



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

El sistema agroforestal Milpa Intercalada con
Árboles Frutales (MIAF): productividad y
optimización económica del maíz y frijol

ROCÍO ALBINO GARDUÑO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTORA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2014

La presente tesis, titulada **El sistema agroforestal milpa intercalada con árboles frutales (MIAF): productividad y optimización económica del maíz y frijol**, realizada por la alumna **Rocio Albino Garduño** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS
EDAFOLOGIA

CONSEJO PARTICULAR

Consejero: 
DR. JOSÉ ISABEL CORTÉS FLORES

Director de Tesis: 
DR. ANTONIO TURRENT FERNÁNDEZ

Asesora: 
DRA. MA. DEL CARMEN MENDOZA CASTILLO

Asesor: 
DR. MANUEL LIVERA MUÑOZ

Asesor: 
DR. ADRIÁN GONZÁLEZ ESTRADA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, agosto de 2014.

EL SISTEMA AGROFORESTAL MILPA INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES (MIAF): PRODUCTIVIDAD Y OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA DEL MAÍZ Y FRIJOL

Rocio Albino Garduño, Dra.

Colegio de Postgraduados, 2014.

El maíz (*Zea mays* L.) es la especie principal del sistema MIAF porque es estratégico para la seguridad alimentaria campesina. El maíz se cultiva en franjas alternas con especies de porte bajo como el frijol arbustivo (*Phaseolus vulgaris* L.), y árboles frutales. El sistema MIAF ha sido estudiado en cuanto a los rendimientos de grano y fruto de las especies componentes, pero poco en cuanto a sus interacciones biofísicas, particularmente entre el maíz y el frijol. En la primera parte de este estudio se evaluó el efecto del arreglo topológico (AT) del maíz y frijol, en la distribución de raíces y de la radiación fotosintéticamente activa (RFA); y la producción de biomasa durante el ciclo de cultivo de ambas especies. En la segunda, se analizaron los efectos del AT y de las dosis de N, P, K y densidad de población (D) en el rendimiento de grano de maíz (Y_m) en términos del contenido de proteína (ProtG), P y K. Finalmente en la tercera parte se determinó la mejor dosis de N, P, K, y D, según el ingreso neto (IN), eficiencia relativa de la tierra (ERT) y la eficiencia relativa de la ganancia (ERG). Los experimentos con maíz 'H-155' y frijol negro arbustivo '8025', ambos del INIFAP fueron conducidos en el Campo Experimental Valle de México "El Horno" en el año 2012 bajo condiciones de riego. El rendimiento más alto de grano de maíz con el mayor contenido de proteína, P y K se obtuvo con el AT un surco de maíz alternado con uno de frijol, en el cual el maíz tuvo mayor área de exploración radical, más RFA fue transmitida al nivel del suelo, y el periodo funcional de las hojas fue más largo. El mayor rendimiento se asoció con la proliferación de las plantas, el número de granos por hilera de la mazorca y el peso y tamaño del grano; sin embargo, en el frijol, el área de exploración radical, el rendimiento de grano, la biomasa y el índice de área foliar disminuyeron respecto a los otros AT. El mayor IN, ERT y ERG se obtuvieron con el AT dos surcos de maíz alternados con dos surcos de frijol.

Palabras clave: Cultivo intercalado, distribución de raíces, radiación fotosintéticamente activa, calidad del grano, eficiencia relativa de la tierra, ingreso neto.

THE AGROFORESTRY SYSTEM MILPA INTERCROPED WITH FRUIT TREES (MIFT): PRODUCTIVITY AND ECONOMIC OPTIMIZATION OF CORN AND BEAN

Rocio Albino Garduño, Dra.

Colegio de Postgraduados, 2014.

In agroforestry system MIFT, maize (*Zea mays* L.) is the species as a major component because it is strategic for food security of rural families. Maize, bush beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and fruit trees are cultivated in strip intercropping. Maize is planted either in strips of one or two rows alternating with strips of one or two rows of bush beans, for a total of six rows on each side of every row of fruit trees. MIFT system had been studied in terms of grain and fruit yields; however, knowledge on biophysical interactions between species component was lacking. Then maize and bush beans were studied including tree issues: a) root distribution of maize and bush beans, and distribution of PAR throughout growing season, as affected by alternating method of maize and beans strips, b) yield and quality of corn as affected by alternating method and fertilization with N, P, K, and planting density, and c) appropriate rates of N, P, K, and planting density in terms of net income, land equivalent ratio and relative profit ratio. Field experiments including maize ‘H-155’ and bush black beans ‘8025’ from INIFAP were conducted in the Campo Experimental Valle de Mexico, under irrigation conditions in 2012. Yield of corn grain and its content of protein and P and K were highest when maize was planted in strips of one row alternating with one row of bus beans. These results were associated to a higher exploration area of maize root system, more PAR was transmitted to ground level, and a later leaf senescing. Number of ears per plant, number of kernels per row in ear, and size of kernel also were highest; however, for bush beans, root exploration area was diminished, as well as, grain yield and leaf area index. Then, net income, land equivalent ratio and relative profit ratio were highest when maize was planted in strips of two rows alternating with two rows of bush beans.

Key words: Intercropping, root distribution, photosynthetically active radiation, grain quality, land equivalent ratio, net income.

Dedicado a:

Mis amados Horacio, Meztli y Citlalli, por un logro más juntos.

Mis padres Catalina Garduño y Patricio Albino, por la vida, su amor y ejemplo. A mis hermanos Aarón, Ana, Patricio, Sara, y Lesly; y a mi sobrina Alejandra, por su cariño y motivación.

La familia Santiago Mejía, este logro colectivo se debe a su cariño, confianza y apoyo.

Los Doctores José Isabel Cortés Flores y Antonio Turrent Fernández; hombres sabios y pilares de la ciencia agrícola en México. He sido privilegiada al tenerlos como maestros y su influencia ha sido determinante en mi pensamiento.

Los campesinos de México, deseando que esta investigación sea para su utilidad y un aporte a la ciencia.

AGRADECIMIENTOS

Al **Dr. José Isabel Cortés Flores** por su guía, amistad y oportuno consejo en mi formación académica. Al **Dr. Antonio Turrent Fernández** por permitirme ser su estudiante y por su ejemplo de lucha. A ambos les agradezco su ejemplo de profesionalismo y el tiempo dedicado en mi preparación académica.

A la **Dra. Carmen Mendoza Castillo** por su aprecio y aporte a la investigación. Al **Dr. Adrián González Estrada** por su asesoría. Al **Dr. Manuel Livera Muñoz** por los comentarios a este estudio. Al **Dr. Josué Kohashi Shibata** por el interés y seguimiento a esta investigación.

A mi familia Santiago Mejía, con gratitud por su apoyo determinante: **Jacinto, Célida, Angélica, Rafael, Natalia, Jany, Jaime, Tonatiuh, Ameyali, Ximena, Rocío, Miguel, Iyari, Andrea, Elizabeth, Estela, Jacinto, Yadira, Emiliano, Cosette, Sergio, Araceli, Minerva, Isabel, Sofía, Omar, Patricia, Salvador y Rubí.**

Reconozco el apoyo y motivación de amigos y compañeros: **Mario Valerio, María Luisa Hernández, Abelito, Juan Pablo Torres, Nery Rodríguez, Adriana Tapia, Laura García, Idelfonso Ronquillo, Eleazer Leal, Zury Carrera, Remedios Salinas, Teresa Salinas, Gabriela García, Daniela Galván, Odilón González, Micheline Dorcé, Aidé Avendaño, Aaron Pollak, Rosalba Piazza, Miriam Aldasoro, Raúl Pérez, Regina Aparicio, Araceli Espejel, Rosalba García, Margarita Hernández y Carlos Navarro.**

A los trabajadores de México, quienes con sus contribuciones apoyan a la formación de investigadores. A los trabajadores del Colegio de Postgraduados.

CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPÍTULO I: DISTRIBUCIÓN DE RAÍCES Y RADIACIÓN SOLAR Y BIOMASA EN MAÍZ Y FRIJOL INTERCALADOS	4
RESUMEN.....	5
INTRODUCCIÓN.....	6
MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
Sitio experimental.....	7
Diseño experimental.....	7
Manejo del cultivo.....	8
Variables medidas.....	9
Análisis resultados.....	11
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	12
Distribución de raíces.....	12
RFA, IAF y número de hojas.....	18
Biomasa.....	20
ERT.....	23
CONCLUSIONES.....	24
LITERATURA CITADA.....	25
CAPÍTULO II: RENDIMIENTO Y CALIDAD DEL GRANO DE MAÍZ INTERCALADO CON FRIJOL ARBUSTIVO EN FUNCIÓN DE TOPOLOGÍA, DENSIDAD DE POBLACIÓN Y FERTILIZACIÓN	28
RESUMEN.....	29
INTRODUCCIÓN.....	30
MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
Rendimiento de grano de maíz.....	34

Calidad del grano de maíz.....	38
CONCLUSIONES.....	43
LITERATURA CITADA.....	43
CAPÍTULO III: OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA DE N, P, K Y DENSIDAD DE POBLACIÓN EN MAÍZ Y FRIJOL INTERCALADOS.....	46
RESUMEN.....	47
INTRODUCCIÓN.....	48
MATERIALES Y MÉTODOS.....	49
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	54
CONCLUSIONES.....	60
LITERATURA CITADA.....	60
CONCLUSIONES GENERALES.....	63
LITERATURA CITADA EN LA INTRODUCCIÓN GENERAL.....	64

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO I: DISTRIBUCIÓN DE RAÍCES Y RADIACIÓN SOLAR Y BIOMASA EN MAÍZ Y FRIJOL INTERCALADOS

	Página
Cuadro 1. Efecto del arreglo topológico en el porcentaje RFA transmitida al suelo (RFA _{ts}) ocupado por el maíz y frijol, de acuerdo al arreglo topológico, durante el ciclo de cultivo.....	18
Cuadro 2. Rendimiento de grano y rastrojo del maíz 'H 155' en tres arreglos topológicos, a los 221 DDS.....	22

CAPÍTULO II: RENDIMIENTO Y CALIDAD DEL GRANO DE MAÍZ INTERCALADO CON FRIJOL ARBUSTIVO EN FUNCIÓN DE TOPOLOGÍA, DENSIDAD DE POBLACIÓN Y FERTILIZACIÓN

	Página
Cuadro 1. Lista de tratamientos de parcela chica establecidos en los arreglos topológicos CSM, MMFF y MFMF.....	33
Cuadro 2. Ecuación del rendimiento de grano de maíz (t ha ⁻¹) desglosada en una matriz bidimensional para mostrar el efecto del N, P, K, D y arreglos topológicos.....	35
Cuadro 3. Ecuaciones de regresión de los componentes del rendimiento y P en grano del maíz 'H-155' en función de la respuesta al arreglo topológico N, P, K y densidad de población.	37
Cuadro 4. Ecuación del contenido de proteína en el grano de maíz, desglosada en una matriz bidimensional que muestra el efecto del N, P, K, D y arreglo topológico.	40

CAPÍTULO III: OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA DE N, P, K Y DENSIDAD DE POBLACIÓN EN MAÍZ Y FRIJOL INTERCALADOS

	Página
Cuadro 1. Lista de tratamientos de parcela chica probados en los arreglos topológicos MM-FF, MMFF y MFMF.	51
Cuadro 2. Lista de precios, del año 2012, considerados en el cálculo de la dosis óptima económica.....	52
Cuadro 3. Ecuaciones de regresión del ingreso neto, rendimiento de grano y de rastrojo de maíz y grano de frijol.	54
Cuadro 4. Optimización de N, P, K y densidad de plantación en tres arreglos topológicos de maíz y frijol arbustivo, basada en la mayor ganancia.....	55
Cuadro 5. Valores máximos y mínimos observados de eficiencia relativa de la tierra (ERT) en cultivo de maíz y frijol arbustivo en MMFF, y sus respectivos valores de eficiencia relativa de la ganancia, ingresos netos, rendimiento de grano y rastrojo de maíz y grano de frijol.....	58

Cuadro 6. Valores máximos y mínimos observados de eficiencia relativa de la tierra (ERT) en cultivo de maíz y frijol arbustivo en MFMF, y sus respectivos valores de eficiencia relativa de la ganancia, ingresos netos, rendimiento de grano y rastrojo de maíz y grano de frijol	59
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I: DISTRIBUCIÓN DE RAÍCES Y RADIACIÓN SOLAR Y BIOMASA EN MAÍZ Y FRIJOL INTERCALADOS

	Página
Figura 1. Arreglos topológicos evaluados: FF = cultivo simple de frijol, MM = cultivo simple maíz, MMFF = dos surcos de maíz alternados con dos de frijol, MFMF = un surco de maíz alternado con uno de frijol.	8
Figura 2. Distribución radical de frijol negro '8025' en cultivo simple a los 71 (A) y 118 (B) DDS.....	14
Figura 3. Distribución radical de maíz 'H 155' en cultivo simple, a los 71 (A), 118 (B) y 164 (C) DDS.....	15
Figura 4. Distribución radical de maíz 'H 155' y frijol negro '8025' intercalados MMFF a los 71 (A), 118 (B) y 164 (C) DDS.....	16
Figura 5. Distribución radical de maíz 'H 155' y frijol negro '8025' intercalados MFMF a los 71 (A), 118 (B) y 164 (C) DDS.	17
Figura 6. Índice del área foliar de plantas de frijol (A) negro '8025' y maíz (B) 'H155' en función del tiempo en tres arreglos topológicos: MM=cultivo simple de maíz, MMFF= intercalados dos surcos de maíz seguidos de dos de frijol y MFMF= intercalado un surco de maíz seguido de uno de frijol..	19
Figura 7. Efecto del arreglo topológico en la producción de biomasa de (A) frijol y (B) maíz en cinco fases del ciclo de cultivo.....	21

CAPÍTULO II: RENDIMIENTO Y CALIDAD DEL GRANO DE MAÍZ INTERCALADO CON FRIJOL ARBUSTIVO EN FUNCIÓN DE TOPOLOGÍA, DENSIDAD DE POBLACIÓN Y FERTILIZACIÓN

	Página
Figura 1. Efecto de la interacción P x D x arreglo topológico (AT) en el rendimiento observado de grano de maíz. A y B) Interacción P x AT en densidad de población baja (34500 plantas 0.5 ha ⁻¹) y alta (40500 plantas 0.5 ha ⁻¹), respectivamente. C y D) Interacción D x AT en dosis baja de P (15 kg de P ₂ O ₅ 0.5 ha ⁻¹) y alta (45 kg de P ₂ O ₅ 0.5 ha ⁻¹), respectivamente.....	36
Figura 2. Proliferación observada del maíz en función del arreglo topológico a 60-15-10 kg en 0.5 ha ⁻¹ de N-P ₂ O ₅ -K ₂ O y 34500 plantas en 0.5 ha ⁻¹	39

Figura 3.	Interacción P x K x arreglo topológico (AT) en la proliferación del maíz. A y B) Interacción P x AT a dosis baja de K (15 kg de K ₂ O ha ⁻¹) y alta (45 kg de K ₂ O ha ⁻¹), respectivamente. C y D) interacción K x AT a dosis baja de P (10 kg de P ₂ O ₅ ha ⁻¹) y alta (30 kg de P ₂ O ₅ ha ⁻¹), respectivamente.....	39
Figura 4.	Contenido de proteína estimado en grano de maíz 'H-155' en función de la densidad de población en dos arreglos topológicos a 60-15-10 kg de N-P ₂ O ₅ -K ₂ O en 0.5 ha ⁻¹	41
Figura 5.	Contenido de proteína (ProtG), de P y de K en el grano de maíz 'H-155' en tres arreglos topológicos con aplicación de 60-15-10 kg en 0.5 ha ⁻¹ de N-P ₂ O ₅ -K ₂ O y sembrado a 34500 plantas en 0.5 ha ⁻¹	41

CAPÍTULO III: OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA DE N, P, K Y DENSIDAD DE POBLACIÓN EN MAÍZ Y FRIJOL INTERCALADOS

	Página
Figura 1. Arreglos topológicos evaluados como parcela grande: A) monocultivo de maíz y frijol (MM-FF), B) dos surcos de maíz alternados con dos de frijol (MMFF) y C) un surco de maíz alternado con uno de frijol (MFMF).	50

INTRODUCCIÓN GENERAL

El sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) es una tecnología agroforestal, basada en el rediseño de la milpa tradicional, para las condiciones actuales de la agricultura campesina (Cortés *et al.*, 2012). Sus componentes son maíz, especies de porte bajo que le permiten la entrada de radiación fotosintéticamente activa (RFA), árboles frutales y otras especies de la milpa, intercaladas en franjas de surcos alternos. El maíz es la especie de mayor importancia en el sistema MIAF, porque es estratégico para la seguridad alimentaria de la familia campesina. El arreglo espacial de las especies componentes está diseñado para obtener altos rendimientos de buena calidad de cada especie (Santiago-Mejía *et al.*, 2008; Torres *et al.*, 2008).

El cultivo intercalado tiene varios objetivos: 1) la maximización en el uso de recursos (espaciales, temporales y físicos) como agua, luz y nutrimentos; 2) la mejora en la calidad y cantidad de la cosecha (Uribelarrea *et al.*, 2007; Malézieux *et al.*, 2009); y 3) la maximización de las interacciones positivas (facilitación) y disminución de las negativas (competencia) (Gliessman y Francis, 1986; Ndakidemi, 2006).

Turrent, F. (2014)^[1] en el mismo sitio experimental del presente estudio, durante los años 2003 al 2005, obtuvo una eficiencia relativa de la tierra (ERT) del sistema maíz (‘H-151’) y frijol (negro ‘8025’) intercalados en franjas alternas de 1.44 con combinaciones óptimas de densidades de plantación y fertilización N, P y K. Esto corrobora los reportes de la literatura que indican que la ERT en los cultivos intercalados de maíz con leguminosas es mayor a la de los cultivos simples (Clark y Francis, 1985; Santalla *et al.*, 2001). Estas ventajas se habían atribuido a la eficiencia en el uso de recursos como la radiación fotosintéticamente activa (Turrent, 2008) y a la complementariedad morfológica de las especies intercaladas (Johanne y Lynch, 2012). Por lo tanto, el primer objetivo fue analizar el efecto del arreglo espacial del maíz y el frijol en la distribución de las raíces, de la radiación fotosintéticamente activa en el dosel de las plantas y la producción de biomasa de ambas especies. La hipótesis fue: el incremento en el rendimiento del maíz y frijol intercalados se debía a una mejor intercepción de radiación fotosintéticamente activa (RFA) en los arreglos topológicos intercalados y a una

¹Turrent, F.A. Investigador Titular C. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (aturrent37@yahoo.com.mx). Comunicación personal.

distribución radical que disminuía la competencia interespecífica, respecto del cultivo simple. Esto se esperaba pues al intercalar en surcos alternos al frijol arbustivo de porte bajo (fotosíntesis C₃) habría espacios en el dosel que le permitirían al maíz (fotosíntesis C₄) interceptar más RFA. Además la literatura indica que: a) el crecimiento y desarrollo de los cultivos y el rendimiento final están estrechamente relacionados con la distribución de raíces, la cual determina la absorción y el uso del agua y los nutrimentos del suelo; y b) la producción de biomasa muestra una correlación positiva con la cantidad de radiación interceptada por los cultivos intercalados (Sivakumar y Virmani, 1984; Tsubo *et al.*, 2002). De manera que cuando el agua y los nutrimentos no son factores limitantes en el crecimiento de un cultivo, la radiación solar es el recurso principal que determinan su productividad (Hamdollah, 2012).

En segundo lugar, sabiendo que el rendimiento del maíz intercalado con frijol en diferentes arreglos podría incrementarse, estaba pendiente profundizar sobre que componentes del rendimiento le daban tal cualidad. Al mismo tiempo, los estudios en monocultivos de maíz han asociado altos rendimientos de grano con una baja concentración de proteína, por efecto de dilución (Uribelarrea *et al.*, 2007; Györi, 2010; Chen *et al.*, 2014). Se tenía interés en evaluar la calidad alimenticia del grano de maíz ya que en México de él se obtiene el 53 % de la ingesta calórica y el 39 % de la proteína de la dieta humana (Hernández *et al.*, 1991; Bourges, 2013). El segundo objetivo del trabajo fue analizar la interacción múltiple entre el arreglo topológico, la dosis de N, P, K y la densidad de población en el rendimiento y calidad del grano de maíz intercalado con frijol. La hipótesis fue: el rendimiento y contenido de proteína, P y K del grano del maíz de los sistemas intercalados sería mayor que en el cultivo simple, a un nivel de manejo similar, asociado con el efecto del arreglo topológico del maíz y frijol.

En tercer lugar, para formular recomendaciones técnicas sobre fertilización y densidad de población a los productores de superficies pequeñas, población objetivo del sistema MIAF, deben de considerarse las ganancias económicas además del rendimiento del cultivo. El objetivo fue estimar la mejor combinación de N, P, K y densidad de población para el cultivo de maíz y frijol arbustivo en diferentes arreglos topológicos, según el ingreso neto, la eficiencia relativa de la tierra y la eficiencia relativa de ingresos totales. Por lo tanto, la tercera hipótesis en este trabajo fue: por efecto del arreglo topológico y sin aumentar significativamente las dosis de N, P, K y densidad de población (y por consecuencia sus

costos variables) se incrementarían los rendimientos del maíz y frijol arbustivo intercalados, la eficiencia relativa de la tierra y de la ganancia, comparados con sus monocultivos al mismo nivel de insumos.

**CAPÍTULO I: DISTRIBUCIÓN DE RAÍCES Y RADIACIÓN SOLAR
Y BIOMASA EN MAÍZ Y FRIJOL INTERCALADOS**

RESUMEN

Los sistemas intercalados de maíz con frijol han mostrado incremento en el rendimiento de las especies en comparación con sus cultivos simples. Se ha sugerido que esta ventaja se debe a la complementariedad de las especies y a la eficiencia en el uso de los recursos. El objetivo fue analizar el efecto del arreglo espacial del maíz y frijol, en la distribución de raíces, de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) en el dosel de las plantas y la producción de biomasa de ambas especies. En un experimento realizado en el año 2012, en el campo experimental Valle de México “El Horno”, se cultivaron *Zea mays* L. ('H-155') y *Phaseolus vulgaris* L. ('6025') intercalados en dos arreglos topológicos (AT). Los AT fueron dos surcos de maíz intercalados con dos de frijol (MMFF) y un surco intercalado de cada especie (MFMF). El análisis de varianza y la comparación de medias con la prueba de Tukey ($p < 0.05$) indicaron que el mayor rendimiento de maíz se obtuvo cuando estaba intercalado que en cultivo simple (MM) y en MFMF hubo más área de exploración con presencia de raíces ($7,861 \text{ cm}^2$) y distribución lateral (186 cm). En MM el menor rendimiento de grano, respecto de los arreglos intercalados, se asoció con la cantidad de radiación fotosintéticamente activa más baja transmitida al nivel del suelo (RFA_{ts}) y con menos exploración lateral de las raíces. El frijol en MFMF tuvo 38 % menos área con presencia de raíces respecto del cultivo simple, por eso disminuyeron: la biomasa desde la prefloración, el IAF en el llenado de grano y su rendimiento. El frijol en MMFF incrementó su biomasa y el rendimiento del grano pues las hojas basales recibieron más RFA. La ERT fue 1.12 en el sistema MMFF y 1.07 en MFMF. En términos de ERT, biomasa y rendimiento del grano de maíz, los sistemas intercalados son mejores que el cultivo simple.

Palabras clave: interacciones interespecíficas, eficiencia relativa de la tierra, radiación fotosintéticamente activa, área foliar, *Zea mays* L. y *Phaseolus vulgaris* L.

INTRODUCCIÓN

El sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) es una tecnología agrícola alternativa cuyo objetivo es contribuir a solucionar problemas económicos, sociales, ecológicos y de alimentación que aquejan a los pequeños productores dedicados primordialmente al cultivo de granos básicos (Cortés *et al.*, 2005; Juárez *et al.*, 2008; Cortés *et al.*, 2012; Ruíz *et al.*, 2012). El arreglo espacial en franjas de las principales especies componentes del sistema MIAF (maíz, frijol y árbol frutal) está diseñado para mejorar la eficiencia y obtener altos rendimientos de buena calidad de cada especie (Santiago-Mejía *et al.*, 2008; Torres *et al.*, 2008). Las ventajas en los rendimientos con el sistema MIAF se atribuyen a la eficiencia en el uso de los recursos naturales (agua, luz y nutrimentos) en el cultivo intercalado de las especies. El principio básico de un mejor uso en los recursos es que si las especies componentes compiten menos por su utilización al crecer juntas, ellas pueden interaccionar de manera positiva, complementarse entre sí y hacer un mejor uso combinado durante el ciclo de cultivo (Willey, 1990; Johanne y Lynch, 2012). Así, las diferencias fisiológicas y morfológicas entre las especies intercaladas hacen más eficiente el uso de los recursos ambientales.

El crecimiento y desarrollo de los cultivos y el rendimiento final en los sistemas intercalados están estrechamente relacionados con la distribución de raíces, la cual determina la absorción y el uso del agua y los nutrimentos del suelo. Los estudios de distribución de las raíces *in situ* en el perfil de suelo sirven para comprender las interacciones interespecíficas de las especies intercaladas y su relación con el rendimiento. El maíz (*Zea mays* L.) tiene un sistema radical más profundo que el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), lo cual le permite un mayor volumen de suelo para donde absorber nutrimentos y agua, respecto al cultivo simple (Johanne y Lynch, 2012). Además, las raíces del maíz se extienden por debajo de la raíz de la soya (*Glycine max* L. Merr.) cuando se intercalan; y en ambas especies la densidad de raíces es mayor en los primeros 30 cm de profundidad y en el área cercana a la base de la planta (Yang *et al.*, 2010).

Cuando el agua y los nutrimentos no son factores limitantes en el crecimiento de un cultivo, la radiación solar es el recurso principal que determinan su productividad (Hamdollah, 2012). La producción de biomasa muestra una correlación positiva con la cantidad de radiación interceptada por los cultivos simples (Lindquist *et al.*, 2005) e intercalados

(Sivakumar y Virmani, 1984; Tsubo *et al.*, 2001) y también a una correlación positiva entre el logaritmo natural de la radiación transmitida y el área foliar (Tsubo *et al.*, 2003).

Estos antecedentes ayudan a entender por qué la eficiencia relativa de la tierra (ERT) en los cultivos intercalados de maíz con leguminosas es mayor a la de los cultivos simples (Clark y Francis, 1985; Li *et al.*, 2001; Santalla *et al.*, 2001; Malézieux *et al.*, 2009). Sin embargo, los experimentos de campo para medir las ventajas de los cultivos intercalados y explicar el efecto de la interacción de los diferentes factores requieren ser estudiados a profundidad (O'Callaghan *et al.*, 1994; Vandermeer, 1995; Malézieux *et al.*, 2009). La presente investigación tuvo como objetivo analizar el efecto del arreglo espacial del maíz y el frijol con el sistema MIAF, en la distribución de las raíces, de la radiación fotosintéticamente activa en el dosel de las plantas y la producción de biomasa de ambas especies. La hipótesis fue que el incremento en el rendimiento del maíz y frijol intercalados se debía a una mejor intercepción de radiación fotosintéticamente activa (RFA) en los arreglos topológicos intercalados y a una distribución radical que disminuía la competencia interespecífica, respecto del cultivo simple.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

En el ciclo primavera-verano (11 de abril - 18 de noviembre 2014) se condujo un experimento en el Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX) “El Horno”, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). El sitio (19° 29' 17" N y 98° 53' 41" O) está a una altitud de 2,280 m. La temperatura media durante el ciclo de cultivo fue 19.5 °C, con una precipitación de 315 mm, evaporación media diaria de 4.7 mm y horas de brillo solar al día de 5.83.

El suelo es un fluvisol háplico según la clasificación de la WRB (IUSS, 2007), con una profundidad de 1.8 m, pH de 5.0 a 5.5, contenido de materia orgánica de 1.14 % en la profundidad 0-24 cm y 0.23 % en el resto del perfil del suelo (Govaerts *et al.*, 2008).

Diseño experimental

Los tratamientos de arreglo espacial o topológico del maíz y el frijol fueron: 1) cultivo simple de maíz (MM), 2) cultivo simple de frijol (FF), 3) cultivo intercalado de maíz y frijol

en dos surcos alternos por especie (MMFF) y, 4) cultivo intercalado de maíz y frijol en surcos alternos individuales por especie (MFMF) (Figura 1). El diseño experimental fue de bloques completos al azar con tres repeticiones.

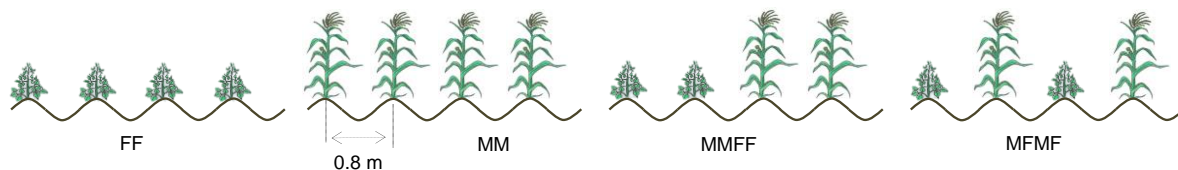


Figura 1. Arreglos topológicos evaluados: FF = cultivo simple de frijol, MM = cultivo simple maíz, MMFF = dos surcos de maíz alternados con dos de frijol, MFMF = un surco de maíz alternado con uno de frijol.

El tamaño de la unidad experimental fue de cuatro surcos de 0.8 m de ancho cada uno con longitud de 6 m en dos repeticiones y en la tercera 20 m de longitud. En la tercera repetición se hizo la evaluación de la distribución de raíces, el análisis de la biomasa y el área foliar mediante un método destructivo, en diferentes etapas del ciclo del cultivo. Los tratamientos de cultivo simple estuvieron libres de sombreo.

Manejo del cultivo

La siembra de frijol y de maíz fue el 11 de abril del 2012. Para frijol se usó la variedad negro '8025' que es de hábito de crecimiento indeterminado tipo III y neutral al fotoperiodo (Esquivel *et al.*, 2004) y para maíz 'H-155' recomendada por el INIFAP para la zona de transición Bajío-Valles altos, alcanza alturas de planta de 2.3-2.5 m y rinde 9.5 a 12.5 t ha⁻¹ (Velázquez y Rendón, 2008). El maíz se fertilizó con la fórmula 180-60-40 (kg ha⁻¹ de N, P y K) con 75 mil plantas ha⁻¹ y para el frijol con la fórmula 50-50-30 con 180 mil plantas ha⁻¹. En la siembra se aplicó todo el fertilizante al frijol, pero el maíz se fertilizó con 1/3 de N y el resto se aplicó en la primera escarda. El cultivo se mantuvo sin limitaciones de agua, con riego rodado. El control de malezas fue manual. La cosecha del frijol fue a los 125 DDS y la de maíz a los 221 DDS.

Variables medidas

Distribución radical

La distribución radical en el perfil del suelo se determinó lavando las raíces *in situ*, en una operación intensiva y dedicada. Con una retroexcavadora se hizo una trinchera de 1.6 m de profundidad por 1.2 m de ancho y perpendicular a todos los surcos cultivados de los tratamientos. Después se niveló y afinó la cara del perfil dejando expuesto el sitio de inserción de la planta en el surco y se introdujeron clavos de 7.6 cm de longitud en todo el perfil hasta los 90 cm de profundidad para dejar más o menos intactas las raíces después del lavado (Yang *et al.*, 2010).

En un marco de madera de 1.5 x 2.5 m se hizo con hilo una malla cuadrículada de 2.5 x 2.5 cm y se colocó en el perfil con las raíces expuestas, las cuales se lavaron con un chorro fino de agua corriente. En seguida, se registró la presencia o ausencia de raíces en cada cuadrícula de la malla, distinguiéndolas por su color y otras características. Las raíces de frijol tenían un to marrón y presencia de nódulos, y las de maíz eran de color blanco, con mayor succulencia y grosor. Cuando se dudaba del origen de alguna raíz se continuaba el lavado hasta encontrar la dirección de su origen. El patrón de distribución fue registrado y descrito en tres etapas durante el ciclo de cultivo, a los 71, 118 y 164 DDS. La presencia de raíces en cada cuadro de 2.5 x 2.5 cm (6.25 cm²) fue utilizada para calcular el área total con presencia de raíces por planta, sumando el área de cada cuadro individual con presencia de raíces. De la misma forma, para calcular el área de traslape entre raíces de las plantas de maíz y frijol se sumaron los cuadros individuales con presencia de raíces de dos plantas contiguas.

Radiación fotosintéticamente activa (RFA)

En los cuatro tratamientos estudiados en dos repeticiones se midió la irradiancia fotosintética (W m^{-2}) (RFA) con un sensor lineal de 1m de longitud, LI-188 (LI-COR[®] Lincoln, NE, EEUU.), a los 57, 78 y 111 DDS. El sensor lineal se colocó en medio de dos plantas, a nivel de la base y perpendicular al surco de medición, procurando no perturbar la disposición natural de las hojas y tallos del dosel. Las mediciones se realizaron en días despejados entre las 12:00 y 14:00 h. La RFA transmitida al suelo (RFA_{ts}) se determinó a partir de mediciones consecutivas de la RFA, una medición en la parte superior de la planta o

RFA incidente (RFA_{inc}) y tres mediciones en su base, repitiendo el proceso hasta lograr seis mediciones en la base de cada especie por tratamiento, en las dos repeticiones. El valor de la RFA_{ts} considera a la radiación directa y difusa, que no fue interceptada por el dosel de la planta.

Con los valores de la RFA en la base de las plantas de cada especie se obtuvo un promedio con el cual se determinó el porcentaje que representaba la RFA_{ts} del total de la RFA_{inc} :

$$RFA_{ts}(\%) = \frac{I_s}{I_0} \times 100$$

Donde I_s = promedio de tres mediciones de RFA a nivel del suelo e I_0 = RFA incidente en el dosel.

Índice de área foliar (IAF)

En primer lugar, se midió el área foliar de las láminas del frijol y del maíz con un integrador de área foliar LI-3100 (LI-COR® Lincoln, NE, EEUU.) a los 49, 57, 84 y 141 DDS. El IAF se calculó con la siguiente ecuación (Escalante y Kohashi, 1993):

$$IAF = \frac{(\text{área foliar por planta})(\text{densidad de población})}{(\text{área sembrada})}$$

Hojas liguladas

A los 35 DDS se identificó a la hoja número 7 del maíz, en seis plantas por tratamiento, contando desde la base de la planta, y se le pintó una marca de 2 x 3 cm con pintura vinílica para facilitar su localización. La hoja 7 se utilizó como referencia para conocer el número total de hojas liguladas en la planta a los 140 DDS (durante la fase de llenado del grano).

Biomasa

La biomasa por planta se determinó a los 49, 57, 84, 125 y 141 DDS. En cada muestreo se midieron 6 plantas por tratamiento, en una repetición. La parte aérea de las plantas fue lavada, para eliminar el polvo, escurrida y seccionada por órganos. El frijol se separó en tallo, vainas, peciolos, láminas y grano (cuando estaban presentes). Las plantas de maíz se separaron en

láminas activas (o expuestas) e inactivas; y en vainas foliares, culmo, inflorescencias, brácteas, mazorca, grano y raquis (según la fecha de medición). La biomasa seca por órgano se obtuvo utilizando una estufa (Riossa®, modelo HCFD-82, Méx.) para llevar los órganos deshidratados a peso constante (72 h) y se pesaron con una balanza analítica (sortorius®, Handy H51 y 1474, IL. EEUU).

Eficiencia Relativa de la Tierra (ERT)

La ERT es el área total requerida en cultivo simple para alcanzar los rendimientos obtenidos en policultivo. La ERT de los arreglos topológicos MMFF y MFMF, fue calculada con la siguiente ecuación (Malézieux *et al.*, 2009):

$$ERT = \frac{\text{Rendimiento del frijol intercalado}}{\text{Rendimiento del frijol en monocultivo}} + \frac{\text{Rendimiento del maíz intercalado}}{\text{Rendimiento del maíz en monocultivo}}$$

Una ERT mayor a uno significa que el cultivo intercalado es mejor que el cultivo simple y viceversa. Mientras más alto sea el valor de ERT el cultivo será más ventajoso. El cálculo de la ERT a los 49, 57 y 184 DDS consideró la biomasa total por planta y a los 225 DDS sólo el peso del grano. La proporción del rendimiento del maíz, aportado a la ERT de los intercalados, se calculó con la siguiente fórmula (Mead y Willey, 1980):

$$\text{Rendimiento proporcional del maíz} = \frac{\text{ERT maíz intercalado}}{\text{ERT maíz intercalado} + \text{ERT frijol intercalado}}$$

El valor generado le da al productor una idea de la proporción del rendimiento del maíz implícito en la ERT de los intercalados, facilitándole entender si es la proporción requerida para sus necesidades.

Análisis de resultados

A todas las variables medidas se les aplicó un análisis de varianza y la comparación de medias con la prueba Tukey ($p \leq 0.05$) usando el programa SAS® versión 9.00. Se graficó con Excel y Sigma plot® versión 11.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Distribución de raíces

La distribución de raíces se evaluó a partir de los 71 DDS, y se observó que el maíz tuvo mayor área de exploración que el frijol en todos los arreglos topológicos durante el resto del ciclo (Figuras 2-5).

A los 71 DDS las raíces de frijol ya habían profundizado casi en su totalidad, pues la profundidad entre esta fecha y a 118 DDS mostró poco incremento en el cultivo simple (5%) y en el arreglo MFMF (6%) (Figura 5). La profundidad de enraizado del maíz en el suelo, durante el ciclo, no fue afectada por el arreglo topológico; al final, la profundidad media fue de 82 a 85 cm (Figuras 3-5).

Es interesante que las raíces del maíz y el frijol intercalados tuvieran una distribución vertical similar al de sus cultivos simples; sin embargo, la distribución lateral fue mayor en el cultivo intercalado. Por ejemplo, la distribución lateral de las raíces de maíz en MMFF fue 18 % mayor que en el cultivo simple, por lo que su área final de exploración fue 15% mayor (Figura 4). La mayor área con presencia de raíces de frijol se obtuvo en el tratamiento MMFF a los 118 DDS (Figura 4). En esta fecha, 7 días previos a la cosecha, la raíz de frijol tuvo 38% menos área de exploración en el arreglo topológico MFMF que en cultivo simple. En este mismo arreglo topológico el área con presencia de raíces del maíz fue 15% mayor respecto del cultivo simple, a los 164 DDS (Figura 5).

La superficie promedio de traslape de raíces de frijol en cultivo simple (71 DDS) fue de 118 cm², lo que correspondió en promedio al 4% de la superficie explorada por cada planta y se incrementó en 5% a los 118 DDS. En el caso del maíz, la superficie de traslape en cultivo simple aumentó conforme avanzó el ciclo. El traslape fue de 2 % a 17 % y 20 % de la superficie de exploración promedio de cada planta a los 71, 118 y 164 DDS, respectivamente.

En el arreglo topológico MMFF fue notoria la invasión de las raíces del maíz al área del frijol. A los 71 DDS, el 24 % de la superficie del frijol era ocupada por las raíces del maíz del surco contiguo. A los 118 DDS se incrementó a 49 % y a los 164 DDS incluso hubo traslape de las raíces de maíz de plantas separadas por dos surcos de frijol. En el arreglo topológico

MFMF el área con presencia de raíces de maíz ocupó el 17 y 36 % del área radical del frijol a los 71 y 118 DDS, respectivamente.

Johanne y Lynch (2012) observaron que el crecimiento de las raíces de maíz tiende a ser exponencial hasta los 40 días después de la germinación. A los 70 DDS las raíces de maíz y frijol, en todos los arreglos topológicos, exploraron cierta profundidad que no se incrementó significativamente durante el resto del ciclo (118 y 164 DDS). Esto pudo estar influenciado por la presencia de una discontinuidad litológica en el perfil del suelo, de textura arenosa (según las pruebas texturales de campo), en toda el área experimental, encontrada entre los 47-60 cm de profundidad. Por arriba de este estrato la textura era arcillo limosa (6-47 cm) y fue donde se presentó la mayor área con presencia de raíces. No obstante, hubieron raíces de maíz por debajo de este estrato (Figuras 2-5), mientras que las de frijol no estuvieron presentes.

Las raíces del maíz profundizaron más y tuvieron más área de exploración que las del frijol (Figuras 2-5) de tal manera que invadieron lateralmente y verticalmente los surcos de frijol, resultados similares fueron reportados por Hai-Yong *et al.* (2013), al intercalar maíz con leguminosas. La extensión lateral de las raíces del maíz en cultivo simple a los 164 DDS (durante el llenado de grano), llegó a 151 cm en promedio; resultado similar al reportado por Jonsson *et al.* (1988) de 150 cm en cultivo simple de maíz 'Elonga'. El arreglo topológico MFMF permitió al maíz la mayor distribución radical lateral y área de exploración (a los 164 DDS). Mientras que el arreglo MMFF ocasionó en el frijol mayor expansión lateral y área de exploración a los 118 DDS. Además, considerando que la cosecha de frijol fue a los 125 DDS y la de maíz a los 221 DDS, las plantas de maíz pudieron aprovechar el agua y los nutrientes del suelo desocupado por el frijol después de su cosecha.

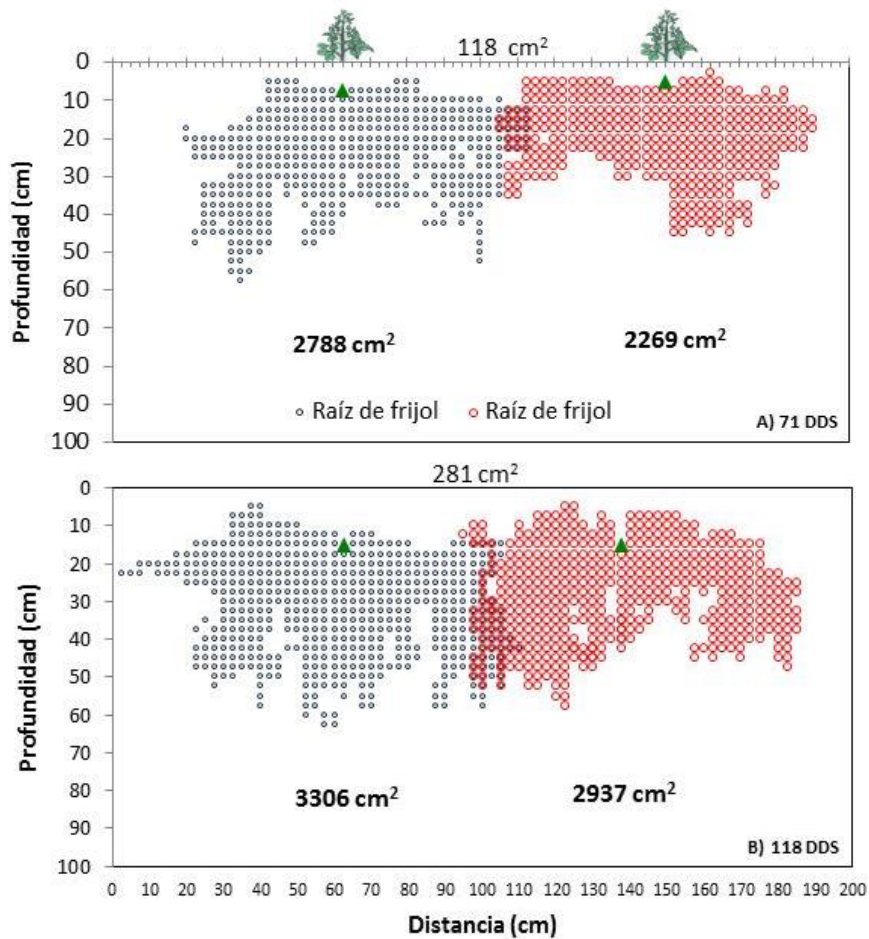


Figura 2. Distribución radical de frijol negro '8025' en cultivo simple a los 71 (A) y 118 (B) DDS. El número entre las plantas indica el área de traslape de las raíces y el número abajo del área de color del gráfico indica el área con presencia de raíces. Los triángulos representan los sitios de inserción de las plantas al surco.

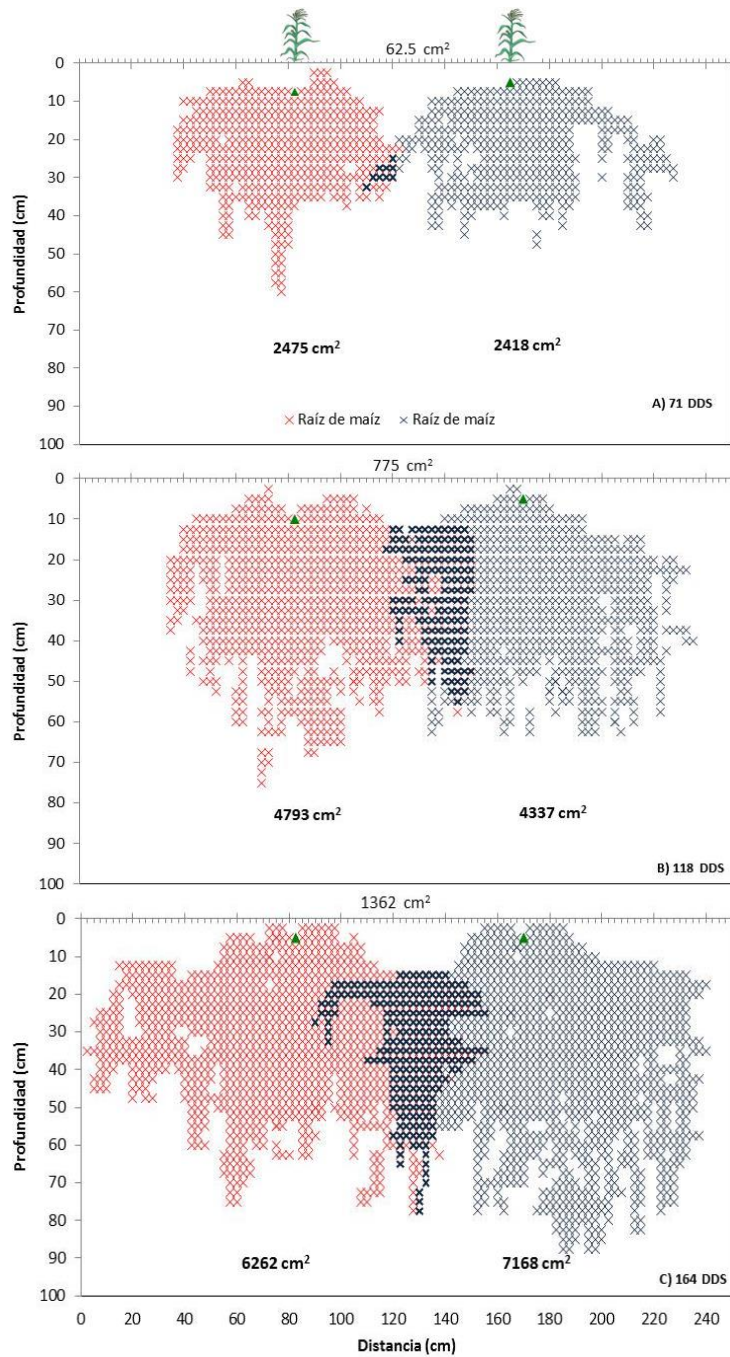


Figura 3. Distribución radical de maíz 'H 155' en cultivo simple, a los 71 (A), 118 (B) y 164 (C) DDS. El número entre las plantas indica el área de traslape de las raíces y el número abajo del área de color del gráfico indica el área con presencia de raíces. Los triángulos representan los sitios de inserción de las plantas al surco.

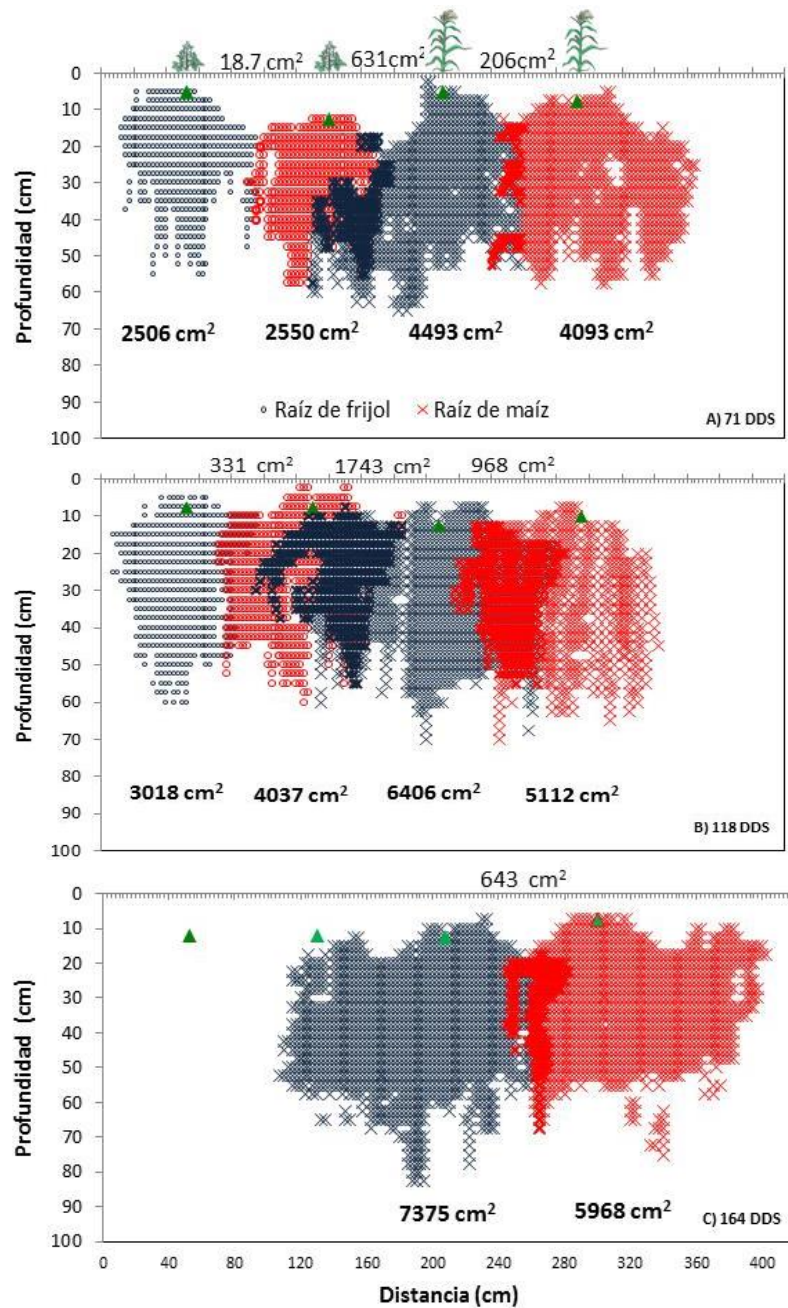


Figura 4. Distribución radical de maíz 'H 155' y frijol negro '8025' intercalados MMFF a los 71 (A), 118 (B) y 164 (C) DDS. El número entre las plantas indica el área de traslape de las raíces y el número abajo del área de color del gráfico indica el área con presencia de raíces. Los triángulos representan los sitios de inserción de las plantas al surco.

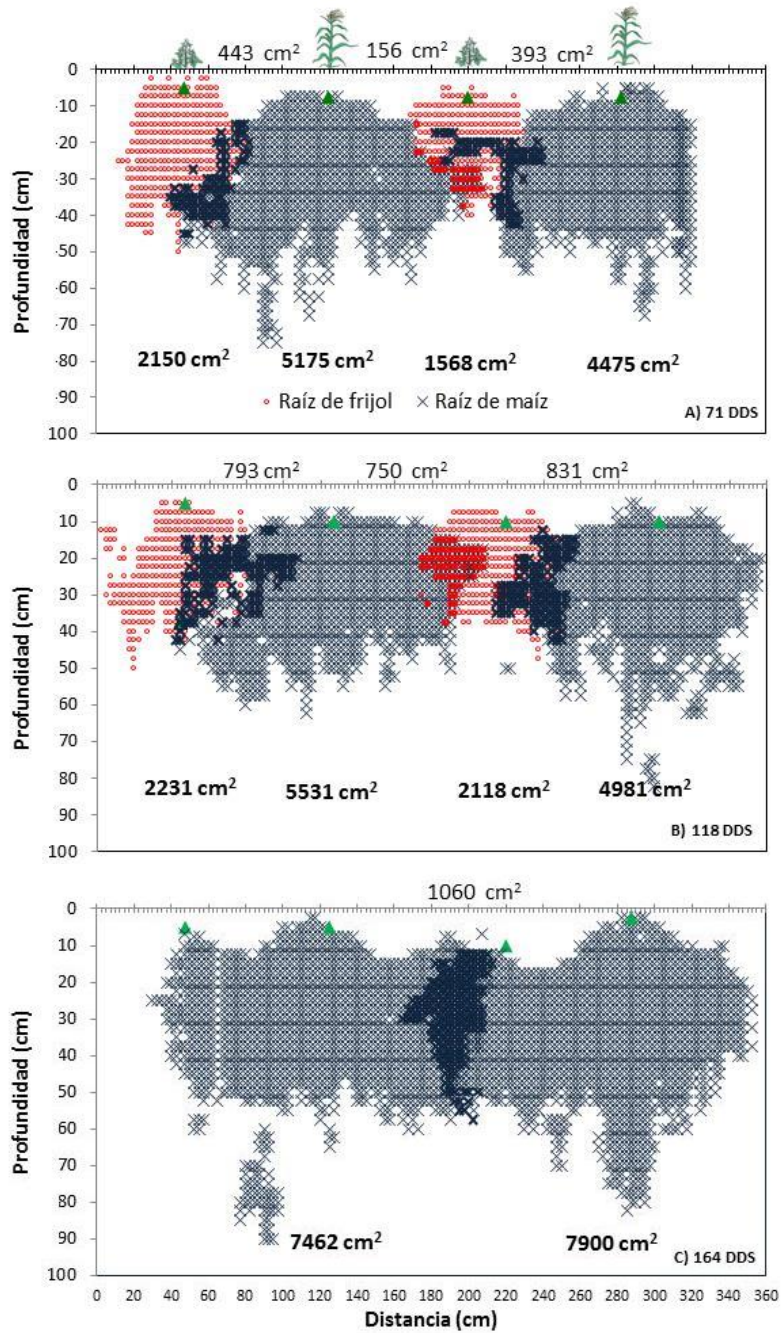


Figura 5. Distribución radical de maíz 'H 155' y frijol negro '8025' intercalados MFMF a los 71 (A), 118 (B) y 164 (C) DDS. El número entre las plantas indica el área de traslape de las raíces y el número abajo del área de color del gráfico indica el área con presencia de raíces. Los triángulos representan los sitios de inserción de las plantas al surco.

RFA, IAF y número de hojas

La RFA_{ts}, en las plantas de maíz, fue significativamente mayor en el sistema MFMF respecto de los otros arreglos topológicos, a los 57, 78 y 141 DDS (Cuadro 1). Estas fechas corresponden a la fase R5 del frijol (prefloración) y llenado de vaina y llenado de grano de maíz. En el frijol, a los 57 DDS, la RFA_{ts} no fue afectada por el arreglo topológico; sin embargo, a los 78 y 111 DDS, la RFA_{ts} fue menor en el arreglo topológico MMFF y MFMF (Cuadro 1).

Cuadro 1. Efecto del arreglo topológico en el porcentaje RFA transmitida al suelo (RFA_{ts}) ocupado por el maíz y frijol, durante el ciclo de cultivo.

Arreglo topológico [†]	Días después de la siembra			
	57	78	111	141
Maíz				
MM	41.30±4.62 b	18.13±2.08 b	8.29±1.79 a	13.29±3.56 b
MMFF	45.31±3.46 b	18.50±6.37 b	8.09±1.41 a	21.05±5.20 b
MFMF	64.87±1.15 a	29.79±3.17 a	9.50±1.93 a	46.12±3.84 a
Frijol				
FF	71.11±1.70 a	35.02±2.45 a	26.63±1.49 a	¶
MMFF	68.80±2.02 a	20.75±1.39 b	27.09±2.46 a	¶
MFMF	72.11±2.31 a	32.85±2.83 a	16.02±3.01 b	¶

[†] MM=cultivo simple de maíz, MMFF= intercalado de dos surcos de maíz seguidos por dos de frijol y MFMF=cultivo intercalado de un surco de maíz seguido de uno de frijol. ¶ A los 121 DDS el frijol se había retirado del sistema. Los valores son promedio de 12 muestras ± ES. Letras distintas dentro de columnas denotan diferencia significativa $p \leq 0.05$ (Tukey).

El IAF del frijol a los 49 DDS, en la fase de prefloración (R5), fue mayor cuando estuvo intercalado que en cultivo simple ($p \leq 0.001$), mientras que a los 57 DDS el IAF ya no fue diferente entre los arreglos topológicos. Sin embargo, durante el llenado de la vaina (84 DDS) el IAF fue menor en el arreglo topológico MFMF (Figura 6A).

A los 49 DDS las plantas de maíz estaban en diferenciación de la espiga y las de frijol en prefloración. En esta fase el IAF menor del maíz se presentó en el intercalado MMFF ($p < 0.05$) (Figura 6B). Sin embargo, a partir de esta fase no hubo efecto significativo del arreglo

topológico. Adicionalmente, el número de hojas por planta (21 ± 0.11) no cambió por efecto del arreglo topológico ($p=0.919$). La estimación de la RFA_{ts} en los surcos de maíz, en todos los arreglos topológicos y fechas de medición, fue menor que en los surcos de frijol. Esto se atribuye a que el maíz es la especie dominante (Tsubo y Walker, 2002), con mayor área foliar (Figura 6), altura y su dosel intercepta más RFA que el frijol, lo cual contribuye con el uso eficiente de la RFA.

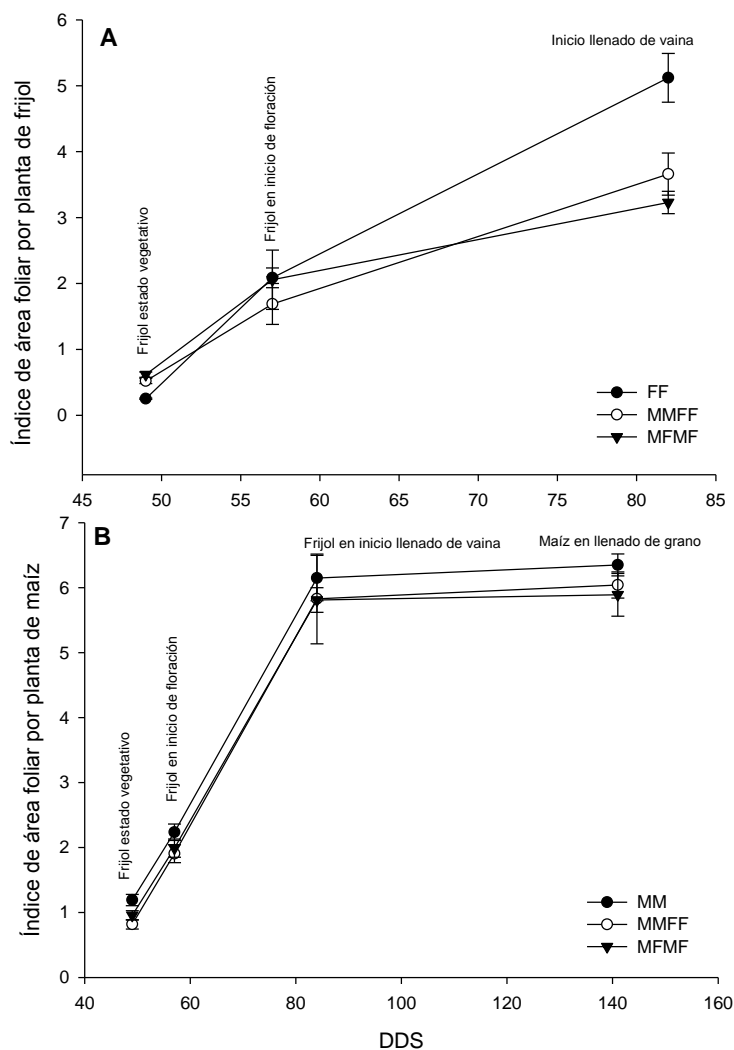


Figura 6. Índice de área foliar de plantas de frijol (A) negro '8025' y maíz (B) 'H155' en función del tiempo en tres arreglos topológicos: MM=cultivo simple de maíz, MMFF=intercalados dos surcos de maíz seguidos de dos de frijol y MFMF= intercalado un surco de maíz seguido de uno de frijol. DDS=49, 57, 84 y 141 DDS. Promedios de 6 plantas \pm ES.

En las etapas fenológica llenado de vaina y llenado de grano (78 y 141 DDS respectivamente) ocurrió la máxima expresión del área foliar de cada especie (Figuras 6A y 6B) y en las que pudo haber la mayor competencia por luz. A los 78 DDS se transmitió más RFA_{ts} en el cultivo simple de frijol y en el sistema MFMF ya que en esta etapa presentaron un valor bajo del área foliar (Figura 6A).

En el maíz en cultivo simple y en el sistema de intercalado MMFF, a partir de los 57 DDS, la RFA_{ts} fue menor, por lo que interceptó más RFA que en el sistema MFMF. Se puede deducir que las hojas basales en el sistema MFMF no tuvieron limitación en la disponibilidad de RFA; a diferencia de las hojas basales en el sistema MM. La mejor distribución de la RFA en el sistema intercalado MFMF se reflejó en un rendimiento mayor de grano de maíz. Además, no hubo diferencia en el número de hojas ni en el área foliar de las plantas de maíz, en todos los tratamientos a los 57, 84 y 141 DDS (Figura 6). Esto apoya lo señalado anteriormente de que más hojas de maíz en el arreglo MFMF aprovecharon la radiación interceptada; a diferencia del maíz en cultivo simple en que la intercepción de la RFA disminuyó de la parte superior del dosel al inferior.

Biomasa

A los 57 DDS, y en las etapas posteriores, incluyendo la cosecha, la biomasa de frijol en el arreglo MFMF fue menor que en el arreglo MMFF y FF (Figura 7A). En el caso del maíz, a los 84 DDS la producción de biomasa total fue mayor cuando estuvo intercalado que en cultivo simple (Figura 7B). Esta respuesta se mantuvo durante el resto del ciclo y se reflejó en la cosecha, a los 221 DDS. Este efecto fue debido a la cantidad de biomasa del grano pues la de rastrojo (láminas+ vainas + raquis + culmo + espigas + inflorescencia masculina) no fue diferente entre los tratamientos (Cuadro 2).

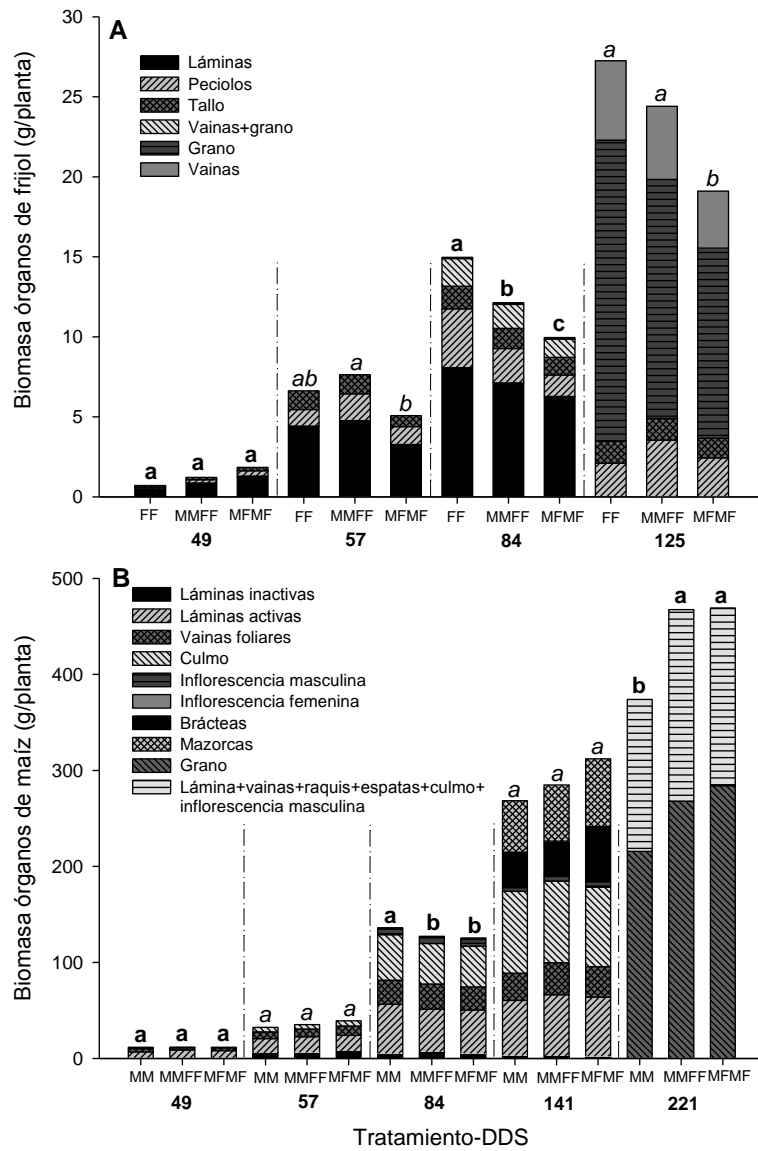


Figura 7. Efecto del arreglo topológico en la producción de biomasa de (A) frijol y (B) maíz en cinco fases del ciclo de cultivo. DDS = días después de la siembra. Letras distintas sobre las barras de cada fecha denotan diferencia significativa $p < 0.05$. FF=cultivo simple de frijol, MM= cultivo simple maíz, MMFF= dos surcos de maíz alternados con dos de frijol, MFMF= un surco de maíz alternado con uno de frijol.

Cuadro 2. Rendimiento de grano y rastrojo del maíz 'H 155' en tres arreglos topológicos, a los 221 DDS.

Arreglo topológico [†]	Rendimiento (g planta ⁻¹)	
	Grano	Rastrojo
MM	157.21±12.56 b	153.81± 4.19 a
MMFF	197.04±9.84 a	197.98±17.01 a
MFMF	205.87±8.01 a	186.45± 9.26 a

[†] MM=cultivo simple de maíz, MMFF= dos surcos de maíz seguidos por dos de frijol y MFMF= un surco de maíz intercalado seguido de uno de frijol. Los valores son promedio de 12 muestras ± ES. Letras distintas entre columnas denotan diferencia significativa ($p \leq 0.05$).

Durante el crecimiento y desarrollo del maíz y frijol intercalados, las relaciones interespecíficas en el arreglo MMFF resultaron en un incremento del rendimiento de maíz y se mantuvo el rendimiento del frijol con respecto de sus cultivos simples; mientras que en el arreglo MFMF hubo mayor rendimiento de maíz y menor del frijol.

La interacción positiva maíz x frijol en MMFF puede interpretarse como una relación de facilitación y complementariedad, en que la presencia de la leguminosa aumentó la productividad del maíz (Vandermeer, 1995; Li *et al.*, 2006; Malézieux *et al.*, 2009) y su calidad (Hakan *et al.*, 2008). La literatura sugiere que esta interacción positiva maíz x frijol en el intercalado MMFF se debe a la arquitectura de las raíces de ambas especies, a la fijación simbiótica de nitrógeno (Johanne y Lynch, 2012) y a la eficiencia en el uso de la radiación solar (Sivakumar y Virmani, 1984; Tsubo *et al.*, 2001).

El efecto del arreglo topológico en la biomasa de frijol se observó al inicio de la floración (57 DDS), 27 días antes que en el maíz. En esta fecha la producción de biomasa total de frijol fue menor en el arreglo MFMF que en el MMFF y cultivo simple. Gardiner y Craker (1981) también reportaron resultados similares en la biomasa de frijol cv. Soldier a los 57 DDS. El rendimiento de grano de frijol a la cosecha (125 DDS) en el arreglo MFMF fue 12% menor respecto del cultivo simple. O'Callaghan *et al.* (1994) reportaron también una disminución en el rendimiento del frijol intercalado de 12 a 33 %, y Santalla *et al.* (2001) de hasta 55%. En el presente estudio la menor producción de biomasa en el arreglo MFMF se mantuvo en el resto del ciclo. Esto se debió al sombreado de las plantas de maíz sobre el frijol, pues las hojas basales

del frijol interceptaron menos RFA y disminuyeron el IAF en 40 y 84% a los 49 y 84 DDS, respectivamente, con respecto al cultivo simple. La disminución en el IAF de frijol por efecto del intercalado ha sido reportada por Gardiner y Craker (1981). Una causa adicional de la disminución en la biomasa del frijol intercalado en MFMF fue la disminución de 38 % del área de exploración radical, en comparación a la del cultivo simple que fue mayor (Figuras 2 y 5). Gliessman y Francis (1986) destacan que no obstante la reducción en el rendimiento del frijol y calabaza en cultivo intercalado la ERT es mayor de uno.

ERT

La ERT de la biomasa total, en los arreglos intercalados fue > 1 , excepto en el sistema MFMF a los 57 DDS; debido a un valor bajo de la ERT del frijol en esta fecha. Las ERT parciales del maíz variaron de 0.98 a 1.15 y las del frijol de 0.65 a 1.78. La ERT final a los 225 DDS, que considera solo el peso de grano de maíz y frijol, fue 1.12 y 1.07 para los arreglos topológicos MMFF y MFMF, respectivamente. Las ERT parciales del maíz y frijol, a la cosecha, fueron 0.64 y 0.47 en MMFF; y 0.67 y 0.34 en MFMF. La proporción de rendimiento aportado por el maíz, a la ERT, fue 0.57 y 0.64 en los intercalados MMFF y MFMF, correspondientemente.

Los valores de ERT de 1.12 y 1.07, en los sistemas MMFF y MFMF respectivamente, significan que se requerirían 1.12 y 1.07 ha cultivadas con maíz y frijol como cultivos simples para obtener los rendimientos de 1 ha intercalada. Resultados similares han sido reportados en sistemas intercalados de maíz/frijol y maíz/frijol/calabaza (Santalla *et al.*, 2001; Johanne y Lynch 2012).

Turrent, F. (2014)^[2] en el mismo sitio experimental, durante los años 2003 al 2005, obtuvo una ERT del sistema maíz y frijol intercalados de hasta 1.44 con combinaciones óptimas de densidades de plantación y fertilización. Mientras que en los años 2006 y 2007 con la misma densidad de siembra y dosis de fertilización, pero utilizando el híbrido de maíz 'H-151', la ERT fue 1.24 y 1.01 en los sistemas MMFF y MFMF, respectivamente.

Con el sistema MIAF se han conseguido ERT de 1.96; cuando se cultivan maíz y frijol intercalados en el ciclo primavera-verano, frijol en relevo en el ciclo otoño-invierno y árboles

²Turrent, F.A. Investigador Titular C. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (aturrent37@yahoo.com.mx)

de guayaba (Camas, 2011). Esto sugiere que los arreglos topológicos estudiados podrían dar mayores ERT al intercalarse con frutales y con sucesión de otros cultivos.

En los dos arreglos intercalados estudiados la proporción de rendimiento de maíz fue mayor a 0.6. La ERT del sistema MFMF fue 4.46 % mayor que la del MMFF y en años previos (Turrent, 2014)^[4] esta diferencia promedio entre los tratamientos fue de alrededor del 10 % con maíz ‘H-151’. Para las familias campesinas, tanto como para el diseño del sistema MIAF, es prioritario obtener el mayor rendimiento de grano de maíz, pues es básico en la alimentación. De esta forma, el agricultor podría no optar por el sistema con mayor ERT, sino aquel que le genere más rendimiento de la especie de su interés, siempre que no eleve los costos de producción. En las condiciones de este estudio y basándose en el rendimiento del grano de maíz, que es de gran importancia alimenticia para las familias campesinas, los sistemas intercalados son mejores que el cultivo simple de maíz.

CONCLUSIONES

El maíz desarrolló más área de exploración radical que el frijol y ambas especies alcanzaron la profundidad de enraizado típica de cada especie a los 71 DDS, independientemente del arreglo topológico. La menor área con presencia de raíces del frijol y la mayor del maíz se presentaron en el arreglo topológico un surco de maíz alternado con uno de frijol.

El cultivo intercalado de maíz y frijol en franjas propició una ventaja a nivel de raíz y de la parte aérea, que se reflejó en la distribución de raíces, intercepción de la radiación solar y mayor producción de biomasa (de maíz).

Los mayores rendimientos del maíz intercalado con frijol, respecto del cultivo simple, se debieron a la mejor distribución de la radiación fotosintéticamente activa en el dosel de la planta.

La disminución en el rendimiento del frijol, cuando se intercala con maíz, depende del arreglo topológico con ambas especies.

LITERATURA CITADA

- Camas R., G. 2011. Erosión hídrica, productividad, captura de carbono y uso de la radiación solar y agua en tres sistemas de manejo, para la agricultura de ladera en el trópico subhúmedo de México. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados. 171 p.
- Clark E., A., and C. Francis A. 1985. Transgressive yielding in bean: maize intercrops; interference in time and space. *Field Crops Res.* 11: 37-53.
- Cortés J., F., A. Turrent F., P. Díaz V., R. Hernández E., R. Mendoza R., y E. Aceves. 2005. Manual para el establecimiento y manejo del sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en laderas. SAGARPA-Colegio de Postgraduados. pp: 1-11.
- Escalante J., E., y H. Kohashi S. 1993. El rendimiento y crecimiento del frijol. Manual para la toma de datos. Colegio de Postgraduados. 84 p.
- Esquivel G., E., R. Rosales S., P. Pérez H., J. Acosta G., J. Hernández C., y M. Muruaga J. 2004. Variedades mejoradas de frijol del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. INIFAP. 148 p.
- Cortés F. J. I., J. Torres Z., A. Turrent F., E. Hernández R., A. Ramos S. y L. Jiménez S. 2012. Manejo actualizado para el establecimiento y manejo del sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en laderas. Colegio de Postgraduados. 30 p.
- Gardiner T., and L. Craker 1981. Bean growth and light interception in a bean-maize intercrop. *Field Crops Res.* 4: 313-320.
- Gliessman S. R., and C. Francis. A. 1986. Plant interactions in multiple cropping systems. *In: Multiple cropping systems.* Francis, C.A. (ed). EE.UU. pp: 82-95.
- Govaerts B., M. Barrera-Franco., M. Limón-Ortega A., P. Muñoz-Jiménez., P. Sayre K., and J. Deckers J. 2008. Clasificación y evaluación edafológica de tres sitios experimentales del altiplano central de México. *Tropicultura* 26: 2-9.
- Hai-Yong X., Z. Jian-Hua., S. Jian-Hao., B. Xing-Guo B., P. Christie., Z. Fu-Suo., and L. Long. 2013. Dynamics of root length and distribution and shoot biomass of maize as affected by intercropping with different companion crops and phosphorus application rates. *Field Crops Res.* 150: 52-62.

- Hakan G., R. Avcioglu., and S. Hikmet. 2008. Intercropping of corn with cowpea and bean: Biomass yield and silage quality. *Afr. J. Biotechnol.* 7: 4100-4104.
- Hamdollah E. 2012. Intercropping of Maize (*Zea mays*) with Cowpea (*Vigna sinensis*) and Mungbean (*Vigna radiata*): effect of of intercrop components on resource consumption, dry matter production and legumes forage quality. *J. Basic Appl. Sci.* 2: 355-360.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelo. FAO Roma. 130 p.
- Johanne P., A., and J. Lynch P. 2012. Complementarity in root architecture for nutrient uptake in ancient maize/bean and maize/bean/squash polycultures. *Ann. Botany* 110: 521-534.
- Jonsson K., L., J. Fidjeland A., and P. Högberg. 1988. The vertical distribution of fine roots of five tree species and maize in Morogoro, Tanzania. *Agrofor. Syst.* 6: 63-69.
- Juárez D., R., C. Fragoso G., A. Turrent F., J. Ocampo M., E. Sandoval C., I. Ocampo F., y E. Hernández R. 2008. Mejoramiento del suelo en la milpa intercalada con árboles frutales (MIAF). *LEISA* 24: 30-31.
- Li L., S. Jianhao., Z. Fusuo., L. Xialolin., Y. Sicun., and R. Zdenko. 2001. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping I. Yield advantage and interespecific interactions on nutrients. *Field Crops Res.* 71: 123-137.
- Li L., S. Jianhao., Z. Fusuo., T. Guo., X. Bao., F. Smith A., and S. Smith. 2006. Root distribution and interactions between intercropped species. *Oecologia* 147: 280-290.
- Lindquist J., L., T. Arkebauer J., D. Walters T., K. Cassman G., and A. Dobermann. 2005. Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. *Agron. J.* 97: 72-78.
- Malézieux E., Y. Crozat., C. Dupraz., M. Lawrans., D. Makowski., H. Ozier-Lafontaine., B. Rapidel., S. de Tourdonnet., and M. Valantin. 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 29: 43-62.
- Mead R., and R. Willey W. 1980. The concept of a "Land Equivalent Ratio" and advantages in yields from intercropping. *Exp. Agric.* 16: 217-228.
- O'Callaghan J., C. Maende., and G. Wyseure. 1994. Modelling the intercropping of maize and beans in Kenya. *Comput. Electron. Agric.* 11: 351-365.
- Ruíz A., M., L. Jiménez S., O. Figueroa R., and M. Morales G. 2012. Adoption of milpa interspersed system in fruit trees by five Mixe municipalities of the state of Oaxaca. *REMEXCA* 3: 1605-1621.

- Santalla M., A. Rodiño., and A. Casquero. 2001. Interactions of bush bean intercropped with field and sweet maize. *Eur. J. Agron.* 15: 185-196.
- Santiago-Mejía E., J. Cortés-Flores., A. Turrent-Fernández., E. Hernández-Romero., y D. Jaen-Contreras. 2008. Calidad del fruto de duraznero en el sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales en laderas. *Agric. Tec. Mex.* 34: 159-166.
- Sivakumar M., and S. Virmani. 1984. Crop productivity in relation to interception of photosynthetically active radiation. *Agric. For. Meteorol.* 31: 131-134.
- Torres J., Z., J. Cortés F., A. Turrent F., E. Hernández R., y A. Muratalla L. 2008. Rendimiento de fruto y número de ramas principales en árboles de durazno intercalado con milpa. *Terra Latinoam.* 26: 265-273.
- Tsubo M., S. Walker., and E. Mukhala. 2001. Comparisons of radiation use efficiency of mono-/inter-cropping systems with different row orientations. *Field Crops Res.* 71: 17-29.
- Tsubo M., and S. Walker. 2002. A model of radiation interception and use by a maize-bean intercrop canopy. *Agric. For. Meteorol.* 110: 203-215.
- Tsubo M., E. Mukhala., H. Ogindo., and S. Walker. 2003. Productivity of maize-bean intercropping in a semi-arid region of South Africa. *Water SA* 29: 381-388.
- Vandermeer J. 1995. The Ecological Basis of Alternative Agriculture. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 26: 201-224.
- Velázquez G., C., y A. Rendón G. 2008. H-155-E: Híbrido experimental de maíz de grano blanco para los Valles Altos y zonas de transición en México. *Agric. Tec. Mex.* 34: 79-82.
- Willey R., W. 1990. Resource use in intercropping systems. *Agric. Water Manage.* 17: 215-231.
- Yang G., D. Aiwang., Q. Xinqiang., L. Zugui., S. Jingsheng., Z. Junpeng., and W. Hezhou. 2010. Distribution of roots and root length density in a maize/soybean strip intercropping system. *Agric. Water Manage.* 98: 199-212.

**CAPÍTULO II: RENDIMIENTO Y CALIDAD DEL GRANO DE MAÍZ
INTERCALADO CON FRIJOL ARBUSTIVO EN FUNCIÓN DE
TOPOLOGÍA, DENSIDAD DE POBLACIÓN Y FERTILIZACIÓN**

RESUMEN

Estudios previos han mostrado que el rendimiento del grano de maíz (*Zea mays* L.) es mayor en sistemas intercalados con frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) que en cultivo simple, con un nivel de manejo similar. Sin embargo, estaba pendiente conocer su calidad que es fundamental, ya que en México se destina primordialmente al consumo humano. Se analizaron los efectos de: 1) el arreglo topológico del maíz 'H-155' y el frijol arbustivo 'Negro-8025', 2) la dosis de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) y 3) la densidad de población (D) en el rendimiento del grano (Y_m) y sus componentes, y calidad en términos del contenido de proteína (ProtG), P y K. Se estableció un experimento, en el Campo Experimental Valle de México, de parcelas divididas con tres arreglos topológicos (AT) como parcela grande y como parcela chica un diseño factorial 2^4 (60 y 120 kg de N 0.5 ha^{-1} , 15 y 45 kg de P_2O_5 0.5 ha^{-1} , 10 y 30 kg de K_2O 0.5 ha^{-1} y 34500 y 40500 plantas 0.5 ha^{-1} de maíz), en el año 2012. Los AT fueron: cultivo simple de maíz (CSM), dos surcos de maíz alternados con dos de frijol (MMFF) y un surco de maíz alternado con uno de frijol (MFMF). El contenido de ProtG fue mayor en los sistemas intercalados MMFF (8.35 %) y MFMF (8.64 %) en comparación del CSM (7.85 %) a la misma D (34500 plantas 0.5 ha^{-1}) y fertilización (60-15-10 kg ha^{-1} de N- P_2O_5 - K_2O). Esto se atribuyó a la eficiencia en el uso de agua, luz y nutrimentos del maíz intercalado y a un mayor periodo funcional de las hojas más largo. En MFMF el Y_m promedio fue 15 % mayor que en CSM y se debió a la proliferación de las plantas, al número de granos por hilera y al peso y tamaño del grano.

Palabras clave: *Zea mays* L., proteína, componentes del rendimiento, diseño factorial y arreglo topológico.

INTRODUCCIÓN

El rendimiento de un cultivo depende de los factores incontrolables de la producción (suelo, clima y biota) y de los controlables (fertilización, arreglos topológicos, composición del cultivo, densidades de población, genotipo, etc.). El manejo de los factores controlables ha sido objeto de múltiples investigaciones agrícolas enfocadas en incrementar el rendimiento de los cultivos y su calidad.

La fertilización básica para los cultivos está constituida por nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). El N es un componente esencial de las proteínas, del ADN, ARN y de la clorofila, y tiene efecto positivo sobre la altura de planta de maíz, el número de granos por mazorca, el peso de 1000 granos e índice de cosecha (Mahmood *et al.*, 2001). El P estimula el crecimiento radical (Ali *et al.*, 2002), participa en la síntesis de proteínas y en los procesos metabólicos de transferencia de energía. El K interviene en la regulación de la presión osmótica y es activador o cofactor de más de 50 enzimas del metabolismo de carbohidratos y proteínas (Alcántar *et al.*, 2012). En el cultivo de maíz, la fertilización con N, P y K incrementa el contenido de proteína en el grano (Györi, 2010).

La calidad de grano del maíz puede ser evaluada con parámetros requeridos para el uso industrial o alimenticio (Györi, 2010). El contenido de proteína y elementos esenciales para la nutrición humana, como el P y K, son algunas características consideradas en la evaluación de la calidad alimenticia. Se ha reportado que el rendimiento del grano de maíz, su contenido de almidón, proteína y aceite difieren en respuesta a la densidad de población (D) y al genotipo (Munamava *et al.*, 2004). Específicamente, una alta D disminuye el rendimiento de grano, el número de granos por mazorca y el número de mazorcas por planta; pues se reduce el suministro de nitrógeno, los fotosintetizados y el agua hacia la mazorca. Además, se genera dominancia apical, competencia por radiación solar, nutrimentos, y por lo tanto afecta la fase reproductiva de la planta (Sangoi, 2001; Abuzar *et al.*, 2011). Sangoi (2001) indica que el maíz es la gramínea más sensible a las variaciones en la D y para cada sistema de producción hay una población que maximiza el rendimiento de grano por hectárea.

En el sistema intercalado de surcos alternos, las especies se siembran en la misma fecha de manera que la colocación o madurez precoz de alguna reduce en lo posible la competencia interespecífica, aun cuando el traslape temporal y espacial de ellas es una característica del sistema (Turrent, 2008; Lithourgidis *et al.*, 2011). Las plantas de maíz y frijol arbustivo tienen

diferente altura de manera que al intercalarse en diferentes arreglos topológicos se aprovecha la complementariedad en la arquitectura del dosel y raíz (Johanne y Lynch, 2012). Se ha reportado que el cultivo intercalado de maíz con frijol maximiza los efectos de complementariedad de las especies y se incrementa el rendimiento del maíz (Li *et al.*, 2001; Malézieux *et al.*, 2009), con respecto al monocultivo bajo condiciones similares de manejo en cuanto a fertilización y riego. Turrent (Com. pers.) encontró rendimientos en grano de maíz de hasta 16.2 t ha⁻¹, intercalado con frijol arbustivo, comparados con 9.6 t ha⁻¹ en monocultivo en el mismo sitio experimental del presente estudio entre los años 2002-2005. Sin embargo, no se tiene información respecto a la calidad del grano de maíz producido en cultivo intercalado. Esta información es necesaria ya que en México el grano de maíz está destinado en su mayoría al consumo humano y es fuente del 39 % de las proteínas de la dieta mexicana (Bourges, 2013). En monocultivos de maíz se han asociado altos rendimientos de grano con una baja concentración de N en el grano, por efecto de dilución (Uribe Larrea *et al.*, 2007; Györi, 2010; Chen *et al.*, 2014). Por tal motivo, se analizó el efecto del arreglo topológico, la dosis de N, P, K y D en el rendimiento y calidad del grano de maíz intercalado con frijol. La hipótesis fue que el rendimiento y calidad del grano del maíz de los sistemas intercalados sería mayor que en el cultivo simple, debido al efecto del arreglo topológico del maíz y frijol con un nivel de manejo similar.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció en el Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX) “El Horno”, del INIFAP durante el ciclo primavera-verano de 2012, en un suelo fluvisol háplico (Govaerts *et al.*, 2008). El sitio (19° 29'N, 98° 53'O) tiene una elevación de 2280 msnm. El promedio de temperatura durante el ciclo de cultivo fue de 19.5 °C, la precipitación de 315 mm y la evaporación promedio diaria de 4.7 mm.

Se manejó un diseño experimental de parcelas divididas con tres tratamientos de parcela grande y 16 tratamientos de parcela chica, con una repetición. La parcela grande correspondió al arreglo topológico de maíz y frijol: 1) cultivo simple de maíz (CSM), 2) dos surcos de maíz alternados con dos de frijol (MMFF) y 3) un surco de maíz alternado con uno de frijol (MFMF). Los 16 tratamientos de parcela chica (Cuadro 1) correspondieron a un experimento factorial 2⁴, para los factores N, P, K y D, cuyos dos niveles para maíz fueron: 60 y 120 kg de

N en 0.5 ha^{-1} , 15 y 45 kg de P_2O_5 en 0.5 ha^{-1} , 10 y 30 kg de K_2O en 0.5 ha^{-1} , 34500 y 40500 plantas en 0.5 ha^{-1} . Los 16 tratamientos de maíz y frijol estuvieron perfectamente alineados en el campo. Los fertilizantes utilizados fueron urea (46 % N), superfosfato de calcio triple (46 % P_2O_5), y cloruro de potasio (60 % K_2O), respectivamente. Cada tratamiento de parcela chica constó de cuatro surcos de 0.8 m de ancho por 2.12 m de longitud, con los dos surcos centrales como parcela útil.

La siembra se hizo manual y con ella se aplicó todo el P, K y 1/3 del N al maíz y el total de los tres elementos al frijol; los 2/3 restantes de N se aplicaron al maíz en la primera escarda. Se regó inmediatamente después de sembrar y se mantuvo al cultivo sin restricciones de humedad durante el ciclo, con riego rodado. El deshierbe fue manual.

El maíz se cosechó 221 días después de la siembra. Todas las mazorcas de cada parcela útil fueron cosechadas, pesadas y desgranadas. La humedad del grano se determinó con un medidor portátil John Deere (SW 16060[®], Ill. EEUU). El rendimiento de grano (Y_m) con 14% de humedad se estimó por superficie compacta; es decir, en 0.5 ha^{-1} ocupada por el maíz en el sistema.

De una muestra de diez mazorcas representativas de cada tratamiento, se registraron las siguientes variables: longitud de mazorca (LM); número de granos por mazorca (NGM), como el producto de número de hileras (NH) x número de granos por hilera (NGH); peso de 100 granos (P100) tomados al azar de la muestra; prolificación (Prol) que fue el número de mazorcas por planta; profundidad de grano (ProfG) como la diferencia entre el diámetro de mazorca y el diámetro de olote, dividido entre dos; e índice de desgrane (ID) calculado como el peso del grano entre el peso de mazorca expresado en porcentaje.

Cuadro 1. Lista de tratamientos de parcela chica establecidos en los arreglos topológicos CSM, MMFF y MFMF.

Tratamiento	Maíz				Frijol			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	DP	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	DP
	(kg 0.5 ha ⁻¹)			(plantas 0.5 ha ⁻¹)	(kg 0.5 ha ⁻¹)			(plantas 0.5 ha ⁻¹)
1	60	15	10	34500	12.5	12.5	7.5	75000
2	60	15	10	40500	12.5	12.5	7.5	105000
3	60	15	30	34500	12.5	12.5	22.5	75000
4	60	15	30	40500	12.5	12.5	22.5	105000
5	60	45	10	34500	12.5	37.5	7.5	75000
6	60	45	10	40500	12.5	37.5	7.5	105000
7	60	45	30	34500	12.5	37.5	22.5	75000
8	60	45	30	40500	12.5	37.5	22.5	105000
9	120	15	10	34500	37.5	12.5	7.5	75000
10	120	15	10	40500	37.5	12.5	7.5	105000
11	120	15	30	34500	37.5	12.5	22.5	75000
12	120	15	30	40500	37.5	12.5	22.5	105000
13	120	45	10	34500	37.5	37.5	7.5	75000
14	120	45	10	40500	37.5	37.5	7.5	105000
15	120	45	30	34500	37.5	37.5	22.5	75000
16	120	45	30	40500	37.5	37.5	22.5	105000

De la misma muestra anterior se tomaron al azar granos de maíz, hasta completar 100 g, que se utilizaron para determinar el contenido de proteína (ProtG), fósforo (P) y potasio (K). Para conocer el contenido de ProtG primero se determinó el N total en el grano (que incluye proteínas, péptidos, aminoácidos libres, aminos y amonio); a través del método Kjeldahl, mediante el equipo semiautomatizado Kjelttec-1030 (FOSS[®], Denmark). Con este dato y multiplicándolo por el factor 6.25 se obtuvo el contenido de ProtG (Györi, 2010). El análisis del P y K se hizo mediante una digestión del grano con una mezcla diácida (HNO₃/HClO₄ = 4/2 mL), siguiendo el procedimiento de Etchevers (1992).

Para determinar el efecto del arreglo topológico, la dosis de N, P y K y la D se realizó el análisis de varianza correspondiente al diseño experimental usado (ANOVA, p < 0.05) y análisis de regresión por etapas o stepwise (sle=0.10 sls=0.05 y variables “mudas” o dummy), utilizando el programa SAS[®] versión 9.00. El análisis de varianza indicó las variables

significativas que se incluyeron en los modelos de regresión. En el análisis de varianza se consideraron las interacciones de tres y cuatro factores, dentro de cada arreglo topológico, como parte del error experimental, para la prueba de hipótesis.

Los gráficos de las interacciones significativas se hicieron con promedios de los valores observados de los otros factores que no intervinieron (no fueron significativos) en el efecto factorial analizado (Mercado *et al.*, 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento de grano de maíz (Y_m)

Mediante el análisis de regresión se generó la ecuación del rendimiento de grano estimado (\hat{Y}_m):

$$\hat{Y}_m \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = 5.773 + 0.241K + 0.244D - 0.261PD + 0.885a_2 + 0.471a_1NP + 0.200a_1NK + 0.441a_1PD + 0.622a_2PD$$

donde: N, P, K y D fueron variables que codificaron al N, P_2O_5 , K_2O y D, respectivamente; a_1 y a_2 , representaron a los arreglos topológicos MMFF y MFMF. Las ecuaciones de regresión se pueden exponer en una matriz bidimensional para observar claramente las diferencias en la respuesta (Barrios-Ayala *et al.*, 2003) de los arreglos topológicos a los factores de estudio. De esta forma la ecuación desglosada de \hat{Y}_m (Cuadro 2) indicó que en el nivel bajo de N, P, K y D (60-15-10 kg de N-P-K y 34.5 mil plantas en 0.5 ha^{-1}), el CSM rindió $5.77 \text{ t } 0.5 \text{ ha}^{-1}$, al igual que el sistema MMFF; sin embargo MFMF llegó a $6.65 \text{ t } 0.5 \text{ ha}^{-1}$. En otras palabras, por efecto del arreglo topológico, a la misma dosis de fertilización el rendimiento en MFMF fue 0.88 t mayor que en CSM y MMFF.

De acuerdo a la misma ecuación de \hat{Y}_m , los cambios de dosis de K, de 10 a 30 kg de K_2O y D de 34500 a 40500 plantas en 0.5 ha^{-1} en el CSM tuvieron un efecto positivo en el rendimiento del grano con un incremento de $0.24 \text{ t } 0.5 \text{ ha}^{-1}$ (por arriba de los $5.77 \text{ t } 0.5 \text{ ha}^{-1}$ obtenidos con los niveles bajos de ambos factores); mientras que en los sistemas MMFF y MFMF no hubo respuesta.

Cuadro 2. Ecuación del rendimiento de grano de maíz ($t\ ha^{-1}$) desglosada en una matriz bidimensional para mostrar el efecto del N, P, K, D y arreglos topológicos.

Arreglo topológico y valores de a_1 y a_2 que los representan en la ecuación		
CSM ($a_1=0, a_2=0$)	MMFF ($a_1=1, a_2=0$)	MFMF ($a_1=0, a_2=1$)
5.773 ^{***}		0.885 ^{***}
0.241 k ^{***}		
0.244 d ^{***}		
	0.471 np ^{***}	
	0.200 nk ^{**}	
0.261 pd ^{**}	0.441 pd ^{**}	0.622 pd ^{***}

CME=0.342 y $R^2=62\%$. n, p, k son dosis de N, P_2O_5 y K_2O en $kg\ 0.5\ ha^{-1}$. d es densidad de población en miles de plantas en $0.5\ ha^{-1}$. El espacio de exploración fue 60 y 120 kg de N $0.5\ ha^{-1}$, 15 y 45 kg de P_2O_5 $0.5\ ha^{-1}$, 10 y 30 kg de K_2O $0.5\ ha^{-1}$, 34500 y 40500 plantas $0.5\ ha^{-1}$ en maíz. ^{***} para $p < 10^{-3}$ y ^{**} para $p < 0.01$.

En el arreglo topológico MMFF el rendimiento fue de $6.24\ t\ 0.5\ ha^{-1}$ (por adición de $0.47\ t$ a $5.77\ t\ 0.5\ ha^{-1}$ estimada en niveles bajos de los factores) por efecto de la interacción N x P, también reportada en la literatura (Ali *et al.*, 2002; Vázquez, 2008; Mukhtar *et al.* 2011).

La interacción P x D aumentó el rendimiento de grano tanto en CSM como en los sistemas intercalados aunque el mayor incremento ($0.66\ t\ 0.5\ ha^{-1}$) ocurrió con el sistema MFMF (Cuadro 2). El análisis gráfico del rendimiento observado indicó que con 34,500 plantas en $0.5\ ha^{-1}$ al aumentar la dosis de P, el rendimiento de grano en el CSM y MMFF se incrementó pero no en el sistema MFMF (Figura 1A). La misma tendencia fue observada con los cambios en D a niveles bajos de P_2O_5 (Figura 1C). Sin embargo, con 45,000 plantas en $0.5\ ha^{-1}$ el aumento en la dosis de P, incrementó en $0.68\ t$ el rendimiento de grano en MMFF y MFMF, respectivamente (Figura 1B). Este cambio también ocurrió al incrementar la D con la dosis alta de P (Figura 1D).

En resumen, el \hat{Y}_m más alto fue $7.28\ t$ en $0.5\ ha^{-1}$ y se obtuvo con el arreglo topológico MFMF con 40,500 plantas en $0.5\ ha^{-1}$ y $45\ kg$ de P_2O_5 en $0.5\ ha^{-1}$.

Se mencionó que el CSM rindió menos que el sistema MFMF comparados al mismo nivel de N, P, K y D (Cuadro 2), no obstante que el CSM produjo mazorcas 0.89 cm más largas y con 48 más granos que en el sistema MMFF, de acuerdo a las ecuaciones de regresión para los componentes del rendimiento estimados (Cuadro 3, ecuación de LM y NGM). Acosta (1986) también observó reducciones en la LM y NGM en maíz asociado con frijol respecto del cultivo simple. En este estudio la LM no fue afectada por la dosis de N, a diferencia de los resultados de Bakht *et al.* (2007) que mostraron una relación positiva de la interacción N x LM.

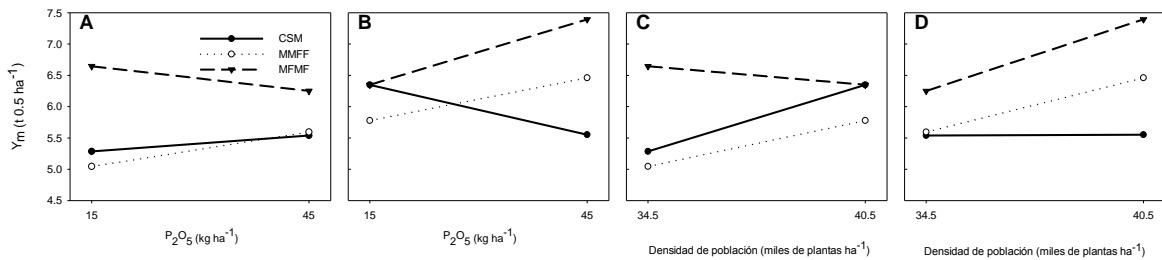


Figura 1. Efecto de la interacción P x D x arreglo topológico (AT) en el rendimiento observado de grano de maíz. A y B) Interacción P x AT en densidad de población baja (34500 plantas 0.5 ha⁻¹) y alta (40500 plantas 0.5 ha⁻¹), respectivamente. C y D) Interacción D x AT en dosis baja de P (15 kg de P₂O₅ 0.5 ha⁻¹) y alta (45 kg de P₂O₅ 0.5 ha⁻¹), respectivamente. CSM = cultivo simple de maíz, MMFF = maíz y frijol intercalados en dos surcos alternos y MFMF = intercalados en un surco alterno.

Los componentes de rendimiento ayudaron a explicar las diferencias en el rendimiento de los tratamientos, atribuidas a alguna estructura vegetal en particular. En el cultivo intercalado MMFF al incrementar la D de 34.5 a 40.5 mil plantas ha⁻¹ el NH disminuyó en promedio de 15.99 en CSM a 15.43 (15.99-0.56=15.43 NH, Cuadro 3 ecuación de NH). Vázquez (2008) menciona que esta interacción es importante en la fase inicial del crecimiento del maíz cuando el sistema radicular puede no ser capaz de absorber suficiente P del suelo. El cultivo simple respondió positivamente a las dosis de P, en dosis bajas tuvo 15.99 NH y en dosis altas 16.25, mientras que en los sistemas intercalados no hubo respuesta.

Cuadro 3. Ecuaciones de regresión de los componentes del rendimiento y P en grano del maíz 'H-155' en función de la respuesta al arreglo topológico N, P, K y densidad de población.

Variable dependiente	Ecuación	R ²
LM (cm)=	$15.37 - 0.89 a_1 + 0.47 a_1 P$	0.339
NGM=	$520.58 - 48.72 a_1$	0.333
NH=	$15.99 + 0.26 P + 0.37 a_1 N - 0.56 a_1 D + 0.47 a_1 NP$	0.410
NGH=	$31.96 - 2.67 a_1 + 1.21 a_1 N + 1.17 a_2 D$	0.348
P100 (g)=	$34.21 - 2.24 a_1 N + 2.03 a_1 P + 2.49 a_1 K + 2.96 a_1 D + 2.61 a_1 NK - 2.14 a_1 PK - 2.40 a_1 KD + 4.17 a_2$	0.589
ProfG (cm)=	$1.01 - 0.03 K - 0.05 KD + 0.07 a_1 KD + 0.07 a_2 K + 0.06 a_2 KD$	0.681
ID =	$88.53 - 1.23 a_1 + 0.64 a_1 P + 0.53 a_1 NP + 0.53 a_1 PK - 0.96 a_2$	0.499
ProI=	$1.13 - 0.06 D - 0.03 NK - 0.06 PK + 0.28 a_1 + 0.12 a_1 PK + 0.08 a_1 PD + 0.30 a_2 + 0.07 a_2 N + 0.13 a_2 PK + 0.07 a_2 KD$	0.831
P grano (%)=	$0.40 + 0.05 N - 0.04 PD + 0.11 a_1 + 0.23 a_2$	0.456

LM=longitud de la mazorca, NGM= número de granos por mazorca, NH=número de hileras, NGH= número de granos por hilera, P100=peso de 100 granos, ProfG= profundidad del grano, ID = índice de desgrane, ProI= prolificación (mazorcas planta⁻¹) y P grano = contenido de fósforo en grano. a₁ = MMFF y a₂ MFMF. N, P, K son dosis de nitrógeno, P₂O₅ y K₂O en kg 0.5 ha⁻¹. D es densidad de población en miles de plantas en 0.5 ha⁻¹. El espacio de exploración fue 60 y 120 kg de N 0.5 ha⁻¹, 15 y 45 kg de P₂O₅ 0.5 ha⁻¹, 10 y 30 kg de K₂O 0.5 ha⁻¹, 34500 y 40500 plantas 0.5 ha⁻¹ en maíz.

Por efecto del arreglo topológico el sistema MFMF tuvo 2.67 NGH menos que el CSM (Cuadro 3, ecuación de NGH). Este arreglo topológico respondió al incremento de N aumentando 0.37 y 1.21 el NH y NGH, respectivamente.

En el arreglo topológico MMFF hubo un efecto negativo de la dosis de N y de las interacciones P x K y K x D en el P100; sin embargo, con la dosis alta de P, K, D y la interacción N x K fue mayor (Cuadro 2, ecuación de P100). El P100 más alto se obtuvo en el arreglo MFMF, el cual fue 12 % mayor que en el cultivo simple y 2.4 % que en el intercalado MMFF. Sharar *et al.* (2003) indicaron que el peso de 1000 granos se afecta positivamente por efecto de la interacción N x P; en el presente estudio esta interacción positiva se presentó en las variables NH, Y_m e ID, todas en el sistema MMFF.

El cultivo simple de maíz presentó la menor ProfG, y considerando las interacciones de los factores al comparar los sistemas, se puede alcanzar una ProfG de hasta 0.92, 1.08 y 1.15 cm en los sistemas CSM, MMFF y MFMF, respectivamente (Cuadro 3, ecuación ProfG). En el sistema MMFF hubo efectos positivos del P y las interacciones N x P, y P x K, en el índice de desgrane.

El cambio de D de 34,500 a 40,500 plantas 0.5 ha^{-1} en CSM disminuyó el número de mazorcas planta^{-1} de 1.13 a 1.07 (Cuadro 3, ecuación Prol). El número de mazorcas por plantas disminuyó al aumentar las densidades debido a la competencia por RFA y nutrientes (Abuzar *et al.*, 2011). La proliferación fue mayor en los sistemas intercalados que en el cultivo simple, comparadas a los mismos niveles de N, P, K y D (Figura 2). A diferencia del maíz en CSM, en los arreglos intercalados hubo efectos positivos que incrementaron la proliferación. En MMFF fueron las interacciones P x K y P x D y en MFMF la dosis de N y la interacción P x K y K x D (Cuadro 3, ecuación de Prol). El efecto positivo del N en la proliferación también ha sido reportado por Bakht *et al.* (2007) con una dosis de 160 kg N ha^{-1} . La interacción P x K fue significativa en los tres arreglos topológicos, a dosis baja de K el incremento de P disminuyó la proliferación de los sistemas MMFF y MFMF y la aumentó en el CSM (Figura 3A); la misma tendencia se observó cuando en dosis baja de P se incrementó la dosis de K (Figura 3C). Sin embargo, en dosis alta de K los sistemas intercalados mejoraron la proliferación por la adición de P (Figura 3B); respuesta similar ocurrió cuando en dosis alta de P se incrementó la dosis de K (Figura 3D). El número de mazorcas por planta en el CSM no fue afectado por la interacción N x P, en contraste con lo reportado por Sharar *et al.* (2003).

Calidad del grano de maíz

La ecuación de regresión para Prot G, en su expresión bidimensional (Cuadro 4), indicó que el contenido en el grano del CSM aumentó de 7.85 % (en 60-15-10 kg en 0.5 ha^{-1} de N-P-K y 34500 plantas ha^{-1}) a 8.04 % por efecto del incremento en la dosis de nitrógeno a 120 kg de N en 0.5 ha^{-1} . El resultado confirma lo que la literatura menciona, la fertilización con N (urea, sulfato de amonio y amonio) incrementa el porcentaje de ProtG en maíz, en cultivo simple (Hanan *et al.*, 2008; Saha *et al.*, 2008).

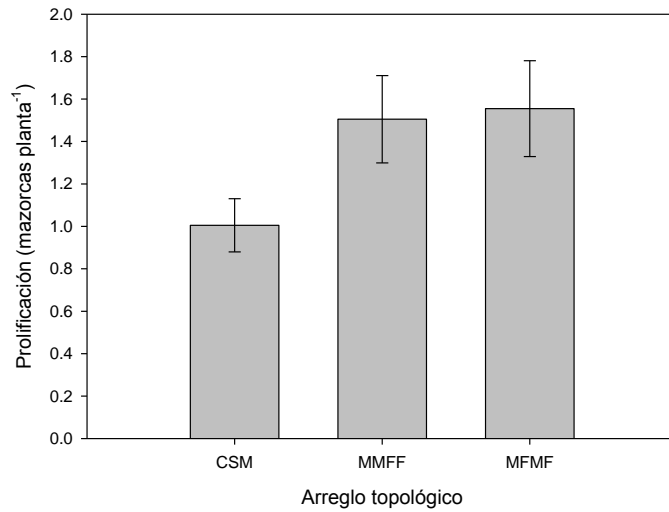


Figura 2. Proliferación observada del maíz en función del arreglo topológico a 60-15-10 kg en 0.5 ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O y 34500 plantas en 0.5 ha⁻¹. CSM = cultivo simple de maíz, MMFF = maíz y frijol intercalados en dos surcos alternos y MFMF = intercalados en un surco alterno. Promedios ± ES.

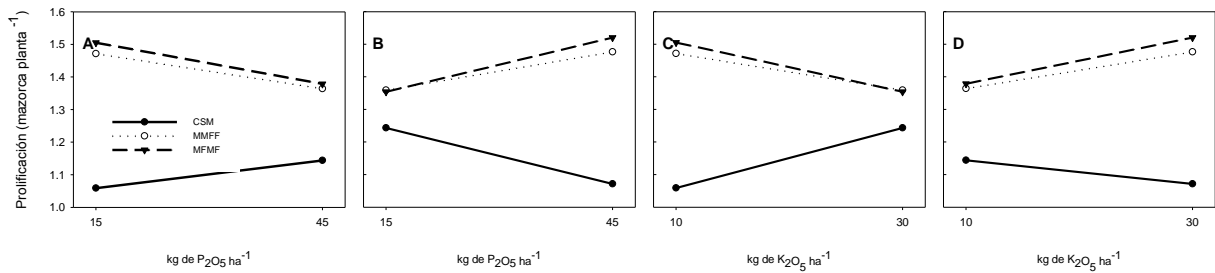


Figura 3. Interacción P x K x arreglo topológico (AT) en la proliferación del maíz. A y B) Interacción P x AT a dosis baja de K (15 kg de K₂O ha⁻¹) y alta (45 kg de K₂O ha⁻¹), respectivamente. C y D) interacción K x AT a dosis baja de P (10 kg de P₂O₅ ha⁻¹) y alta (30 kg de P₂O₅ ha⁻¹), respectivamente. CSM = cultivo simple de maíz, MMFF = maíz y frijol intercalados en dos surcos alternos y MFMF = intercalados en un surco alterno.

Cuadro 4. Ecuación del contenido de proteína en el grano de maíz, desglosada en una matriz bidimensional que muestra el efecto del N, P, K, D y arreglo topológico.

Arreglo topológico y valores de a_1 y a_2 que los representan en la ecuación		
CSM	MMFF	MFMF
($a_1=0, a_2=0$)	($a_1=1, a_2=0$)	($a_1=0, a_2=1$)
7.8543 ***	0.5053 **	0.7925 ***
0.1912 n **		
-0.2425 d *	0.2593 d	

CME=0.198 y $R^2=49\%$. N, P, K son dosis de nitrógeno, P_2O_5 y K_2O en kg 0.5 ha^{-1} . D es densidad de población en miles de plantas en 0.5 ha^{-1} . El espacio de exploración fue 60 y 120 kg de N 0.5 ha^{-1} , 15 y 45 kg de P_2O_5 0.5 ha^{-1} , 10 y 30 kg de K_2O 0.5 ha^{-1} , 34500 y 40500 plantas 0.5 ha^{-1} en maíz. *** para $p < 10^{-3}$, ** para $p < 0.01$ y * para $p < 0.05$.

En el CSM al aumentar la D, de 34500 a 40500 plantas en 0.5 ha^{-1} hubo un detrimento en el contenido de proteína de 0.24 % (Figura 4). Ciampitti y Vyn (2013) indican que la formación de híbridos de maíz entre los años 1940-2011 se ha enfocado a la tolerancia de altas D en monocultivo para generar más rendimiento del grano y esto ha sido indirectamente acompañado por el decremento en la concentración de N en el grano de los híbridos modernos. Sin embargo, el maíz 'H-155' en sistemas intercalados MMFF incrementó 0.23 % el contenido de proteína al aumentar la D (Figura 4).

El grano de maíz de los sistemas intercalados MMFF y MFMF tuvo mayor concentración de ProtG, P y K cuando se comparó con el grano del CSM a la misma dosis de fertilización y D (Figura 5). El único efecto significativo en el contenido de K en el grano de maíz fue en el arreglo topológico MMFF ($p < 0.001$). Considerando la interacción positiva de la D en el sistema MMFF, los porcentajes promedio de ProtG más altos se obtuvieron en los arreglos MMFF y MFMF (8.35 y 8.64 % respectivamente), en comparación de CSM (7.85 %) (Cuadro 4). Específicamente, con la misma dosis, el Y_m fue mayor cuando se cultivó intercalado con respecto del monocultivo, sin que se afectara negativamente el contenido de P y K en el sistema MFMF (Cuadro 2 y Figura 5). Lo anterior fue contrario a lo que se esperaba pues se ha reportado que a mayor rendimiento se da un efecto de dilución de ProtG (Uribe Larrea *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2014).

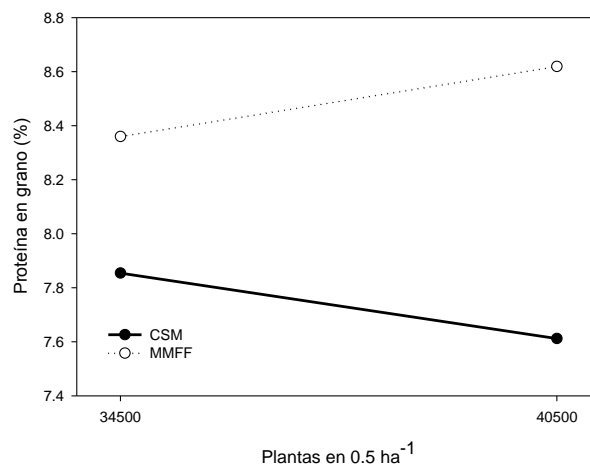


Figura 4. Contenido de proteína estimado en grano de maíz 'H-155' en función de la densidad de población en dos arreglos topológicos a 60-15-10 kg de N-P₂O₅-K₂O en 0.5 ha⁻¹. CSM= cultivo simple de maíz y MMFF = maíz intercalado con frijol en dos surcos alternos.

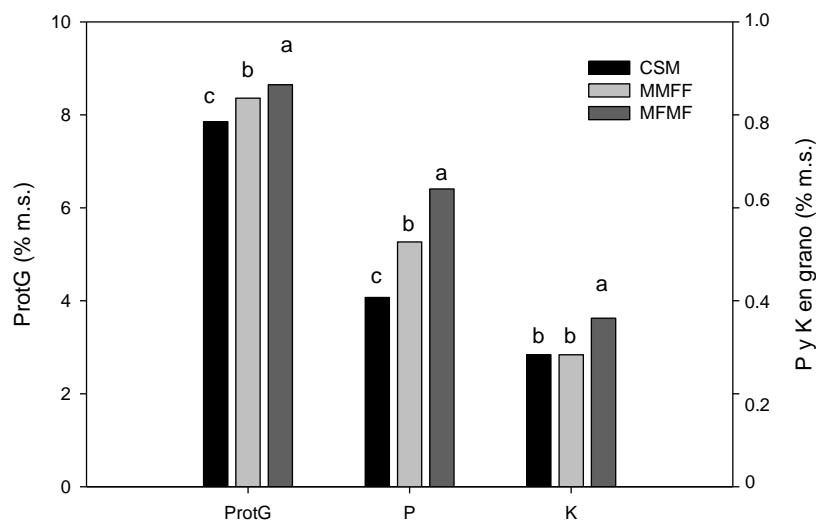


Figura 5. Contenido de proteína (ProtG), de P y de K en el grano de maíz 'H-155' en tres arreglos topológicos con aplicación de 60-15-10 kg en 0.5 ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O y sembrado a 34500 plantas en 0.5 ha⁻¹. CSM = cultivo simple de maíz, MMFF = maíz y frijol intercalados en dos surcos alternos y MFMF = intercalados en un surco alterno. Letras distintas entre barras de cada grupo denotan diferencia significativa ($p \leq 0.05$).

La principal translocación del N en plantas de maíz ocurre del tallo y las hojas basales a las hojas apicales más jóvenes y cercanas a la hoja en que estará la mazorca, durante la prefloración, en condiciones de no estrés, alto rendimiento y monocultivo (Ciampitti y Vin, 2013). Este proceso contribuye a la senescencia de las hojas basales, junto con otros factores como la calidad de la luz a las hojas basales, agua disponible, estrés por hacinamiento etc. (Mi *et al.*, 2003; Ning *et al.*, 2012). Uribelarrea *et al.*, (2007) al comparar la acumulación de N en el grano de híbridos (de alta y baja calidad proteica), argumentan que los híbridos de alta calidad proteica son más eficientes en absorber N en la prefloración. Estas aseveraciones se han hecho en investigación con monocultivos de maíz; sin embargo, en este experimento las hojas basales de los arreglos intercalados permanecieron verdes por más tiempo que las del cultivo simple, de acuerdo a las observaciones de campo. Pommel *et al.* (2006) indican que las plantas que permanecen con follaje verde por más tiempo acumulan más biomasa que aquellas en donde sus hojas senescen más rápidamente. Además, en condiciones de no estrés en el cultivo una buena translocación durante la fase reproductiva es consecuencia de mayor actividad fotosintética (Ciampitti y Vin, 2013). Se sugiere que en los sistemas intercalados el mecanismo de translocación de N, P y K pudo darse durante un periodo más largo con respecto al CSM. Además, cuando se intercala maíz con leguminosas aumenta la absorción de N del maíz y la fijación y transferencia de la leguminosa (Ning *et al.*, 2012). En la obtención del mayor contenido de ProtG, P y K en el grano del sistema MFMF también debieron estar involucrados: 1) la eficiencia en el uso de la RFA que llegó a hasta las hojas basales que aún permanecían activas fotosintéticamente, 2) la mayor distribución radical del maíz intercalado con el frijol (con referencia de CSM) y 3) la disponibilidad de recursos del suelo para el maíz después de la cosecha del frijol. Los puntos 1) y 2) han sido fundamentados en el Capítulo I de la tesis. Se considera que las hojas basales del maíz intercalado funcionaron por más tiempo como fuente de fotosintetizados y elementos móviles como N, P y K (Alcántar *et al.*, 2012), translocando incluso después de la prefloración, pues la senescencia “tardía” no limitó este proceso, en comparación con las hojas basales en CSM. Pérez y Colín (2008) corroboran que a mayor RFA interceptada existe un incremento en algunos componentes del rendimiento del maíz. De acuerdo con Chen *et al.* (2014) este mecanismo y en los sistemas intercalados debe estudiarse a profundidad.

CONCLUSIONES

Por efecto del arreglo topológico, el rendimiento de grano, el contenido de proteína, fósforo y potasio en el grano fueron mayores en el maíz intercalado que en el cultivo simple, aún con la fertilización baja (60-15-10 kg en 0.5 ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O y 34500 plantas en 0.5 ha⁻¹); el arreglo un surco de maíz alternado con uno de frijol fue el mejor en estas variables.

El mayor rendimiento de grano de maíz se presentó en el arreglo topológico un surco de maíz alternado con uno de frijol y se debió al mayor número de mazorcas por planta, de granos por hilera de la mazorca y al peso y tamaño del grano.

LITERATURA CITADA

- Abuzar M R, G U Sadozai, M S Baloch, A A Baloch, I H Shah, T Javaid, N Hussain (2011) Effect of plant population densities on yield of maize. *The Journal of Animal and Plant Sciences* 21: 692-695.
- Acosta D E (1986) Crecimiento, rendimiento y aprovechamiento de la energía solar en maíz (*Zea mays* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en unicultivo y asociados. Tesis de M. en C. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. 163 p.
- Alcántar G G, M V Sandoval, P G Sánchez (2012) Elementos esenciales. *In: Nutrición de Cultivos*. Alcántar G G, L Trejo, L Fernández, M Rodríguez (eds). Biblioteca Básica de Agricultura, México. pp: 8-34.
- Ali J, J Bakht, M Shafi, S Khan, W Ali (2002) Uptake of nitrogen as affected by various combination of nitrogen and phosphorous. *Asian Journal of Plant Sciences* 1: 367-369.
- Bakht J, F Siddique, M Shafi, H Akbar, M Tariq, N Khan, M Zubair, M Yousef (2007) Effect of planting methods and nitrogen levels on the yield and yield components of maize. *Sarhad Journal of Agriculture* 23: 553-559.
- Barrios-Ayala A, A Turrent-Fernández, A Martínez-Garza, J. I. Cortés-Flores, C A Ortiz-Solorio (2003) Optimización tecnológica simultánea para tres híbridos de maíz con precisión definida a priori. *Terra Latinoamericana* 21: 127-135.
- Bourges H R (2013) El maíz: su importancia en la alimentación de la población mexicana. *In: El maíz en peligro ante los transgénicos. Un análisis integral sobre el caso de México*. E Álvarez-Buylla, N A Piñeyro (eds). UNAM-UCCS, México. pp: 231-247.

- Chen Y, C Xiao, X Chen, Q Li, J Zhang, F Chen, L Yuan, G Mi (2014) Characterization of the plant traits contributed to high grain yield and high grain nitrogen concentration in maize. *Field Crops Research* 159: 1-9.
- Ciampitti I A, T J Vyn (2013) Grain nitrogen source changes over time in maize: a review. *Crop Science* 53: 366–377.
- Etchevers B J (1992) Manual de métodos para el análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes. Laboratorio de fertilidad, Colegio de Postgraduados. Estado de México, México.
- Govaerts B, M Barrera-Franco, M A Limón-Ortega, P Muñoz-Jiménez, P K Sayre, J J Deckers (2008) Clasificación y evaluación edafológica de tres sitios experimentales del altiplano central de México. *Tropicultura* 26: 2-9.
- Györi Z (2010) Corn: characteristics and quality requirements. *In: Cereal Grains*. Wrigley y I. Batey. Eds. Pages 183–211. C.
- Hanan S S, M G Abd-El- Kader, H I El-Alia (2008) Yield and yield components of maize as affected by different sources and application rates of nitrogen fertilizer. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences* 4: 399-412.
- Johanne P A, J P Lynch P (2012) Complementarity in root architecture for nutrient uptake in ancient maize/bean and maize/bean/squash polycultures. *Ann. Botany* 110: 521-534.
- Lithourgidis A, C Dordas, C Damalas, D Vlachostergios (2011) Annual intercrops: an alternative pathway for sustainable agriculture. *Australian Journal of Crop Science* 5: 396-410.
- Mahmood M T, M Maqsood, T H Awan, S Rashid (2001) Effect of different levels of nitrogen and intra-row plant spacing on yield and yield components of maize. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences* 38: 1-2.
- Malézieux E, Y Crozat, C Dupraz, M Lawrans, D Makowski, H Ozier-Lafontaine, B Rapidel, S Tourdonnet, M Valantin (2009) Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29: 43–62.
- Mercado R G, A T Fernández, C O Solorio, B P Olvera (2001) Productividad en cebada maltera. II. Análisis de las interacciones de seis factores de la producción. *Agricultura Técnica en México* 27: 95-105.

- Mi G H, J A Liu, F J Chen, F S Zhang, Cui Z L, X S Liu (2003) Nitrogen uptake and remobilization in maize hybrids differing in leaf senescence. *Journal of Plant Nutrition* 26: 237–247.
- Mukhtar T, M Arif, S Hussain, M Tariq, K Mehmood (2011) Effect of different rates of nitrogen and phosphorus fertilizers on growth and yield of maize. *Journal of Agricultural Research* 49: 333-338.
- Munamava M R, A S Goggi, L Pollak (2004) Seed quality of maize inbred lines with different composition and genetic backgrounds. *Crop science* 44: 542-548.
- Ning T, Y Zheng, H Han, G Jiang, Z Li (2012) Nitrogen uptake, biomass yield and quality of intercropped spring-and summer-sown maize at different nitrogen levels in the North China Plain. *Biomass and Bioenergy* 47: 91-98.
- Pommel B, A Gallais, M Coque, I Quillere, B Hirel, J L Prioul, B Andrieu, M Floriot (2006) Carbon and nitrogen allocation and grain filling in three maize hybrids differing in leaf senescence. *The European Journal of Agronomy* 24: 203–211.
- Saha S, K A Gopinath, B L Mina, H S Gupta (2008) Influence of continuous application of inorganic nutrients to a Maize–Wheat rotation on soil enzyme activity and grain quality in a rainfed Indian soil. *The European Journal of Soil Biology* 44: 521-531.
- Sangoi L (2001) Understanding plant density effects on maize growth and development: an important issue to maximize grain yield. *Ciência Rural* 31: 159-168.
- Sharar M S, M Ayub, M A Nadeem, N Ahmad (2003) Effect of different rates of nitrogen and phosphorous on growth and grain yield of maize (*Zea mays* L.). *Asian Journal of Plant Science* 2: 347-349.
- Turrent F A (2008) Cultivos asociados. *In: El cultivo del maíz. Temas selectos.* R Rodríguez, C León (eds). Colegio de Postgraduados-Mundi Prensa. México. pp: 115-125.
- Uribelarrea M, S P Moose, F E Below (2007) Divergent selection for grain protein affects nitrogen use in maize hybrids. *Field Crops Research* 100: 82–90.
- Vázquez G J (2008) Ecofisiología del maíz. Volumen II. FUNDACIÓN PRODUCE UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS, México. 352 pp.
- Pérez R P, S M Colín (2008) Efecto del doble cenit solar en la producción de maíz y frijol II. Componentes del rendimiento de grano. *Scientia CUCBA* 10: 29-60.

**CAPÍTULO III: OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA DE N, P, K Y
DENSIDAD DE POBLACIÓN EN MAÍZ Y FRIJOL INTERCALADOS**

RESUMEN

El objetivo fue determinar la mejor combinación de los factores nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y densidad de población (D) para el cultivo de maíz 'H-155' y frijol negro arbustivo '8025' en tres arreglos topológicos (AT), según la ganancia, la eficiencia relativa de la tierra (ERT) y la eficiencia relativa de la ganancia (ERG). Se estableció un experimento de parcelas divididas en el Campo Experimental Valle de México, en el año 2012. Las parcelas grandes fueron tres arreglos topológicos de maíz y frijol: 1) el cultivo simple de maíz y frijol (CSMF), 2) intercalados en dos surcos alternos (MMFF), y 3) intercalados en un surco alterno (MFMF). La parcela chica constó de 25 tratamientos de un diseño central compuesto rotatable con 5 niveles de los factores. Se determinó el rendimiento de grano (Y_m) y rastrojo (Y_r) de maíz y el rendimiento del grano de frijol (Y_f). Con estos, los costos fijos y variables de cada tratamiento se calcularon las eficiencias relativas de la tierra (ERT) y de la ganancia (ERG). Con las ecuaciones de regresión para Y_m , Y_r y Y_f y, un programa de optimización en SAS se obtuvieron los niveles de N, P, K y D que maximizaron la ganancia. La mayor ganancia se obtuvo en MMFF (\$33,942) con la combinación 34-0-40 kg de N-P₂O₅-K₂O y 29500 plantas en 0.5 ha de maíz y 11-0-30 kg de N-P₂O₅-K₂O y 80000 plantas en 0.5 ha de frijol. Cuando el nivel del N, P, K y D fue constante, el arreglo topológico MMFF también generó más ganancias que los cultivos simples. La mayor ganancia (\$30,472) en el arreglo topológico un surco de maíz alternado con uno de frijol se obtuvo a 60-45-15 kg de N-P₂O₅-K₂O y 40500 plantas, en 0.5 ha de maíz y 12.5-37.5-7.5 kg de N-P₂O₅-K₂O y 105000 plantas, en 0.5 ha de frijol. En MMFF la máxima eficiencia relativa de la tierra fue 1.29 y de la ganancia 2.01. La mayor ERT en MFMF fue 1.27 y con una ERG de 1.58, ambas asociadas a un nivel alto de Y_m de 7.09 t 0.5 ha⁻¹.

Palabras clave: *Zea mays* L., *Phaseolus vulgaris* L., diseño central compuesto rotatable, ERT, ingresos netos.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de maíz y frijol intercalados tiene varios objetivos entre ellos el uso eficiente en términos económicos y agronómicos de los recursos importantes como el agua, la luz y los nutrimentos. Se ha reportado la complementariedad entre el maíz y frijol, pues hacen un mejor uso de los recursos cuando están intercalados que como cultivos simples (Willey, 1990; Johanne y Lynch, 2012), lo cual se refleja en un mayor rendimiento (Li *et al.*, 2001; Malézieux *et al.*, 2009), al mismo nivel de insumos, y se atribuye al arreglo topológico del cultivo.

El sistema: Milpa Intercalada con Árboles Frutales, ha sido diseñado para favorecer la seguridad alimentaria, el ingreso, el empleo familiar y el ambiente. En este sistema, el maíz, algunas leguminosas y los frutales están intercalados en franjas. El sistema responde a las necesidades de las pequeñas unidades de producción (generalmente de 2 a 2.5 hectáreas divididas en varios predios), con alto grado de marginación económica y social. En estas condiciones y con un manejo tradicional, se producen los alimentos básicos maíz y frijol con rendimientos insuficientes para satisfacer las necesidades de alimento y de ingreso familiar.

En la producción de cultivos, la semilla, la variedad y los fertilizantes están considerados entre los insumos más importantes, ya que constituyen una proporción significativa de los costos de producción (Volke, 1982). El método econométrico clásico para establecer la dosis óptima económica en estudios de fertilidad de suelos puede resumirse en los siguientes pasos: 1) diseñar y establecer experimentos factoriales con diversas fórmulas de fertilización y diseño de tratamientos a juicio del investigador; 2) se asume que las deficiencias nutrimentales se reflejarán en los rendimientos observados y se aproxima el rendimiento en términos de una función de los niveles de los insumos, que muestre tanto como sea posible la ley de rendimientos decrecientes; y 3) se obtiene la dosis de nutrimentos que producen al agricultor el máximo ingreso neto por hectárea (Martínez y Martínez, 1996; Volke *et al.*, 2005; Barrios *et al.*, 2003; Barrios *et al.*, 2008).

La eficiencia relativa de la tierra (ERT) es la medida más utilizada para comparar la productividad de los cultivos intercalados (Vandermeer, 1989; Rezaei-Chianeh *et al.*, 2011) en condiciones de limitaciones de tierra de labor. La ERT representa el área requerida de monocultivo para obtener el rendimiento del policultivo al mismo nivel de insumos (Vandermeer, 1989). En una variación de la fórmula de ERT se pueden incluir los ingresos

netos para integrar el factor económico y biológico en la ecuación de eficiencia relativa de la ganancia (ERG).

El objetivo de esta investigación fue determinar la mejor combinación de N, P, K y densidad de población para el cultivo de maíz 'H-155' y frijol negro arbustivo '8025' en diferentes arreglos topológicos, definida en términos de la ganancia o del ingreso neto, la eficiencia relativa de la tierra y la eficiencia relativa de ingresos totales.

La hipótesis fue que por efecto del arreglo topológico y sin aumentar significativamente las dosis de N, P y K y densidad de población (y por consecuencia sus costos variables), el maíz y frijol arbustivo intercalados incrementarían los rendimientos y ganancias comparados con sus monocultivos al mismo nivel de insumos.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el ciclo primavera-verano (10 de abril-17 de noviembre, 2012) se condujo un experimento en el Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX) "El Horno", del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). El sitio, con suelo fluvisol háplico, (19° 29'N, 98° 53'O) tiene una elevación de 2280 msnm. El promedio de temperatura durante el ciclo de cultivo fue de 19.5 °C y la precipitación de 315 mm.

Se manejó un diseño experimental de parcelas divididas con tres tratamientos de parcela grande y 25 tratamientos de parcela chica, con una repetición. La parcela grande correspondió al arreglo topológico de maíz blanco 'H-155' y frijol negro '8025' en: A) cultivo simple de maíz y de frijol (CSMF), B) dos surcos de maíz alternados con dos de frijol (MMFF) y C) un surco de maíz alternado con uno de frijol (MFMF) (Figura 1).

En cada arreglo topológico se evaluaron los factores nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y densidad de población (D). El espacio de exploración varió de 30 a 150 y 0 a 50 kg N; 0 a 60 y 0 a 50 kg P₂O₅; 0 a 40 y 0 a 30 kg K₂O; y 31.5 a 43.5 y 60 a 120 mil plantas en 0.5 ha de maíz y frijol, respectivamente. La combinación de estos factores dieron lugar a los 25 tratamientos de parcela chica de acuerdo a un diseño compuesto central rotatable (Cuadro 1). Este diseño tuvo como base un diseño factorial 2⁴ (dos niveles de los factores: N, P, K y D) en el que los niveles de cada variable se codificaron como -1 y +1, aumentados por 8 puntos axiales codificados como -2 y +2, además de un punto central codificado como 0 (Barrios-Ayala *et al.*, 2003; Volke *et al.*, 2005). Así, el número de tratamientos de parcela chica según

el diseño compuesto central rotatable correspondió a la fórmula 2^k+2k+n ; es decir, $2^4+24+1=25$ tratamientos, distribuidos al azar en los tres arreglos topológicos (75 tratamientos totales). Los tratamientos de parcela chica estuvieron perfectamente alineados en campo. Cada tratamiento de parcela chica constó de cuatro surcos de 0.8 m de ancho por 2.12 m, con los dos surcos centrales como parcela útil.

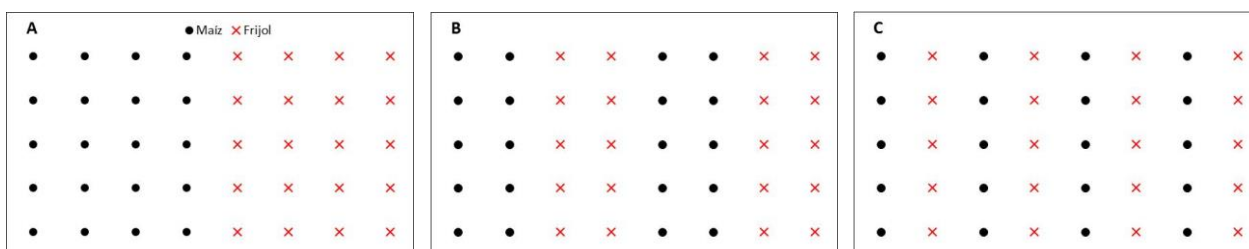


Figura 1. Arreglos topológicos evaluados como parcela grande: A) cultivo simple de maíz y frijol (CSMF), B) dos surcos de maíz alternados con dos de frijol (MMFF) y C) un surco de maíz alternado con uno de frijol (MFMF).

La siembra fue manual y en ella se aplicó todo el P, K y un tercio del N al maíz y todos los tres elementos al frijol; los dos tercios restantes de N se aplicaron al maíz en la primera escarda.

El experimento se mantuvo sin restricción de humedad, mediante riego por surcos y el deshierbe fue manual. La cosecha del frijol fue 125 días después de la siembra; las plantas de cada unidad experimental se extrajeron completas de la parcela, se secaron a la sombra, se desvainaron y se registró el peso del grano limpio de rastrojo. A partir de este dato se estimó el rendimiento del grano en 0.5 ha (Y_f).

El maíz se cosechó a los 221 días después de la siembra. Todas las mazorcas de cada parcela útil fueron cosechadas, pesadas y desgranadas. La humedad del grano al momento de la cosecha se determinó con un medidor portátil John Deere (SW 16060®, III. EEUU). El rendimiento de grano Y_m , con 14% de humedad, se estimó para 0.5 ha, superficie ocupada por el maíz en los arreglos topológicos. El rastrojo del maíz fue cortado y pesado al día siguiente de la cosecha del maíz. La humedad del rastrojo se determinó por el método gravimétrico y fue considerada para calcular el rendimiento del rastrojo (Y_r) en 0.5 ha al 14% de humedad.

Cuadro 1. Lista de tratamientos de parcela chica probados en los arreglos topológicos CSMF, MMFF y MFMF.

Tratamiento	Maíz				Frijol			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	D	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	D
	kg 0.5 ha ⁻¹			pl 0.5 ha ⁻¹	kg 0.5 ha ⁻¹			pl 0.5 ha ⁻¹
1	60	15	10	34500	12.5	12.5	7.5	75000
2	60	15	10	40500	12.5	12.5	7.5	105000
3	60	15	30	34500	12.5	12.5	22.5	75000
4	60	15	30	40500	12.5	12.5	22.5	105000
5	60	45	10	34500	12.5	37.5	7.5	75000
6	60	45	10	40500	12.5	37.5	7.5	105000
7	60	45	30	34500	12.5	37.5	22.5	75000
8	60	45	30	40500	12.5	37.5	22.5	105000
9	120	15	10	34500	37.5	12.5	7.5	75000
10	120	15	10	40500	37.5	12.5	7.5	105000
11	120	15	30	34500	37.5	12.5	22.5	75000
12	120	15	30	40500	37.5	12.5	22.5	105000
13	120	45	10	34500	37.5	37.5	7.5	75000
14	120	45	10	40500	37.5	37.5	7.5	105000
15	120	45	30	34500	37.5	37.5	22.5	75000
16	120	45	30	40500	37.5	37.5	22.5	105000
17	30	30	20	37500	0.0	25.0	15.0	90000
18	150	30	20	37500	50.0	25.0	15.0	90000
19	90	0	20	37500	25.0	0.0	15.0	90000
20	90	60	20	37500	25.0	50.0	15.0	90000
21	90	30	0	37500	25.0	25.0	0.0	90000
22	90	30	40	37500	25.0	25.0	30.0	90000
23	90	30	20	31500	25.0	25.0	15.0	60000
24	90	30	20	43500	25.0	25.0	15.0	120000
25	90	30	20	37500	25.0	25.0	15.0	90000

Nota: los fertilizantes utilizados fueron urea (46 % N), superfosfato de calcio triple (46 % P₂O₅), y cloruro de potasio (60 % K₂O).

Con los datos de Y_m , Y_r y Y_f observados de cada tratamiento se calculó la eficiencia relativa de la tierra (ERT) (Vandermeer, 1989) y la eficiencia relativa de la ganancia (ERG), con las siguientes ecuaciones:

$$ERT = \frac{Y_{\text{frijol intercalado}}}{Y_{\text{frijol monocultivo}}} + \frac{Y_{\text{maíz intercalado}}}{Y_{\text{maíz monocultivo}}}$$

$$ERG = \frac{IN_{\text{maíz intercalado}}}{IN_{\text{maíz cultivo simple}}} + \frac{IN_{\text{frijol intercalado}}}{IN_{\text{frijol cultivo simple}}}$$

donde la ganancia o el ingreso neto (IN) correspondió al ingreso total (IT) menos el costo total (CT), según la relación $IN=IT-CT$. El IT de cada especie se obtuvo al multiplicar los rendimientos de rastrojo y grano de maíz por sus respectivos precios en el punto de venta, lo mismo para el grano de frijol. El CT fue la suma del costo variable (CV) más el costo fijo (CF). El CV de cada tratamiento correspondió a la suma de las cantidades de N, P, K y D utilizado multiplicado por su respectivo precio (Volke, 1982). La lista de precios considerados en el cálculo se presenta en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Lista de precios, del año 2012, considerados en el cálculo de la dosis óptima económica.

	Concepto	Precio (\$)
Costos fijos	Renta de la tierra, seguro agrícola (12 %), barbecho, rastra, surcado, jornales para riego, cuota de agua, deshierbe, cosecha maíz y corte frijol.	6260.00 ha ⁻¹
	N	18.39 kg N ⁻¹
Costos variables	P	23.75 kg P ⁻¹
	K	14.71 kg K ⁻¹
	Precio de la unidad de incluyendo transporte, aplicación manual, interés por el crédito bancario 12% para el ciclo agrícola.	
	Costo de mil plantas maíz-frijol. Costos de siembra.	24.45 mil plantas ⁻¹
Precios de venta	Precio rastrojo empacado y transportado al punto de venta	796 t ⁻¹
	Precio del grano de maíz desgranado y transportado al punto de venta	3742.06 t ⁻¹
	Precio del grano de frijol desvainado y transportado al punto de venta	11444.9 t ⁻¹

Fuente: Volke, 1982; FIRA, 2012; INIFAP, 2012; SE, 2014; información de productores locales.

Utilizando el programa SAS® versión 9.00, se ajustaron los modelos de regresión para las variables dependientes: IN, Y_m , Y_r y Y_f . El modelo general de las ecuaciones fue:

$$\begin{aligned} \text{Variable dependiente} = & \mu + a_1 + a_2 + N + P + K + D + NP + NK + ND + PK + \\ & PD + KD + N^2 + P^2 + K^2 + D^2 + a_1N + a_1P + a_1K + a_1D + a_1NP + a_1NK + a_1ND + \\ & a_1PK + a_1PD + a_1KD + a_1N^2 + a_1P^2 + a_1K^2 + a_1D^2 + a_2N + a_2P + a_2K + a_2D + a_2NP + \\ & a_2NK + a_2ND + a_2PK + a_2PD + a_2KD + a_2N^2 + a_2P^2 + a_2K^2 + a_2D^2 + e \end{aligned}$$

Los arreglos topológicos se incluyeron como variables “dummy” o auxiliares que para el caso de tres arreglos topológicos tomaron los valores de: $a_1=0$ y $a_2=0$ para el arreglo CSMF, $a_1=1$ y $a_2=0$ para MMFF y $a_1=0$ y $a_2=1$ para MFMF. La respuesta de los arreglos topológicos fue la suma algebraica de los términos sin alguna “a”, más los términos homólogos que correspondían al efecto de los factores de manejo; esto es, que todos los términos con “a” en las ecuaciones son diferencias de respuesta entre arreglos topológicos (Barrios *et al.*, 2003; Barrios *et al.*, 2008). Los factores fueron codificados en sus cinco niveles, igualmente espaciados, como: $n = \frac{(N-115)}{42.5}$, $p = \frac{(P-55)}{27.5}$, $k = \frac{(k-35)}{17.5}$ y $d = \frac{(D-127.5)}{18}$.

El procedimiento de regresión (backward sls=0.20) incluyó a los factores significativos ($p < 0.05$) en cada variable dependiente. Con la ecuación resultante de IN se hizo un programa de optimización en SAS® que mostró el máximo ingreso neto (IN) o ganancia con su combinación de N, P, K y D de cada arreglo topológico.

Una vez conocido el nivel de factores que maximizó la ganancia en los tres arreglos topológicos se consideró la dosis óptima económica (DOE) de los cultivos simples de maíz y frijol para comparar con los otros arreglos al mismo nivel de insumos. Para esto se sustituyeron los niveles de insumos de esta DOE en las ecuaciones de regresión para conocer el efecto del arreglo topológico en \hat{Y}_m , \hat{Y}_r , \hat{Y}_f .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la ecuación del ingreso neto estimado (\hat{IN}) (Cuadro 3) se obtuvo la DOE que maximizó la ganancia de cada arreglo topológico. La mayor ganancia fue de \$33,942 y se obtuvo con el arreglo topológico intercalado MMFF con la combinación 34-0-40 kg de N-P₂O₅-K₂O y 29.5 mil plantas en 0.5 ha de maíz y 11-0-30 kg de N-P₂O₅-K₂O y 80 mil plantas en 0.5 ha de frijol (Cuadro 4). En este arreglo topológico se requirió el menor uso de N, siendo esta una característica económica y ambientalmente importante de los sistemas intercalados pues implica el menor uso de insumos y costos de producción (Lithourgidis *et al.*, 2011). Esta DOE en el sistema MMFF es apropiada para el caso de un productor que tenga satisfechos los requerimientos de maíz y frijol de la dieta familiar y esté interesado en el máximo ingreso neto.

Cuadro 3. Ecuaciones de regresión del ingreso neto, rendimiento de grano y de rastrojo de maíz y grano de frijol.

Variable	Ecuación de regresión	R^2
$\hat{IN} =$	$23381 + 4858.8019 a_2 + 887.3316 k - 993.5592 n^2 + 1569.4156 d^2$ $+ 1590.327 a_1 n p + 1722.9694 a_1 n^2 - 1286.7531 a_2 k^2 - 2136.6628 a_2 d^2$	0.49
$\hat{Y}_m =$	$4.8456 + 0.3685 n + 0.1441 p^2 + 0.6437 a_1 + 0.3592 a_1 n + 0.4240 a_1 n p$ $- 0.3831 a_1 p^2 + 1.1548 a_2 + 0.2959 a_2 n - 0.2817 a_2 k + 0.4324 a_2 p d$	0.48
$\hat{Y}_r =$	$5.6934 + 0.1214 n - 0.1231 n^2 + 0.4701 a_1 + 0.2280 a_1 d + 0.1897 a_1 n p$ $+ 0.1826 a_1 p d + 0.8687 a_2$	0.55
$\hat{Y}_f =$	$1.0897 + 0.0472 n + 0.0457 k + 0.1352 d + 0.1056 d^2 + 0.1004 a_1$ $- 0.0791 a_1 d - 0.1686 a_2 - 0.1173 a_2 d$	0.51

Codificación para los cinco niveles de los factores de estudio: $n = \frac{(N-115)}{42.5}$, $p = \frac{(P-55)}{27.5}$, $k = \frac{(k-35)}{17.5}$ y $d = \frac{(D-127.5)}{18}$. $a_1 =$ codificación de MMFF y $a_2 =$ MFMF como variables dummy que pueden asumir el valor de 0 o 1 para conocer su efecto en la variable de respuesta. $\hat{IN} =$ ingreso neto estimado. \hat{Y}_m , \hat{Y}_r y $\hat{Y}_f =$ rendimientos estimados de grano de maíz, rastrojo de maíz y grano de frijol, respectivamente.

La DOE estimada de la ecuación de IN mostró que no se requiere del P₂O₅, en ningún arreglo topológico, para alcanzar el máximo ingreso, esto puede deberse a que el suelo del sitio experimental ha estado recibiendo dosis altas y constantes de fertilización en los últimos

20 años dejando un posible reservorio nutrimental al menos de P. El arreglo MMFF proporcionó \$5,046 más ganancia y el arreglo MFMF \$2,595 más que el CSMF. Estas DOE para los arreglos MMFF y MFMF son útiles para productores que toman la decisión de adopción de tecnología basados en los ingresos generados (Seran y Brintha, 2010).

Cuadro 4. Optimización de N, P, K y densidad de plantación en tres arreglos topológicos de maíz y frijol arbustivo, basada en la mayor ganancia.

Arreglo topológico		Dosis óptima económica					ÎN (\$ ha ⁻¹)	Max IN (\$ ha ⁻¹)
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	D			
		kg 0.5 ha ⁻¹			pl 0.5 ha ⁻¹			
CSMF	Maíz	86	0	23	33.5			
	Frijol	24	0	17	62.0			
Total ha ⁻¹		110	0	40	94.5	28,895	28,895	
MMFF	Maíz	34	0	40	29.5			
	Frijol	11	0	30	80.0			
Total ha ⁻¹		45	0	70	109.5	33,942	33,942	
MFMF	Maíz	90	0	34	35.0			
	Frijol	25	0	26	83.5			
Total ha ⁻¹		115	0	60	118.5	31,491	30,472	

ÎN = ingreso neto estimado. CSMF cultivo simple de maíz y de frijol, MMFF= dos surcos de maíz alternados con dos de frijol y MFMF= un surco de maíz alternado con uno de frijol. Max IN = máximo IN del arreglo topológico.

La comparación entre los arreglos topológicos también debe de hacerse al mismo nivel de insumos determinada por la respuesta del cultivo simple a sus condiciones óptimas (Vandermeer, 1989). Entonces, contrastando las ganancias del sistema intercalado al mismo nivel de insumos, se obtuvieron \hat{Y}_m , \hat{Y}_r y \hat{Y}_f , con sus respectivas ecuaciones de regresión (Cuadros 3 y 5). Se observó también que la mayor ganancia se obtuvo en el arreglo MMFF (\$29,293 ha⁻¹) comparado con el CSMF (\$28,895 ha⁻¹). A este nivel de insumos los costos fijos y variables fueron los mismos en los arreglos topológicos por lo que la diferencia entre

ellos se debió a los rendimientos de las dos especies. En el arreglo MFMF se obtuvo el mayor Y_m observado de 7.16 t en 0.5 ha con el tratamiento 23. Sin embargo, no estuvo en este arreglo topológico la mayor ganancia, ni la mayor ERT, pues hubo una depresión en el rendimiento del frijol comparado con el obtenido en CSMF. La disminución del 12 a 55% en el rendimiento del frijol o soya intercalados con maíz ha sido reportada por otros autores (O'Callaghan *et al.*, 1994; Lesoing y Santalla *et al.*, 2001; Matusso *et al.*, 2014). La bibliografía revisada indica que esto se debe a la competencia interespecífica por luz, agua y nutrimentos en que se ve en ventaja el maíz. El maíz tiene más área foliar y distribución radical (Hai-Yong *et al.*, 2013) que el frijol; así, el maíz intercalado intercepta más radiación fotosintéticamente activa que transforma en biomasa del grano (Tsubo y Walker, 2002).

En el sistema MMFF en que se presentó la mayor ganancia el rendimiento del maíz fue 12 % mayor y el del frijol 10 % menor respecto del sistema CSMF. En este arreglo topológico se observó la facilitación en términos ecológicos (Gliessman y Francis, 1986) lo que implicó que el rendimiento del maíz aumentara sin afectar el rendimiento del frijol.

Las mayores ERT observadas fueron de 1.29 en el sistema MMFF en el tratamiento 13; mientras que en MFMF la máxima ERT fue 1.27 en el tratamiento 20 (Cuadros 5 y 6). Un valor de ERT de 1.29 en MMFF significa que se requiere de 1.29 ha de cultivos simples para alcanzar los rendimientos del cultivo simple, comparados al mismo nivel de insumos. En promedio, la ERT de los sistemas MMFF y MFMF fue mayor que uno. En condiciones de producción en que la tierra de cultivo es un factor limitante la ERT es un buen indicador para elegir la mejor combinación de insumos que la maximiza.

En MFMF la ERT de 1.27 estuvo acompañada de una alta ERG (1.58) con un rendimiento de grano de maíz igual a 7.09 t 0.5 ha⁻¹ al nivel de insumos del tratamiento 20 (Cuadros 1 y 6). Sin embargo con el tratamiento 6 (60-45-15 kg de N-P₂O₅-K₂O y 40500 plantas, en 0.5 ha de maíz y 12.5-37.5-7.5 kg de N-P₂O₅-K₂O y 105000 plantas, en 0.5 ha de frijol) se obtuvo la mayor ganancia (\$30, 472 ha⁻¹) del arreglo topológico MFMF con buen rendimiento de grano de maíz (6.71 t 0.5 ha⁻¹). Este nivel de insumos en MFMF sería una buena opción para los productores para quienes el suministro de maíz de buena calidad para autoconsumo es determinante para garantizar su seguridad alimentaria y los ingresos netos son aporte a la economía familiar. Este tipo de productores son la población objetivo para quienes está diseñado el sistema MIAF y quienes de manera general poseen superficies pequeñas de

producción y obtienen del maíz el 53 % de la ingesta calórica y el 39 % de la proteína de la dieta (Bourges, 2013; Turrent *et al.*, 2013). Un beneficio adicional del MFMF es el incremento de la proteína, P y K en el grano de maíz, por efecto de este arreglo topológico, que no están cuantificados en términos de ingresos netos. La proteína del grano de maíz se incrementó de 7.85% en CSMF a 8.64% en MFMF, asociado a altos rendimientos de Y_m comparados al mismo nivel de N, P, K y D en los arreglos topológicos, según se demostró en el Capítulo II de la tesis. La propuesta es que se destine la superficie de cultivo de maíz y frijol intercalado en MFMF con los niveles del tratamiento 6 (Cuadro 1). De esta forma se obtendrán más ganancias que en el cultivo simple y un buen rendimiento de maíz con calidad proteica tanto para el productor como para el consumidor.

Cuadro 5. Valores máximos y mínimos observados de eficiencia relativa de la tierra (ERT) en cultivo de maíz y frijol arbustivo en MMFF, y sus respectivos valores de eficiencia relativa de la ganancia, ingresos netos, rendimiento de grano y rastrojo de maíz y grano de frijol.

Tratamiento	Maíz		Frijol		ERT	ERG	IN (\$ (\$ ha ⁻¹))	Y _m	Y _r	Y _f
	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O kg 0.5 ha ⁻¹	D pl. 0.5 ha ⁻¹	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O kg 0.5 ha ⁻¹	D pl 0.5 ha ⁻¹						
13	120-45-10	34500	37.5-37.5-7.5	75000	1.29	1.66	26,653	5.64	6.39	1.27
1	60-15-10	34500	12.5-12.5-7.5	75000	1.26	1.44	28,789	5.36	6.46	1.29
18	150-30-20	37500	50.0-25.0-15.0	90000	1.22	2.01	25,469	5.93	6.20	1.16
4	60-15-30	40500	12.5-12.5-22.5	105000	1.21	1.39	33,942	5.94	6.33	1.68
6	60-45-10	40500	12.5-37.5-7.5	105000	1.20	1.37	30,695	5.72	6.14	1.55
7	60-45-30	34500	12.5-37.5-22.5	75000	1.01	1.01	27,316	6.04	5.22	1.19
15	120-45-30	34500	37.5-37.5-22.5	75000	0.99	0.99	24,060	5.07	5.64	1.33
12	120-15-30	40500	37.5-12.5-22.5	105000	0.89	0.84	26,900	5.27	6.38	1.42
19	90-0-20	37500	25.0-0.0-15.0	90000	0.88	0.78	21,644	5.21	5.36	0.87
25	90-30-20	37500	25.0-25.0-15.0	90000	0.83	0.70	19,633	4.60	6.30	0.94

Cuadro 6. Valores máximos y mínimos observados de eficiencia relativa de la tierra (ERT) en cultivo de maíz y frijol arbustivo en MFMF, y sus respectivos valores de eficiencia relativa de la ganancia, ingresos netos, rendimiento de grano y rastrojo de maíz y grano de frijol.

Tratamiento	Maíz		Frijol		ERT	ERG	IN (\$ (\$ ha ⁻¹))	Y _m	Y _r	Y _f
	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	D	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	D						
	kg 0.5 ha ⁻¹	pl. 0.5 ha ⁻¹	kg 0.5 ha ⁻¹	pl 0.5 ha ⁻¹						
20	90-60-20	37500	25.0-50.0-15.0	90000	1.27	1.58	28,184	7.09	6.46	0.97
22	90-30-40	37500	25.0-25.0-30.0	90000	1.26	1.56	25,856	6.85	6.82	0.75
17	30-30-20	37500	0.0-25.0-15.0	90000	1.25	1.53	23,408	6.09	6.62	0.62
13	120-45-10	34500	37.5-37.5-7.5	75000	1.23	1.51	25,648	6.06	6.53	1.03
6	60-45-15	40500	12.5-37.5-7.5	105000	1.14	1.22	30,472	6.71	7.05	1.15
10	120-15-10	40500	37.5-12.5-7.5	105000	0.91	0.85	28,222	6.46	6.42	0.89
23	90-30-20	31500	25.0-25.0-15.0	60000	0.91	0.82	28,043	6.80	6.90	0.83
12	120-15-30	40500	37.5-12.5-22.5	105000	0.88	0.79	27,569	6.60	6.39	1.04
21	90-30-0	37500	25.0-25.0-0.0	90000	0.83	0.63	18,934	4.91	6.97	0.68
2	60-15-10	40500	12.5-12.5-7.5	105000	0.82	0.67	20,795	5.06	5.86	0.81

CONCLUSIONES

La ganancia económica fue mayor en los sistemas intercalados que en los cultivos simples de maíz y frijol. En el arreglo topológico de dos surcos de maíz alternados con dos de frijol se obtuvo la mayor ganancia que fue de \$33,942 con la combinación 34-0-40 kg de N-P₂O₅-K₂O y 29500 plantas en 0.5 ha de maíz y 11-0-30 kg de N-P₂O₅-K₂O y 80 mil plantas en 0.5 ha de frijol; en comparación del cultivo simple de maíz y frijol (\$28,895 ha⁻¹). El mismo arreglo topológico también generó más ganancia económica, cuando el nivel del nitrógeno, fósforo, potasio y densidad de población fue constante en la comparación; y la máxima eficiencia relativa de la tierra fue 1.29 y de la ganancia 2.01.

La mayor ganancia (\$30,472 ha⁻¹) en el arreglo topológico un surco alternado de maíz con uno de frijol se obtuvo con la combinación 60-45-15 kg de N-P₂O₅-K₂O y 40500 plantas, en 0.5 ha de maíz y 12.5-37.5-7.5 kg de N-P₂O₅-K₂O y 105000 plantas, en 0.5 ha de frijol. En este arreglo topológico la más alta eficiencia relativa de la tierra fue 1.27 y su respectiva eficiencia relativa de la ganancia fue 1.58. Ambas estuvieron asociadas a un alto rendimiento de grano de maíz (7.09 t 0.5 ha⁻¹).

LITERATURA CITADA

- Barrios-Ayala A., Turrent-Fernández A., Martínez-Garza A., Cortés-Flores J. I., y Ortiz-Solorio, C. A. 2003. Optimización tecnológica simultánea para tres híbridos de maíz con precisión definida a priori. *Terra Latinoamericana*, 21(1), 127-135.
- Barrios A., A Turrent F., R Ariza F., M Otero S. y A Michel A. 2008. Interacción genotipos x prácticas de manejo en el rendimiento de grano de híbridos de maíz. *Agricultura Técnica en México* 34: 85-90.
- Bourges H., R. 2013. El maíz: su importancia en la alimentación de la población mexicana. En: *El maíz en peligro ante los transgénicos. Un análisis integral sobre el caso de México.* Álvarez-Buylla E., Piñeyro N. (eds). UNAM-UCCS, México. pp: 231-247.
- FIRA (2012). Agrocostos para cultivo de maíz y frijol del ciclo primavera verano del año 2012. <http://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/TemasUsuario.jsp> [consultado del 26 de julio de 2014].
- Gliessman S. R. and Francis, C. A. 1986. Plant interactions in multiple cropping systems. En: *Multiple cropping systems.* Francis, C.A. Macmillan Publishing Company. pp. 82-95.

- Hai-Yong X., Z. Jian-Hua., S. Jian-Hao., B. Xing-Guo B., P. Christie., Z. Fu-Suo., and L. Long. 2013. Dynamics of root length and distribution and shoot biomass of maize as affected by intercropping with different companion crops and phosphorus application rates. *Field Crops Res.* 150: 52-62.
- INIFAP (2012).Lista de precios y tarifas. [http://intranet.inifap.gob.mx/informa/coor_investigacion/20080506_lista_de_precios_\(2\).pdf](http://intranet.inifap.gob.mx/informa/coor_investigacion/20080506_lista_de_precios_(2).pdf) [consultado del 26 de julio de 2014].
- Johanne P. A. and J. P. Lynch P. 2012. Complementarity in root architecture for nutrient uptake in ancient maize/bean and maize/bean/squash polycultures. *Ann. Botany* 110: 521-534.
- Lesoing G.W. and Francis C.A., 1999. Strip intercropping effects on yield and yield components of corn, grain sorghum, and soybean. *Agron. J.* 91, 807–813.
- Li L., S. Jianhao., Z. Fusuo., L. Xialolin., Y. Sicun., and R. Zdenko. 2001. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping I. Yield advantage and interespecific interactions on nutrients. *Field Crops Res.* 71: 123-137.
- Lithourgidis A. S., Dordas, C. A., Damalas, C. A., and Vlachostergios, D. N. 2011. Annual intercrops: an alternative pathway for sustainable agriculture. *Australian Journal of Crop Science*, 5(4), 396-410.
- Malézieux E, Y. Crozat, C. Dupraz, M. Lawrans, D. Makowski, H. Ozier-Lafontaine, B. Rapidel, S. Tourdonnet, and M Valantin. 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29: 43–62.
- Turrent F., A., Barros C., Álvarez-Buylla E., González E., Hazam J., Eccardi F., Piñeyro A. 2013. El maíz transgénico en México (en 15 píldoras). UCCS, México. 44p
- Martínez, G. A., y Martínez, D. M. A. 1996. Diseño de experimentos con fertilizantes. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo y Colegio de Postgraduados. México. Publicación Especial, 5. 155p.
- Matusso J.M.M., Mugwe, J. N., and Mucheru-Muna, M. 2014. Effects of Different Maize (*Zea mays* L.)–Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) Intercropping Patterns on Yields and its Economics.). *Advanced Journal of Agricultural Research* 2:38-48.
- O'Callaghan J., C. Maende., and G. Wyseure. 1994. Modelling the intercropping of maize and beans in Kenya. *Comput. Electron. Agric.* 11: 351-365.

- Rezaei-Chianeh E., A Dabbagh M., M. R. Shakiba., K Ghassemi-Golezani., S Aharizad and F Shekari. 2011. Intercropping of maize (*Zea mays* L.) and faba bean (*Vicia faba* L.) at different plant population densities. *African Journal of Agricultural Research* 6(7): 1786-1793.
- Santalla M., A. Rodiño., and A. Casquero. 2001. Interactions of bush bean intercropped with field and sweet maize. *Eur. J. Agron.* 15: 185-196.
- SE. Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados. Secretaría de Economía. Precios del año 2012. <http://www.economia-sniim.gob.mx/nuevo/> [consultado del 26 de julio de 2014].
- Seran, T. H., and Brintha, I. 2010. Review on maize based intercropping. *Journal of agronomy*, 9:135-145.
- Tsubo M., and S. Walker. 2002. A model of radiation interception and use by a maize-bean intercrop canopy. *Agric. For. Meteorol.* 110: 203-215.
- Vandermeer, J. H. 1989. *The ecology of intercropping*. Cambridge University Press. 237 p.
- Volke H. V. 1982. Optimización de insumos de la producción en la agricultura. Colegio de Postgraduados. México. 61 p.
- Volke H. V., A. Turrent F. y Castillo M. 2005. Diseños de tratamientos y estimación de funciones de respuesta en la investigación agrícola. Colegio de Postgraduados. Estado de México. 68 p.
- Willey R., W. 1990. Resource use in intercropping systems. *Agric. Water Manage.* 17: 215-231.

CONCLUSIONES GENERALES

Las raíces del maíz tuvieron más área de exploración que las del frijol; además, invadieron lateralmente y verticalmente los surcos de frijol cuando estaban intercalados. Ambas especies alcanzaron su mayor profundidad de enraizado a los 71 días después de la siembra.

En el arreglo topológico un surco de maíz alternado con uno de frijol, las raíces de maíz estuvieron presentes en un área de 7,681 cm², mientras que las de frijol solamente 2,174 cm². Así mismo, se tuvo una mejor distribución de la radiación fotosintéticamente activa en el dosel de la planta de maíz. A esto se atribuyó el alto rendimiento del grano de maíz, biomasa y contenidos de proteína, N, P y K en grano. En contraste, el frijol de este arreglo topológico tuvo 38 % menos área con presencia de raíces respecto de su cultivo simple, lo que se asoció con la disminución de: la biomasa desde la prefloración, el IAF en el llenado de vaina y su rendimiento. El incremento en el rendimiento del maíz en este sistema intercalado se debió al mayor número de mazorcas por planta, de granos por hilera de la mazorca y el peso y tamaño del grano. En este sistema la máxima ganancia fue \$30,472 ha⁻¹ con un buen rendimiento del grano de maíz (6.71 t 0.5 ha⁻¹).

La más alta eficiencia relativa de la tierra y de la ganancia, así como la mayor ganancia (\$33,942) se presentó en el arreglo topológico dos surcos de maíz alternados con dos de frijol.

LITERATURA CITADA EN LA INTRODUCCIÓN GENERAL

- Bourges, H., R. 2013. El maíz: su importancia en la alimentación de la población mexicana. In: El maíz en peligro ante los transgénicos. Un análisis integral sobre el caso de México. In: Álvarez-Buylla E., y N. Piñeyro A. (eds). UNAM-UCCS, México. pp: 231-247.
- Chen Y., C. Xiao., X. Chen., Q. Li., J. Zhang., F. Chen., L. Yuan., and G. Mi. 2014. Characterization of the plant traits contributed to high grain yield and high grain nitrogen concentration in maize. *Field Crops Res.* 159: 1-9.
- Clark E., A., and C. Francis A. 1985. Transgressive yielding in bean: maize intercrops; interference in time and space. *Field Crops Res.* 11: 37-53.
- Cortés F., J. I., J. Torres Z., A. Turrent F., E. Hernández R., A. Ramos S., L. Jiménez S. 2012. Manejo Actualizado para el Establecimiento y Manejo del Sistema Milpa Intercalada con Árboles frutales (MIAF) en Laderas. Colegio de Postgraduados. México. 30 p.
- Gliessman S., R., and C. Francis A. 1986. Plant interactions in multiple cropping systems. In: Francis C.A. (ed). Multiple cropping systems. EE.UU. pp: 82-95.
- Györi, Z. 2010. Corn: characteristics and quality requirements. In: Wrigley Y., and I. Batey. (eds). *Cereal Grains*. Pp:183–211.
- Hamdollah E. 2012. Intercropping of Maize (*Zea mays*) with Cowpea (*Vigna sinensis*) and Mungbean (*Vigna radiata*): effect of of intercrop components on resource consumption, dry matter production and legumes forage quality. *J. Basic Appl. Sci.* 2: 355-360.
- Hernández X., E., R. Ramos A., M. Martínez A. 1991. Etnobotánica. In: Engleman E. (ed). Contribuciones al conocimiento del frijol (*Phaseolus*) en México. Colegio de Postgraduados, México. pp: 113-138.
- Johanne P., A., and J. Lynch P. 2012. Complementarity in root architecture for nutrient uptake in ancient maize/bean and maize/bean/squash polycultures. *Ann. Botany* 110: 521-534.
- Malézieux E., Y. Crozat., C. Dupraz., M. Lawrans., D. Makowski., H. Ozier-Lafontaine., B. Rapidel., S. de Tourdonnet., and M. Valantin. 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 29: 43–62.
- Ndakidemi P., A. 2006. Manipulating legume/cereal mixtures to optimize the above and below ground interactions in the traditional African cropping systems. *Afr. J. Biotechnol.* 5: 2526-2533.

- Santalla M., A. Rodiño., and A. Casquero. 2001. Interactions of bush bean intercropped with field and sweet maize. *Eur. J. Agron.* 15: 185-196.
- Santiago-Mejía E., J. Cortés-Flores., A. Turrent-Fernández., E. Hernández-Romero., y D. Jaen-Contreras. 2008. Calidad del fruto de duraznero en el sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales en laderas. *Agric. Tec. Mex.* 34: 159-166.
- Sivakumar M., and S. Virmani. 1984. Crop productivity in relation to interception of photosynthetically active radiation. *Agric. For. Meteorol.* 31: 131-134.
- Torres J., Z., J. Cortés F., A. Turrent F., E. Hernández R., y A. Muratalla L. 2008. Rendimiento de fruto y número de ramas principales en árboles de durazno intercalado con milpa. *Terra Latinoam.* 26: 265-273.
- Tsubo M., and S. Walker. 2002. A model of radiation interception and use by a maize-bean intercrop canopy. *Agric. For. Meteorol.* 110: 203-215.
- Turrent F., A. 2008. Cultivos asociados. *In: Rodríguez R., y León C. (eds). El cultivo del maíz. Temas selectos. Colegio de Postgraduados-Mundi Prensa. México. pp: 115-125.*
- Uribelarrea M., S. MooseP., F. Below E. 2007. Divergent selection for grain protein affects nitrogen use in maize hybrids. *Field Crops Res.* 100: 82-90.