0.88	0.78	7.7E-06	1.1E-06
2000	$Y = -0.20927 + 6.022E-05(x)$	0.95	0.90	4.8E-06	1.2E-09
2001	$Y = -0.20062 + 5.745E-05(x)$	0.94	0.89	5.0E-06	4.0E-09
3 años	$Y = -0.18973 + 5.8662E-05(x)$	0.93	0.87	3.1E-06	2.2E-24

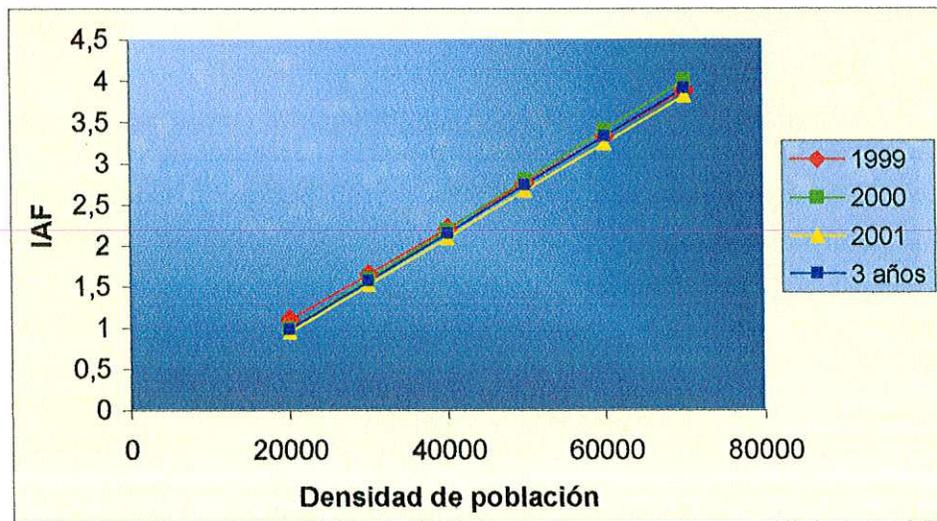


Figura 10. Relación entre el índice de área foliar y la densidad de población

4.9. Validación del modelo que explica el IAF, con datos del año 2005, de 22 parcelas de productores del sur de Veracruz

Durante el año 2005, en 22 parcelas de productores del sur de Veracruz, se determinó para 66 sitios de muestreo, la densidad de población, la cual fue incluida en el modelo generado, obteniendo un IAF estimado. Posteriormente los valores estimados se compararon los obtenidos en los monitoreos de campo, encontrando de acuerdo a medias de tendencia central y dispersión, un ajuste aceptable, ya que los valores promedio de IAF estimados y los reales fueron iguales con 1.81, con una desviación estándar para el estimado de 0.51 y de 0.61 para el valor real. Así mismo en la Figura 11, se representa su comportamiento, el cual muestra tendencias similares.

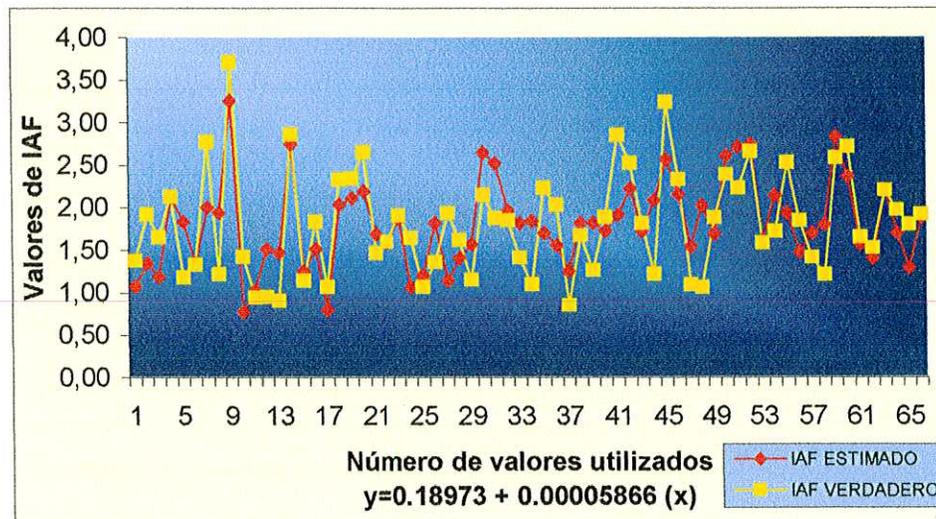


Figura11. Tendencia de los valores de IAF estimados con el modelo y los reales de 22 parcelas de productores del Sur de Veracruz. 2005.

4.10. Modelos del índice de área foliar sobre rendimiento en los tres años de estudio

En el cuadro 9, se presentan los modelos lineales generados que explican el rendimiento en función del índice de área foliar presente a la etapa de floración, observándose una alta similitud entre modelos ya que su pendiente se mantuvo en un rango muy estrecho de 0.61 a 0.72 y su constante de 3.443 a 4.117, con valores de correlación de 0.8 y coeficientes de determinación de 0.63 a 0.65. Estos resultados permiten aceptar que el modelo puede ser utilizado como una herramienta confiable para estimar o predecir el rendimiento en parcelas comerciales en desarrollo, específicamente en la etapa de floración, con un nivel de confiabilidad aceptable, como lo señala Báez-González *et al.* (2003), quienes utilizando imágenes de satélite encontraron que mediante un modelo con base en el Índice de área foliar, se puede predecir el rendimiento del cultivo del maíz.

Cuadro 9. Modelos de regresión con los valores del IAF en floración sobre el rendimiento.

AÑO	MODELO	R2
1999	$Y = 4.1779 + 0.6107 (x)$	0.68
2000	$Y = 3.443 + 0.644 (x)$	0.64
2001	$Y = 3.79 + 0.726 (x)$	0.63

4.11. Efecto del índice del área foliar sobre el rendimiento 1999

El análisis de regresión realizado con los índices de área foliar y los rendimientos correspondientes, dio como resultado un modelo lineal el que se presenta en la Figura 12, cuya ecuación de regresión es: $y = 4.11779 + 0.6107$ (IAF), lo que indica que por cada unidad de aumento del índice de área foliar se podría esperar tener un incremento de 610 kg ha^{-1} de maíz, dentro del rango explorado. Cabe señalar que el análisis estadístico de la regresión muestra un coeficiente de correlación de 0.81 y un coeficiente de determinación de 0.65.

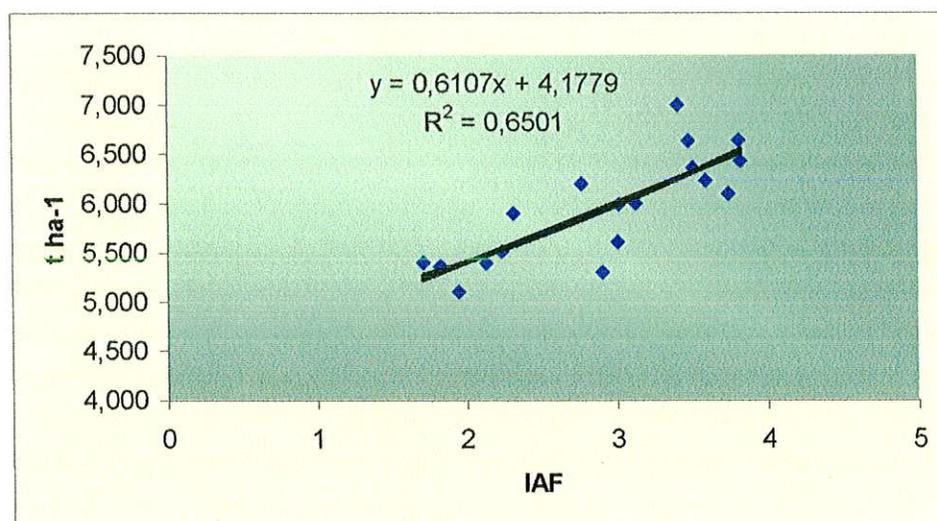


Figura 12. Relación del índice de área foliar sobre el rendimiento obtenido durante 1999, en Acayucan, Ver.

4.12. Efecto del índice del área foliar sobre el rendimiento en el año 2000

El análisis de regresión generado dio como resultado un modelo lineal que se representa en la Figura 13, donde la ecuación de regresión es: $y = 3.4435 + 0.6442$ (IAF), que significa que en el rango explorado, por cada unidad de aumento del IAF se obtiene un incremento de 644 kg ha^{-1} de maíz. Los valores del coeficiente de correlación fueron 0.84 y del coeficiente de determinación 0.65. Es importante hacer notar que la pendiente de la regresión fue similar a la obtenida en el año de 1999.

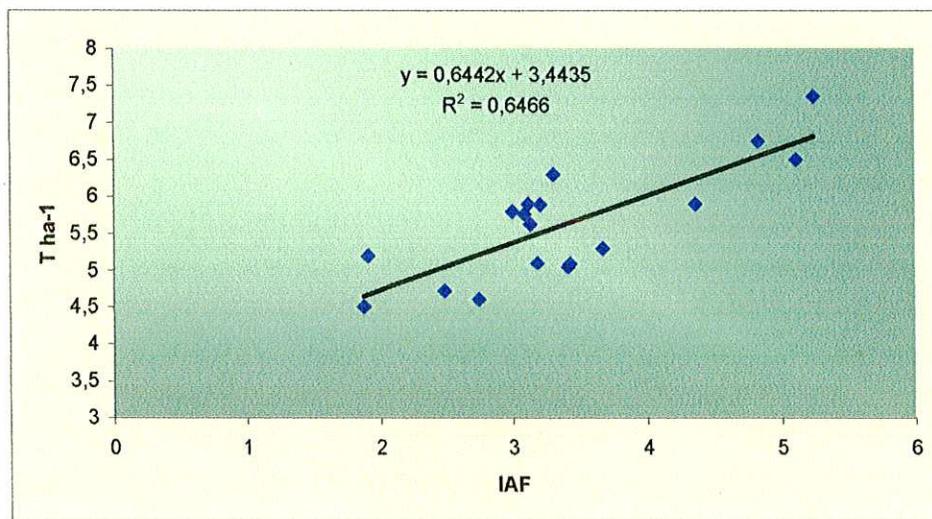


Figura 13. Relación del índice de área foliar sobre el rendimiento durante el año 2000, en Acayucan Ver.

4.13. Efecto del índice del área foliar sobre el rendimiento 2001

El modelo obtenido se presenta en la figura 14, con una ecuación representada por $Y = 3.79 + 0.726$ (x), el análisis estadístico de la regresión registró un coeficiente de correlación de 0.8 y un coeficiente de determinación de 0.63.

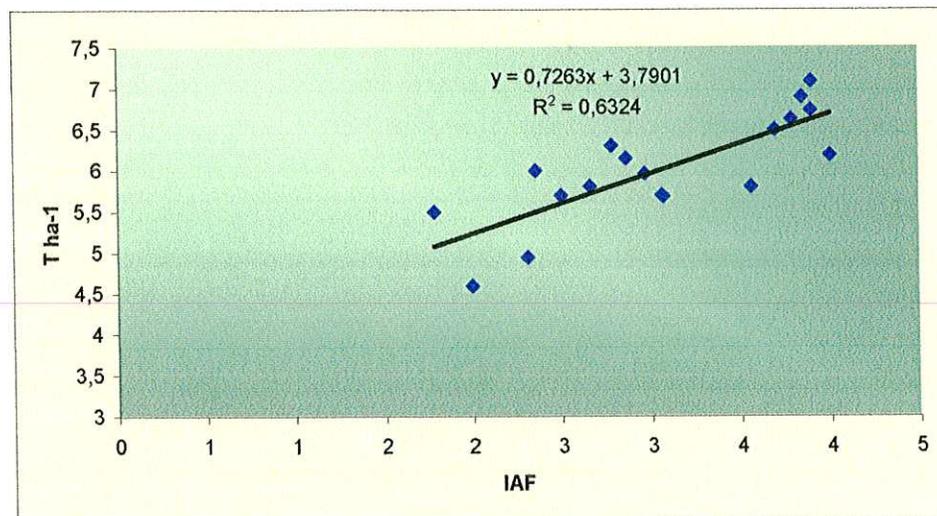


Figura 14. Relación del índice de área foliar sobre el rendimiento durante el año 2001, en Acayucan Ver.

4.14. Efecto del índice del área foliar sobre el rendimiento con los datos de los tres años

El análisis de regresión dio como resultado un modelo lineal que se representa en la Figura 15, en donde se observa que por cada unidad de aumento del índice de área foliar se obtiene un incremento de 567 kg ha⁻¹ de maíz. Con un coeficiente de correlación múltiple de 0.69 y un coeficiente de determinación de 0.48.

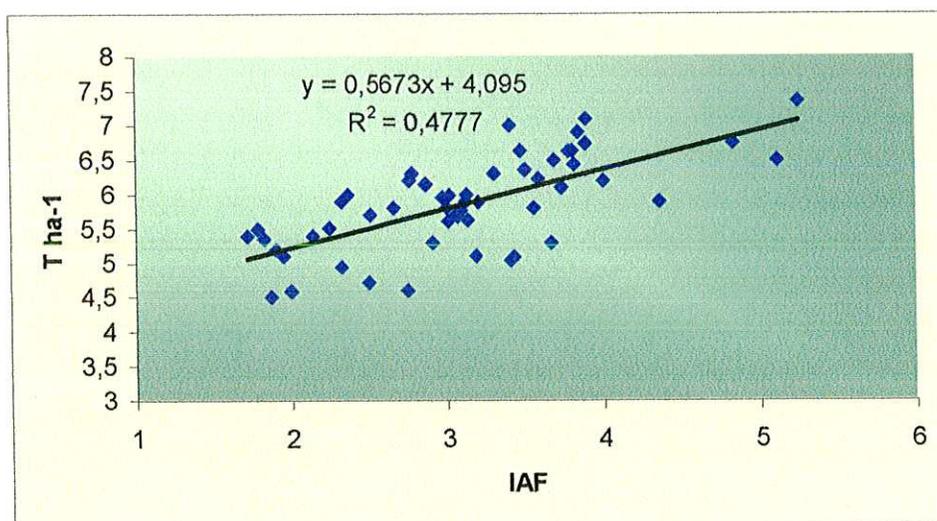


Figura 15. Relación del índice de área foliar sobre el rendimiento en los tres años de estudio.

4.15. Comportamiento del rendimiento durante los tres años de estudio

Después de analizar y modelar el IAF, se considera importante conocer el comportamiento de rendimiento y comparar el efecto del IAF sobre los factores de estudio. En el cuadro 10, se presenta los niveles de significancia de los cuadrados medios para la variable rendimiento, de distancia entre surcos, distancia entre matas y las interacciones en los tres años de estudio. Los resultados indicaron que la distancia entre surcos, distancia entre matas y la interacción híbridos por distancia entre surcos mostraron diferencia estadística al 1% en 1999; al mismo nivel de significancia lo fueron los dos primeros en 2000 y el tercero sólo el 5%; en 2001 el primero y el último lo fueron al 1% e híbridos por distancia entre surcos, la diferencia fue significativa al 5%. La interacción de híbridos por distancia entre plantas fue significativa al 1% en 2000. La interacción de distancia entre surcos por distancia entre plantas sólo fue significativa al 5% en el 2001, el resto de componentes del modelo no fueron significativos.

Cuadro 10. Nivel de significancia para la variable rendimiento, en la evaluación de híbridos, distancias de surcos y de plantas en Acayucan Ver.

Factores	1999	2000	2001
Híbridos	N.S.	N.S.	N.S.
Distancia de surcos	**	**	**
Híbridos x Distancia de surcos	**	**	*
Distancia plantas	**	*	**
Híbridos x Distancia de plantas	N.S.	**	N.S.
D. surcos x Distancia de plantas	N.S.	N.S.	*
Híbridos x D. Surcos x D. Plantas	N.S.	N.S.	N.S.

N.S. = No significancia * = Significancia al 5% de probabilidad
 ** = Alta significancia al 1 y 5% de probabilidad.

4.16. Los híbridos y su relación con el rendimiento

Al realizar el análisis de varianza para la variable rendimiento en grano durante los tres años, no se encontró diferencia estadística entre genotipos, y

aunque son materiales diferentes fenotípica y genéticamente, ambos demuestran una buena estabilidad en los diferentes ambientes (años de prueba), estos resultados son similares a los encontrados con la evaluación del IAF y con un estudio de híbridos de cruce simple y doble, en donde las diferencias en producción fueron similares en muchos de ellos y cuando hubo diferencias estas no sobrepasaron el rendimiento en 11% a favor de los materiales de cruce simple (Guillén et al., 2003).

4.17. Las distancias entre surcos y su relación con el rendimiento

Dentro de los efectos principales, se observaron diferencias altamente significativas para este factor, sobresaliendo la distancia de 70 centímetros con el mayor rendimiento 6.27, 6.44 y 6.29 t ha⁻¹ para los años 1999, 2000 y 2001 respectivamente. Las distancias de 80 y 90 centímetros en la prueba de comparación de medias mostraron igualdad estadística y que en comparación con el mejor tratamiento tuvieron un decremento de rendimiento de 7, 19 y 6% para 1999, 2000 y 2001 respectivamente. Los más altos rendimientos se explican por la mayor cantidad de plantas (71 428), que en su conjunto interceptan una mayor cantidad de luz y llegaron a realizar un uso más eficiente del agua y nutrientes como le reportan (Krall et al., 1997; Nafziger, 1996; Hodges and Evans, 1990; 1990; Bullock et al, 1988).

4.18. Las interacciones entre híbridos y distancias entre surcos sobre el rendimiento

Al analizar el comportamiento de los híbridos, a través de las distancias entre surcos, se observaron tendencias diferentes, en el caso del H-512, la mejor

distancia entre surcos fue de 70 cm con rendimientos de 6.1 y 6.1 t ha⁻¹ para 2000 y 2001 respectivamente, en 1999 no hubo diferencia estadística para la distancia de surcos con un rendimiento promedio de 5.9 t ha⁻¹. En relación con el H-513, este híbrido también tuvo la mayor producción con la menor distancia entre surcos (70 cm) durante 1999 y 2000; sin embargo, en 2001, no se registraron diferencias estadísticas, con un promedio de 6.4 t ha⁻¹. Como tendencia general se puede señalar que en ambos híbridos presentan su mejor comportamiento productivo con la distancia de 70 cm y que al ir aumentando la distancia entre surcos disminuye el rendimiento de forma lineal. En los tres años de evaluación, el genotipo H-513 con la distancia de 70 cm entre surcos superó en rendimiento al H-512. (Figuras 16 y 17).

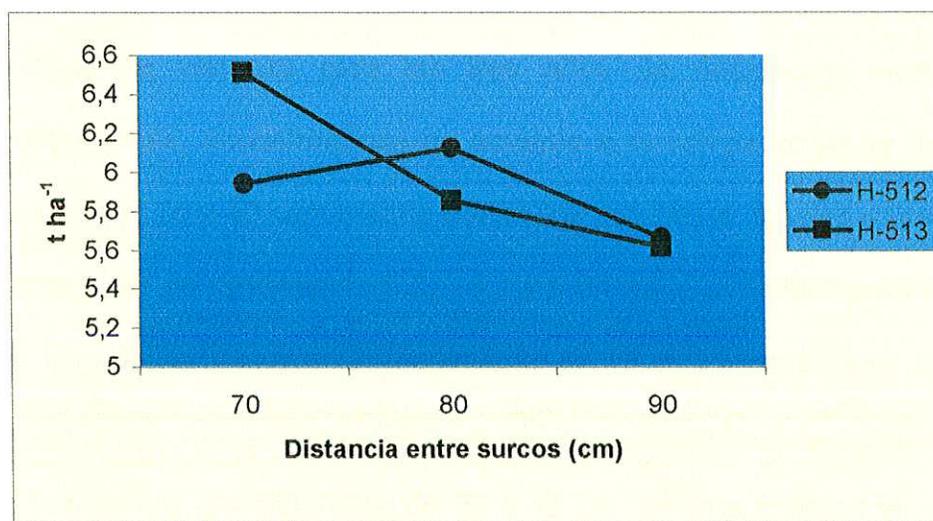


Figura 16. Comportamiento productivo de maíz, en la interacción entre híbridos y distancia de surcos durante 1999, en la localidad de Acayucan Ver.

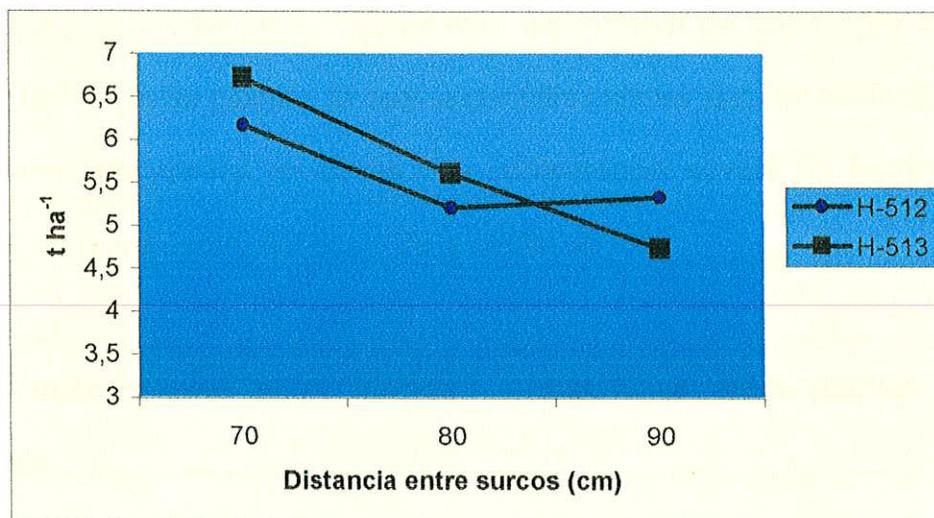


Figura 17. Comportamiento productivo de maíz, en la interacción entre híbridos y distancia de surcos durante el año 2000, en la localidad de Acayucan Ver.

4.19. Las distancias entre plantas y su relación con el rendimiento

4.19.1. Distancia de plantas

El análisis de varianza para los tres años de evaluación mostraron diferencias estadísticas, encontrándose de acuerdo a la comparación de medias que las distancias de 20 y 40 centímetros fueron las mejores e iguales entre ellas con valores promedio de rendimiento 6.2, 5.7 y 6.3 t ha⁻¹. La distancia de 60 cm entre plantas tuvo decrementos en el rendimiento en 13, 5, 3% para 1999, 2000 y 2001 respectivamente. Estos resultados se explican considerando que bajo todos los arreglos espaciales, las distancias de 20 y 40 centímetros tuvieron la misma densidad de plantas ha⁻¹, mientras que la distancia de 60, registró un 33% menos plantas que los mejores tratamientos. El comportamiento de la producción observada coincide en parte por el estudio realizado por Liu *et al.*, (2004), quien midió el efecto de las distancias de plantas, encontrando que no hay una

tendencia hacia el incremento o decremento del número de hojas para bajos y altos espaciamientos de plantas, lo cual le permitió concluir que las variaciones de espaciamientos de plantas no causa una competencia severa en términos de desarrollo fenológico dentro del dosel de la planta de maíz.

4.20. Las interacciones entre híbridos y distancias entre plantas en el rendimiento

4.20.1. Interacción híbrido y distancia de plantas (2000)

El análisis de varianza también mostró un efecto significativo de esta interacción y de acuerdo a la comparación de medias la mejor combinación se obtuvo con el híbrido H-512 y una distancia de plantas de 20 cm, mientras que para H-513 no se tuvieron diferencias (Figura 18).

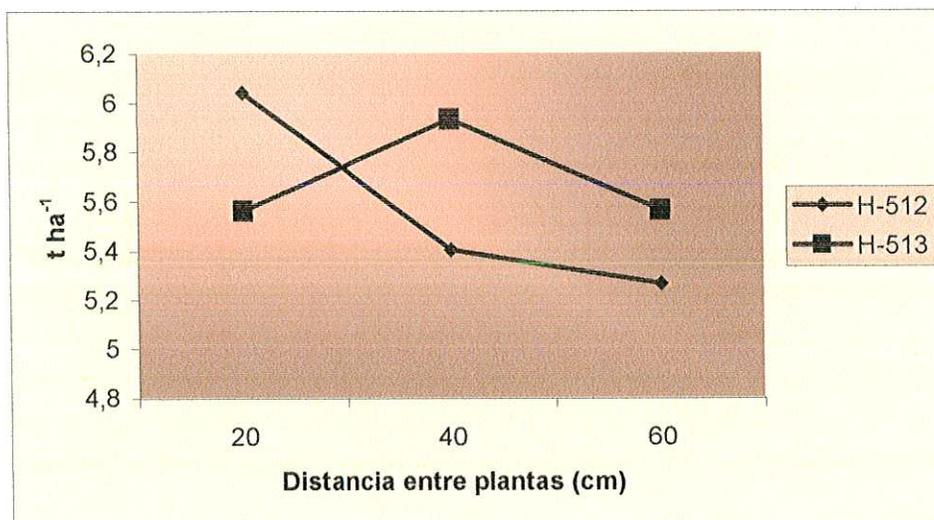


Figura 18. Interacción entre híbridos y distancia de plantas. Acayucan, Ver. 2000.

4.21. Las interacciones entre distancias entre surcos y distancias entre plantas en el rendimiento

4.21.1. Interacción distancia de surcos y distancia de plantas (2001)

Para Distancias de surcos de 70, 80 y 90 cm, la mejor combinación de plantas fue la de 20 y 40 cm. los valores anteriores indican que a medida que disminuye la densidad de población, también disminuye el rendimiento por hectárea. Considerando la distancia de plantas, cuando estas se siembran a 20 cm, se da una igualdad de rendimientos entre las tres distancias de surcos; sin embargo para 40 y 60 cm de plantas, los mejores valores se tuvieron con surcos a 70 y 80 cm (Figura 19).

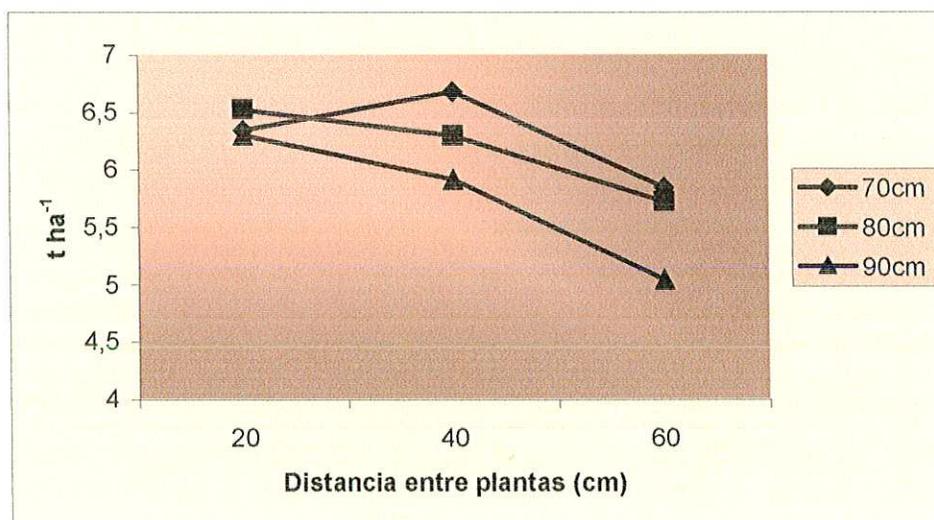


Figura 19. Efectos de la interacción distancia de surcos y distancia entre plantas. Acayucan, Ver. 2001.

5. CONCLUSIONES

A partir del análisis de las posibles variables que explicaran en la etapa de floración la magnitud del índice de área foliar bajo diferentes arreglos espaciales de plantas, se logró generar un modelo lineal en el que la densidad de población por su R^2 y menor error típico, fue la que mostró la mejor relación el IAF.

Mediante la realización de diferentes pruebas de ajuste a la tendencia de los datos de rendimiento en función de los índices de área foliar obtenidos en floración, se logró encontrar un modelo lineal que permite predecir los rendimientos en esa etapa fenológica.

Desde el punto de vista estadístico, los dos híbridos estudiados y la siembra de 1 y 2 plantas por mata generó valores de IAF similares; mientras que las distancias entre surcos de 70 y 80 cm combinados con 20 y 40 cm entre plantas mostraron los mejores valores de IAF, respaldando estos resultados las recomendaciones prácticas en la siembra del cultivo.

Los modelos generados que explican el IAF en función de la densidad de población para cada genotipo en etapa de floración, mostraron valores de IAF similares a partir de 60,000 plantas ha⁻¹.

Considerando la variable rendimiento, la distancia de 70 cm entre surcos y la separación entre plantas en 20 y 40 cm, mostraron los mejores valores de producción por hectárea.

6. LITERATURA CITADA

Alessi, J., J. F. Power, and D. C. Zimmerman. 1977. Sunflower yield and water use as influenced by planting date, population, and row spacing. *Agron. J.* 69:465-469.

Aracil J., 1977 Introducción a la dinámica de sistemas. Capítulo 2. pp 39-83.

Arkin, G.F., J. T. Ritchie, and S. J. Maas. 1978. A model for calculating light interception by a grain sorghum canopy. *Trans. ASAE* 21:333-308.

Báez G.A.D., P.Y.Chen, M. Tiscareño-López and R. Srinivasan. 2002. Using Satellite and Field Data with Crop Growth Modeling to Monitor and Estimate Corn Yield in Mexico *Crop Science* Vol. 42 No.6. 1943-1949.

Baez-Gonzalez A.D., J.R. Kiniry, S.J. Maas, M.L. Tiscareño, J. Macias C., J.L. Mendoza, C.W. Richardson, J. Salinas G. and J.R. Manjares. 2005. Agronomic Modeling. Large-Area Maize Yield Forecasting Using Leaf Area Index Based Yield Model. *Agron. J.* 97:418-425.

Baker, C.K., J.N. Gallagher, and J.L. Monteith. 1980. Daylength change and leaf appearance in winter wheat. *Plant, Cell Environ.* 3:285-287.

Birch C.J., G.L. Hammer, K.G. Rickert. 1998. Improved methods for predicting individual leaf area and leaf senescence in maize (*Zea mays*). *Aust. J. Agric. Res.* 49:249-262.

Boote, K.J., and R. S. Loomis. 1991. The prediction of canopy assimilation. p 109-140. In: K.J. Boote and R.S. Loomis (ed.) *Modeling crop Photosynthesis: from biochemistry to canopy*. Crop. Symp. CSSA and ASA, Anaheim, CA. 29 nov. 1988. CSSA Spec. Publ. 19. CSSA and ASA, Madison, WI.

Bullock, D.G., R.L. Nielsen, and W.E. Nyquist. 1988. A growth analysis comparison of corn grown in conventional and equidistant plant spacing. *Crop Sci.* 28:254-258.

- Chapman, S. C., G. L. Hammer, and H. Meinke. 1993. A sunflower simulation model: I. Model development. *Agron. J.* 85:725-735.
- Egharevba, P. N. 1975. Planting pattern and light interception in maize. p. 15-17. In *Proc. Physiology Program Formulation Workshop*, Ibadan, Nigeria. April 1975. IITA, Ibadan, Nigeria.
- Elings, A. 2000. Estimation of Leaf Area in Tropical Maize. *Agron. J.* 92: 436-444.
- Flenet F, J.R. J.E. Kiniry, M. Board, E. Weasgate and D.C. Reicosky. 1996. Row spacing effects on light extinction coefficients of corn, sorghum, soybean and sunflower. *Agronomy journal* 88 185-190.
- Forrester J.W. 1971. *Principles of Systems*. Productive press. Cambridge Mass.
- Francis C.A., J.N. Rutger, A.F.E. Palmer. 1969. A rapid method for plant leaf area estimation in maize (*Zea mays* L.). *Crop Sci.* 9:537-539.
- García E. 1968. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto Nacional de Geografía. UNAM. México.
- Goudriaan, J. And Van Laar H.H. 1994. *Modelling potential Crop Growth Processes*. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. 119p.
- Guillén-Portal, F.R., W.K. Russel, D.D. Baltensperguer, K.M. Esridge, N.E. D´Croz-Mason, and L.A. Nelson. 2003. Best Types of Maize Hybrids for the Western High Plains of the USA. *Crop Sci.* 43; 2065-2070
- Heemst, H.D.J. and H. Van Keulen. 1986. Potencial crop production in H Van Keulen and J Wolfeds. "Modeling of agricultural production : weather soils and crops. Pudoc Wagenigen.
- Heemst, H.D.J. 1988. Plant data values required for simple crop growth processes. Kluwer Academic Publishers. Simulation Report nr. 17 by Centre for Agrobiological Research and Department of theoretical Production Ecology, Agricultural university. Wageningen. Netherland 119 p.
- Hodges, T., and D.W. Evans. 1990. Light interception model for estimating the effects of row spacing, on planta competition in maize. *J. Prod. Agric.* 3:190-195.
- INIFAP. 1993. Determinación del potencial productivo de especies vegetales para el estado de Veracruz. Síntesis ejecutiva. Veracruz, México. 32p.

Jones, C.A. And J.R. Kiniry. Eds. 1986. CERES-Maize. A simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A &M. Univ. Press. College Station. TX.

Jones, C.A. J.R. Kiniry., and J.R. Williams. 1990. Simulation Models of Maize Growth and Development. International advance course. Maize greeding, production processing and marketing in mediterranean countries. Belgrade Yugoslavia p. 309-321.

Karlen, D.L., and C.R. Cam. 1985. Row spacing, plant population, and water management effects on corn in the Atlantaic coastal plain. Agron. J. 77:393-398.

Kiniry , J.R. , R. Blancher, J.R. Williams, V. Texier. C.A. Jones, and M. Cabelguenne. 1992. Simulation sunflower with the EPIC and ALMANAC models. Fields Crops Res. 30:403-423.

Krall, J.M., R.J. Esechie, S. Raney, G. Clark, G. TenEyck, M. Lundquit, N.E. Humburg, L.S. Axthelm, A.D.Dayton, and R.L. Vanderlip. 1997. Influence of within-row variability in plant spacing on corn grain yield. Agron. J. 60:797-799.

Lal K.N., M.S. Subba R. 1951. A rapid method of leaf area determination. Nature (London) 167:72.

Liu W., M. Tollenaar, G. Steward, and W. Deen. 2004. Within-Row Plant Spacing Variability Does Not Affect Corn Yield. Agron. J. 96:275-280

MacGowan, M.,H.M. Taylor, and J. Willingham. 1991. influence of rows spacing on growth, light and water use by sorghum. J. Agric. Sci. Camb. 116:329-339.

Monsi, M. and T. Saeki. 1953. Über den lichfaktor in den Pflanzengesellschaften und sein bedeutung für die Stoffproduktion. Japan J. Bot. 14:22-52.

Monteith J.L. 1977 Climate and the efficiency of crop production in Britain. Phil Trans. Res. Soc. London Ser. B. 281:277-329.

Montgomery E.G. 1911. Correlation studies in corn. Neb. Agric. Exp. Strn. Annu. Rep. 24:108-159.

Nafziger, E.D. 1994. Corn planting date and and plant density. J. Prod. Agric. 7:59-62.

Parvez, A. Q., F.P. Gardner, and K. J. Boote. 1989. Determinate – and indeterminate- type soybean cultivar responses to pattern, density an planting date. Crop Sci. 29:150-157.

Pearce R.B., J.H. Mock, T.B. Bailey. 1975. Rapid method for estimating leaf area per plant in maize. Crop Sci. 15:691-694.

Quijano, J. A. y Villarreal, E. F. 1991. Sistemas dinámicos en la modelación de cultivos. Manual para la estimación del potencial productivo pp. 1-23

Quijano C.J.A., J.A. Aguirre G. y E. Villarreal F. 1995. Using crop simulation models to Support agricultural research planning in México. In applying crop models and decision support systems. University of Florida. International Fertilizer Development Center.

Quijano, J. A. y Villarreal, E. F. 1998. Desarrollo de un modelo de simulación dinámica en la producción de maíz. Manual de capacitación para técnicos de extensión. pp.1-16.

Rosenthal, W.D., R.L. Vanderlip, B.S. Jackson, and G.F. Arkin 1989. SORKAM: A grain sorghum crop growth model. Texas Agric. Exp. Stn. Misc. Publi. MP-1669.

SAGARPA. Distrito de desarrollo Rural Jáltipan. 2005. Determinación de costos de producción del Cultivo de maíz y su rentabilidad. En acta de comité técnico del Consejo de Desarrollo Rural Sustentable. 10p.

SAS Institute. Inc. 1990. SAS/STAC. Versión 6. SAS Inst., Cary. NC.

SIAP. 2004. Informe de Avances de siembras. <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>

Sinclair, T.R. and T. Horie. 1989. Leaf nitrogen , photosynthesis, and crop radiation use efficiency. Crop Sci.. 29:90-98.

Spitters, C.J.T., and R. Aerts. 1983. Simulation of competition for light and water in crop-Weed associations. Aspects appl. Biol. 4:467-483.

Stewart D.W., L.M.Dwyer. 1999. Mathematical characterization of leaf shape and area of maize hybrids. Crop Sci. 39:422-427.

Stoskopf, N.C. 1981. Understanding Crop production. Reston Company. Virginia. U.S.A. 76p.

Tanaka A. y j. Yamaguchi. 1984. Producción de materia seca, componentes del rendimiento y rendimiento del grano de maíz. Traducida al español por Josué Kohashi Shibata. Centro de Botánica. Colegio de postgraduados. Chapingo México. 120p.

Tinoco A. C. A., F. A. Rodríguez M., J. A. Sandoval R., S. Barrón F., A. Palafox C., V. A. Esquema E., M. Sierra M., J. Romero M. 2002. Manual de producción de maíz y para los estados de Veracruz y Tabasco. INIFAP. CIRGOC. Campo experimental Papaloapan. Libro Técnico Número 9 Veracruz, México. 113p.

Tinoco A. C. A., F. A. Rodríguez M. J. A. 2005. Diagnóstico de los factores de manejo suelo y clima que limitan la producción de maíz en el sur de Veracruz. XVIII Reunión Científica Tecnológica Forestal y Agropecuaria. Veracruz Méx. 83-91p.

Wallace, D. H. et al 1972. Physiological Genetics of Crop Yield. Departments of plant breeding, and vegetable crops, Cornell University. Ithaca, New York. Pp 97-143.

Watson D.J. 1947. Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Ann. Bot. (London)* 41:41-76.

Wilhelm, W.W., F. Ruwe, and M.R. Schlemmer. 2000. Comparison of three leaf area index meters in corn canopy. In *Crop Sci.* 40:1179-1183.

Williams, J.R., C.A. Jones, J.R. Kiniry and D.A. Spanel. 1989. The EPIC crop growth model. *Transactions of the ASAE* 32(2):497-511.