

DISTRIBUCIÓN DE RAICES Y DE RADIACIÓN SOLAR EN EL DOSEL DE MAÍZ Y FRIJOL INTERCALADOS

ROOT DISTRIBUTION AND SOLAR RADIATION IN MAIZE-BEAN INTERCROPPING SYSTEMS

Rocio Albino-Garduño¹, Antonio Turrent-Fernández², J. Isabel Cortés-Flores^{3*},
Manuel Livera-Muñoz⁴, M. Carmen Mendoza-Castillo⁴

¹Universidad Intercultural del Estado de México. División de Desarrollo Sustentable. Libramiento Francisco Villa S/N. San Felipe del Progreso Estado de México C.P. 50640. ³Edafología. ⁴Genética. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. ²Campo Experimental Valle de México. INIFAP. Carretera los Reyes-Texcoco, Km.13.5, 56250. Coatlínchán, Texcoco, Estado de México.

RESUMEN

Los sistemas intercalados de maíz con frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) han aumentado el rendimiento de las especies en comparación con sus cultivos simples y esta ventaja se debería a la complementariedad fisiológica de las especies y a la eficiencia en el uso de los recursos. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue analizar el efecto del arreglo espacial del maíz y frijol, en la distribución de la biomasa aérea y de raíces, de radiación fotosintéticamente activa en el dosel de las plantas y la producción de grano de ambas especies. Este experimento se realizó en el 2012, en el campo experimental Valle de México y se cultivaron *Zea mays* L. ('H-155') y *P. vulgaris* L. ('Negro 8025') intercalados. Los arreglos fueron maíz (MM) y frijol (FF) en cultivos simples, dos surcos de maíz intercalados con dos de frijol (MMFF) y un surco alterno de cada especie (MFMF). Con los datos se hizo ANDEVA y comparación de medias (DMS; $p \leq 0.05$) con el programa SAS® versión 9.00. El rendimiento mayor de maíz ($p=0.014$) se presentó cuando estaba intercalado y en MFMF hubo más área de exploración con presencia de raíces (7861 cm²) y lateral (186 cm²). En MM hubo menos rendimiento del grano de maíz ($p \leq 0.05$) respecto de los arreglos intercalados, pues tuvo el valor más bajo de radiación fotosintéticamente activa transmitida al nivel del suelo (RFA_s) y las raíces presentaron menos exploración lateral. El frijol en MFMF tuvo 38 % menos área con presencia de raíces y valores altos en la RFA_s, respecto del cultivo simple, por lo cual 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 eficiencia relativa de la tierra fue 1.12 en el sistema MMFF y 1.07 en MFMF.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: junio, 2014. Aprobado: mayo, 2015.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 49: 513-531. 2015.

ABSTRACT

Intercropping systems of maize with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) have increased species performance compared with simple crops and this advantage would be due to physiological complementarity of this species and the efficiency in the use resources usage. Therefore, the objective of this study was to analyze the effect of the spatial arrangement of maize and beans regard its distribution of aerial biomass and roots, photosynthetically active radiation in the canopy and grain production of both species. This research was carried out in the year 2012; at the experimental field "Valley de Mexico" *Zea mays* L. ('H-155') and *P. vulgaris* L. ('Negro 8025') were intercropped. The arrangement was maize (MM) and bean (FF) in simple cultures, two furrows of maize intercropped with two of bean (MMFF) and an alternate with each species (MFMF). An ANOVA and means comparison (DMS; $p \leq 0.05$) were assessed from the resulting data using SAS® software version 9.00. The highest maize yield ($p=0.014$) arose when it was intercropped, the MFMF treatment had more exploration area with root presence (7861 cm²) and lateral roots (186 cm²). The MM treatments had less maize grain yield ($p \leq 0.05$) compared to the intercropping arrangements, as they had the lowest photosynthetically active radiation at the ground level (RFA_s) and their roots had less side soil exploration. Beans in MFMF had 38 % less area with root presence and high RFA_s values respect to the simple crops, which decreased the biomass since the pre-flowering, the leaf area index in grain filling and yield grain. The beans at the MMFF treatments increased its biomass and yield grain, as the basal leaves got more RFA. The soil relative efficiency was 1.12 in the MMFF treatment and 1.07 in the MFMF.

Key words: Interspecific interactions, ERT, PAR, leaf, *Zea mays* L., *Phaseolus vulgaris* L.

Palabras clave: Interacciones interespecíficas, ERT, RFA, 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 agobian 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 eficientar la producción 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 interactuar de manera positiva, complementarse entre sí y hacer un uso eficiente de los recursos durante el ciclo de cultivo (Willey, 1990; Johanne y Lynch, 2012). Así, las diferencias fisiológicas y morfológicas entre las especies intercaladas contribuyen a eficientar el uso de los recursos ambientales.

El crecimiento y desarrollo de los cultivos y el rendimiento final en los sistemas intercalados, como en los simples (Callejas-Rodríguez *et al.*, 2011) 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 en los sistemas intercalados explorar un mayor volumen de suelo para absorber nutrimentos y agua, respecto al cultivo simple (Johanne y Lynch, 2012).

Cuando el agua y los nutrimentos no son factores limitantes en el crecimiento de un cultivo, la radiación solar es el recurso principal que determina su productividad (Hamdollah, 2012). La producción de

INTRODUCTION

The intercropping “milpa” with fruit trees (MIAF) agricultural system is an alternative agricultural technology which aims to ease and solve economic, social, ecological and food problems that small producers primarily dedicated to the cultivation of basic grains have (Cortés *et al.*, 2005; Juárez *et al.*, 2008; Cortés *et al.*, 2012; Ruíz *et al.*, 2012). The spatial arrangement in stripes of the main species (maize, bean and fruit tree) of MIAF system is designed to increase the production efficiency, and obtain higher yield and quality in each species (Santiago-Mejía *et al.*, 2008; Torres *et al.*, 2008). The advantages in the MIAF system yields are attributed to the efficiency in the use of natural resources (water, light and nutrients) in the intercropping. The basic principle for a better resources usage is that, if species compete less for resources to grow together, they can interact in a positive way, complement each other and use the resources efficiently during the crop cycle (Willey, 1990; Johanne and Lynch, 2012). Thus, the physiological and morphological differences between species contribute to a more efficient use of environmental resources.

The growth and development of crops and its final yield in intercropping systems, as in simple crop (Callejas-Rodríguez *et al.*, 2011), are closely related to the distribution of their roots, these determines the absorption and use of water and nutrients from the soil. Studies of *in situ* root distribution in a soil profile are used to understand interspecific plant interactions and their relationship with yield. Maize (*Zea mays* L.) has a deeper root system than common bean (*Phaseolus vulgaris* L.), which allows intercropping a greater soil volume to obtain water and nutrients, compared to the simple cultivation (Johanne and Lynch, 2012).

When water and nutrients are not limiting factors for the crop growth, solar radiation is the main resource that determines its productivity (Hamdollah, 2012). Biomass production shows a positive correlation with the amount of radiation intercepted by single (Lindquist *et al.*, 2005) and intercropped crops (Sivakumar y Virmani, 1984; Tsubo *et al.*, 2001) and also a positive correlation between the natural logarithm of the transmitted radiation and leaf area (Tsubo *et al.*, 2003).

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 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 en el sistema no son concluyentes (O'Callaghan *et al.*, 1994; Vandermeer, 1995; Malézieux *et al.*, 2009). El objetivo de esta investigación fue 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.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

En el ciclo primavera-verano (11 de abril - 18 de noviembre 2012) se realizó un experimento en el Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX), 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 2280 m. La temperatura media durante el ciclo de cultivo fue 19.5 °C, con una precipitación de 315 mm durante el ciclo de los cultivos, evaporación media diaria de 4.7 mm y 5.83 h de brillo solar al día.

El suelo del sitio experimental 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).

Tratamientos y 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.

These precedents will help understand why the relative land efficiency (ERT) on the intercropping of maize with legumes is greater than simple crops (Clark and Francis, 1985; Li *et al.*, 2001; Santalla *et al.*, 2001; Malézieux *et al.*, 2009). However, the field experiments to measure the benefits of the intercropping and to explain the effects of the interaction of different factors in crop system are not conclusive (O'Callaghan *et al.*, 1994; Vandermeer, 1995; Malézieux *et al.*, 2009). The objective of the present study was to analyze the effect of the spatial arrangement of maize and bean at a MIAF system regard distribution of the its roots, photosynthetically active radiation in plant canopy and the biomass production of both species.

MATERIALS AND METHODS

Experimental site

In the spring-summer cycle (11 April-18 November 2012) an experiment was carried out at the Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX), of the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (19° 29' 17" N, 98° 53' 41" W and 2280 m of altitude). During the growing season the mean temperature was 19.5 °C, 315 mm mean rainfall, 4.7 mm daily average evaporation and 5.83 h of sunshine during the day.

According to the WRB classification (IUSS, 2007), the soil of the experimental site is an Haplic Fluvisol, 1.8 m depth, pH between 5.0 to 5.5, 1.14 % organic matter content in the 0-24 cm depth and 0.23 % in the rest of the soil profile (Govaerts *et al.*, 2008).

Treatments and experimental design

The treatments of the spatial or topological arrangement of the maize and the bean were: 1) simple cultivation of maize (MM), 2) simple cultivation of bean (FF), 3) intercropping of maize and bean in two alternate species furrows (MMFF) and, 4) intercropping of maize and bean in individual alternate furrows by species (MFMF) (Figure 1). The experimental design arrangement was of complete randomized blocks with three replications.

Experimental units had a size of four 0.8 m wide by 6 m length furrows in two replications, and 20 m length in the third. Evaluation of root distribution, analysis of biomass and leaf area was carryout in the third repetition by destructive methods, at different growth stages of the crop. Simple crop treatments had no shading.

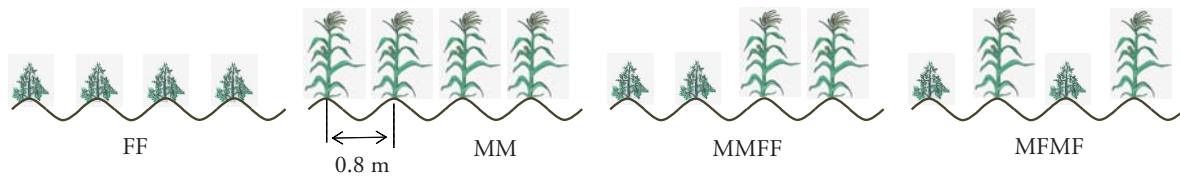


Figura 1. Arreglos topológicos evaluados. FF: cultivo simple de frijol, MM: cultivo simple maíz, MMFF: dos surcos de maíz alternados con dos de frijol. MFMF: un surco de maíz alternado con uno de frijol.

Figure 1. Evaluated topological arrangements: FF: simple common bean cultivation, MM: simple maize cultivation, MMFF: two intercropped furrows of maize then two of bean, and MFMF: a maize furrow alternated with a bean one.

El tamaño de la unidad experimental fue de cuatro surcos de 0.8 m de ancho cada uno con 6 m de largo en dos repeticiones y en la tercera 20 m de largo. En la tercera repetición se evaluó la distribución de raíces, el análisis de la biomasa y el área foliar mediante un método destructivo, en las etapas del ciclo del cultivo. Los tratamientos de cultivo simple no tuvieron sombreado.

Manejo del cultivo

La siembra de frijol y de maíz, entre las hileras de árboles frutales del sistema MIAF, fue el 11 de abril del 2012. Para frijol se usó la variedad Negro '8025' que es de hábito de crecimiento indeterminado tipo III, con casi nula aptitud trepadora, y neutral al fotoperiodo (Rosales *et al.*, 2004), y de maíz el 'H-155' recomendado por el INIFAP para la zona de transición Bajío-Valles altos, el cual alcanza alturas de planta de 2.3-2.5 m y produce 9.5 a 12.5 t ha⁻¹ (Velázquez y Rendón, 2008). El maíz se fertilizó con la dosis 180-60-40 (kg ha⁻¹ de N, P y K) con 75 mil plantas ha⁻¹ y el frijol con la dosis 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 en la primera escarda. Los cultivos se mantuvieron sin limitaciones de humedad, con riego rodado. El control de malezas fue manual y no hubo presencia de patógenos en los cultivos. La cosecha del frijol fue a los 125 d después de la siembra (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 cuidadosa. Con una retroexcavadora se hizo una trinchera de 1.6 m de profundidad por 1.2 m de ancho y perpendicular a los surcos. 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 90 cm de profundidad para dejar más o menos intactas las raíces después del lavado (Yang *et al.*, 2010).

Crop management

The bean and maize sowing, between the rows of fruit trees in the MIAF system was done on April 11, 2012. The tested bean was the 'Negro 8025', which is of indeterminate type III growth habit, with almost non climbing capabilities, and neutral to the photoperiod (Rosales *et al.*, 2004). Maize used was the 'H-155' recommended by INIFAP for the transition Bajío-Valles altos region, which reaches plant heights of 2.3 to 2.5 m and yield 9.5 to 12.5 t ha⁻¹ (Velázquez and Rendón, 2008). The maize was fertilized using a 180-60-40 (kg ha⁻¹ of N, P and K) dose on 75 thousand plants ha⁻¹. The bean was fertilized with a 50-50-30 dose on 180 thousand plants ha⁻¹. For the beans, all the fertilizer was applied to during sowing, but the maize was fertilized with 1/3 N and the rest during its first weeding. Crops were kept without moisture restriction, with wheeled irrigation. Weed control was manual and there were no pathogens present of in crops. The beans were harvest 125 d after sown (DDS) and maize 221 DDS.

Measured variables

Roots distribution

Roots distribution throughout soil profile was determined *in situ* by exhaustively and carefully washing roots. A 1.6 m depth by 1.2 m wide trench was dugged perpendicular to the furrows with a backhoe. The profile face in the site was then leveled and refined, exposing the plant within the furrow. Nails of 7.6 cm long were introduced along all the profile up to 90 cm deep to leave roots after washing almost intact (Yang *et al.*, 2010).

A 2.5 x 2.5 cm grid mesh was mounted on to a 1.5 x 2.5 m wood frame, with thread and placed in profile with exposed roots, which were washed with running water. Presence or absence of roots in each mesh grid was then recorded. These were identified by their color and other characteristics. Bean roots were brown and had nodules, maize root were white, highly succulent and thick. When roots origin was no clear we continued washing until their origin point was identified. The pattern of distribution

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 mostraban un tono marrón y presencia de nódulos, y las de maíz un color blanco, con mayor succulencia y grosor. Al tener dudas del origen de alguna raíz se continuaba el lavado hasta encontrar el punto de su origen. El patrón de distribución se registró y describió 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 usada para calcular el área total con presencia de raíces por planta, sumando el área de cada cuadro individual con presencia de raíces. 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 RFA (W m⁻²) con un sensor lineal de 1m de longitud, LI-188 (LI-COR® Lincoln, NE, EE.UU.), a los 57, 78 y 111 DDS. El sensor 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 con mediciones consecutivas de la RFA: una en la parte superior de la planta o RFA incidente (RFA_{inc}) y tres 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}:

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

donde I_s = mediciones de RFA a nivel del suelo, e I_0 = RFA incidente en el dosel.

Índice de área foliar (IAF)

La medición de área foliar de las láminas del frijol y del maíz se realizó con un integrador de área foliar LI-3100 (LI-COR® Lincoln, NE, EE.UU.) a los 49, 57, 84 y 141 DDS. El IAF se calculó con la siguiente ecuación (Escalante y Kohashi, 1993):

was recorded and described in three stages during the crop cycle, at 71, 118 and 164 DDS. Roots in each 2.5 x 2.5 cm (6.25 cm²) square were used to calculate the total area per plant, adding-up the area of each individual with root presence. To calculate the overlap area between the roots of maize and bean, the individual squares with joined presence of roots both species were assessed.

Photosynthetically active radiation (PAR)

In two of the replicates of the four studied treatments the RFA (W m⁻²) was measured with a 1 m longitude, LI-188 linear sensor (LI - COR®, Lincoln, NE, USA) at 57, 78 and 111 DDS. The sensor was placed in the middle of two plants, at its base level and perpendicular to the furrow being measured, taking care to not disturb the arrangement of the leaves and stems in the canopy. The measurements were performed during cloudless days between 12:00 and 14:00 h. The RFA transition to soil (RFAs) was determined with consecutive measurements of the RFA: one at the top of the plant or RFA incident (RFA_{inc}) and three at its base, repeating the process up to six added measurements at the base of each species per treatment in both repetitions. The RFAs value considered the direct and diffuse radiation that was not intercepted by the canopy.

Mean of RFA on the plants basis of each species was obtained and used to determine the percentage representing RFA_{ts} of the total RFA_{inc}:

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

where I_s = RFA measurements at soil level, and I_0 = RFA incidence on the canopy.

Leaf area index (IAF)

Leaf area of common bean and maize was measured with a leaf area integrator LI-3100 (LI-COR®, Lincoln, NE, USA) at 49, 57, 84, and 141 DDS. IAF was calculated using the following equation (Escalante and Kohashi, 1993):

$$IAF = \frac{(\text{leaf area per plant})(\text{density of population})}{(\text{sown area})}$$

Ligulate blades

On six maize plants per treatment 35 DDS the 7th blade counting from the base of the plant, was identified with a 2 x 3 cm mark using vinyl paint to facilitate locating them. The 7th leaf was used as a reference to assess the total number of ligulate blades per plant at 140 DDS (during the grain filling stage).

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

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 usó 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 seis 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 usando una estufa (Riossa®, modelo HCFD-82, México) para llevar los órganos deshidratados a peso constante (72 h) y luego 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; mientras más alto sea el valor de ERT el cultivo intercalado 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 expresión (Mead y Willey, 1980):

Biomass

The biomass per plant was determined at the 49, 57, 84, 125, and 141 DDS. Six plants were measured in each sampling per treatment, in a repetition. The above ground part of plant was washed to remove dust, drained and divided in its organs. The bean plants were cut off into stem, pods, petioles, blades, and grain (when present). Maize plants were separated into active (or exposed) blades and inactive; and pods with leaf pods, culmo, inflorescences, bracts, ear, seeds and rachis (according to the date of measurement). Dry biomass was obtained using a stove (Riossa®, model HCFD-82, Mexico) to dry the tissues to a constant weight (72 h) and then weighed on an analytical balance (Sortorius®, Handy H51 and 1474, IL. USA).

Relative land efficiency (ERT)

The ERT is the total area required in simple crops to reach the yield obtained under polyculture. The ERT's MMFF and MFMF topological arrangements were calculated with the following equation (Malézieux *et al.*, 2009):

$$ERT = \frac{(\text{Intercropping bean yield})}{(\text{Simple bean crop yield})} + \frac{(\text{Intercropping corn yield})}{(\text{Simple corn crop yield})}$$

A greater than one ERT means that intercropping is better than simple crop and vice versa, and the higher ERT value the intercropping is more advantageous. The calculation of the ERT to 49, 57 and 184 DDS considered the total biomass per plant and the 225 DDS measurement only the weight of the grain. The proportion of maize yield, contributed to the ERT from the intercrop, was calculated using the following expression (Mead and Willey, 1980):

$$\text{Proportional yield of corn} = \frac{(\text{ERT maize intercropping})}{\left(\frac{\text{ERT maize intercropping} + \text{ERT bean intercropping}}{\text{ERT bean intercropping}} \right)}$$

The generated value gives an idea of the proportion of the maize yield implicit in the ERT by the intercrop.

Statistical analysis

With the data of the measured variables an ANOVA and the comparison of means was performed with the DMS test ($p \leq 0.05$) using the SAS software® version 9.00. The data was plotted with Excel and Sigma Plot® version 11.

$$\text{Rendimiento proporcional del maíz} = \frac{(\text{ERT maíz intercalado})}{\left(\frac{\text{ERT maíz intercalado} + \text{ERT frijol intercalado}}{\text{ERT frijol intercalado}} \right)}$$

El valor generado da una idea de la proporción del rendimiento del maíz implícito en la ERT de los intercalados.

Análisis estadísticos

Con los datos de las variables medidas se realizó un AN-DEVA y la comparación de medias se hizo con la prueba DMS ($p \leq 0.05$) 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 determinó desde 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); en esa fecha el frijol ya había alcanzado la madurez fisiológica. 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).

Las raíces del maíz y el frijol intercalados tuvieron 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 cual su área final de exploración fue 15 % mayor (Figura 4). El área mayor con presencia de raíces de frijol se obtuvo en el tratamiento MMFF a los 118 DDS (Figura 4). En esta fecha, 7 d 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 a los 164 DDS, cuando ya se había cosechado el frijol, el área con presencia de raíces del maíz fue 15 % mayor respecto del cultivo simple (Figura 5).

La superficie promedio de traslape de raíces de frijol en cultivo simple (71 DDS) fue de 118 cm², lo

RESULTS AND DISCUSION

Roots distribution

Root distribution was determined at 71 DDS, maize roots explored a larger area than common bean in all topological arrangements during the rest of their cycle (Figures 2-5).

Bean roots after 71 DDS were already almost as deep as at their final state, because the depth between this date and 118 DDS showed little increase at simple crop (5 %) and in MFMF (6 %) (Figure 5); on that date beans had already reached physiological maturity. The rooting depth of maize in the soil during the cycle was not affected by the topological arrangement; in the end, the average depth was from 82 to 85 cm (Figures 3-5).

The roots of intercropping maize and beans had a vertical distribution similar to the simple crop treatment; however, the lateral distribution was higher in the intercrop. For example, the lateral distribution of maize roots in MMFF was 18 % higher than in the simple cultivation, so its final exploration area was 15 % greater (Figure 4). The largest area with bean roots presence of was obtained 118 DDS at the MMFF treatment (Figure 4). On this date, 7 d prior to harvest, bean roots had 38 % less area of exploration in the MFMF topological arrangement than in the simple crop. In the same topological arrangement 164 DDS, when beans were already harvested, the area with presence of maize roots was 15 % greater respect to the simple crop (Figure 5).

The average root overlap surface of bean in simple cultivation (71 DDS) was 118 cm², which on average corresponded to 4 % of the area explored by each plant, this increased by 5 % at 118 DDS. In maize simple cultivation, the overlap surface increased as the crop cycle progressed; the overlap was on average 2 %, 17 % and 20 % of each plant surface exploration at the 71, 118 and 164 DDS, respectively.

In the MMFF topological arrangement, invasion of maize roots to the bean area was evident. At 71 DDS 24 % bean surface was occupied by maize roots in the nearest furrow. At 118 DDS that increased to 49 % and at 164 DDS there were even maize roots that overlap plants separated by two bean furrows (when bean plants were no present). In the MFMF topological arrangement area including maize roots held 17 and 36 % of the bean roots after 71 and 118 DDS.

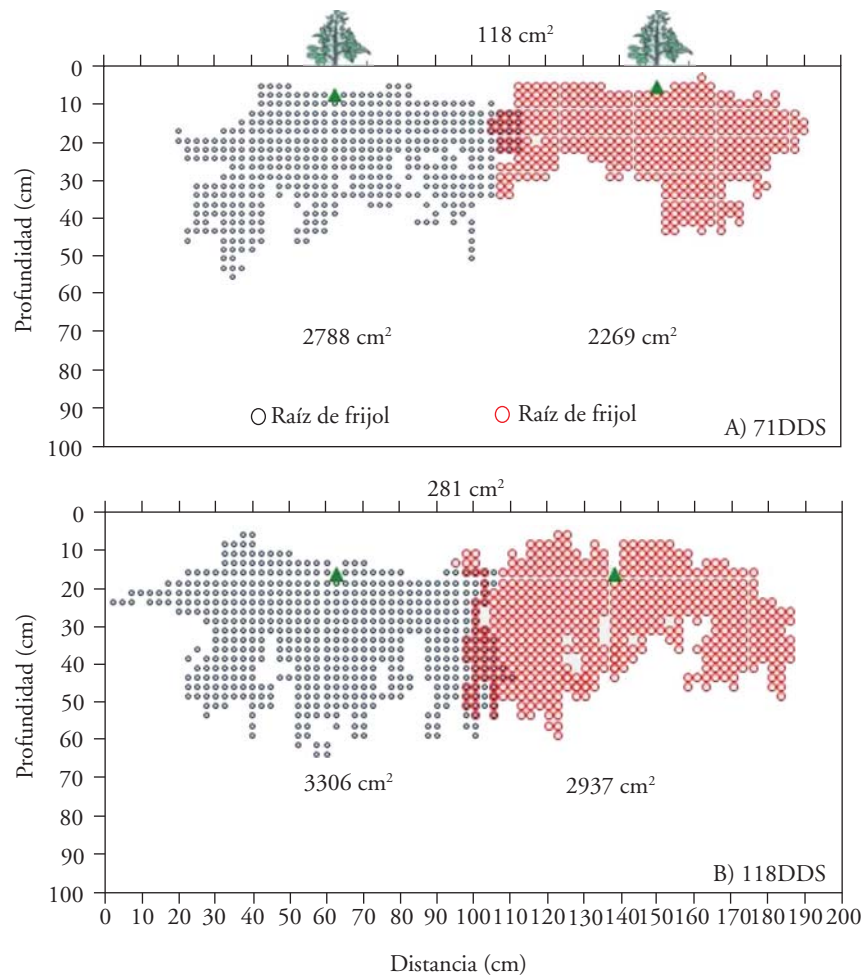


Figura 2. Distribución del sistema radical de frijol ‘Negro 8025’ en cultivo simple a los 71 (A) y 118 (B) DDS. El número entre las plantas indica el área de traslape de las raíces y el número abajo del área de color del gráfico indica el área con presencia de raíces. Los triángulos representan los sitios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

Figure 2. Distribution of the root system of common bean ‘Negro 8025’ in simple crop at 71 (A) and 118 (B) DDS. Number among plants indicates the area of overlap of the roots and the number under the chart color area indicates the area with roots presence. Triangles represent the sites of insertion of the plants in the furrow.

cual correspondió en promedio al 4 % de la superficie explorada por cada planta y aumentó en 5 % a los 118 DDS. En el maíz, la superficie de traslape en cultivo simple aumentó conforme avanzó el ciclo, y el traslape fue 2 %, 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 fue ocupada por las raíces del maíz del surco contiguo. A los 118 DDS aumentó a 49 % y a los 164 DDS incluso hubo

Johanne and Lynch (2012) showed that maize roots growth tends to be exponential up to 40 d after germination. At 70 DDS maize and bean roots in all topological arrays explored shallow depth which did not increased during the rest of the cycle (118 and 164 DDS). In maize plants, this could be influenced by the presence of a lithological discontinuity in the soil profile, with sandy texture (according to the actual field testing), in all the experimental area between 47-60 cm depth. Above this layer, texture was silty clay (6-47 cm) and showed the largest area with roots presence. However, maize roots were observed below

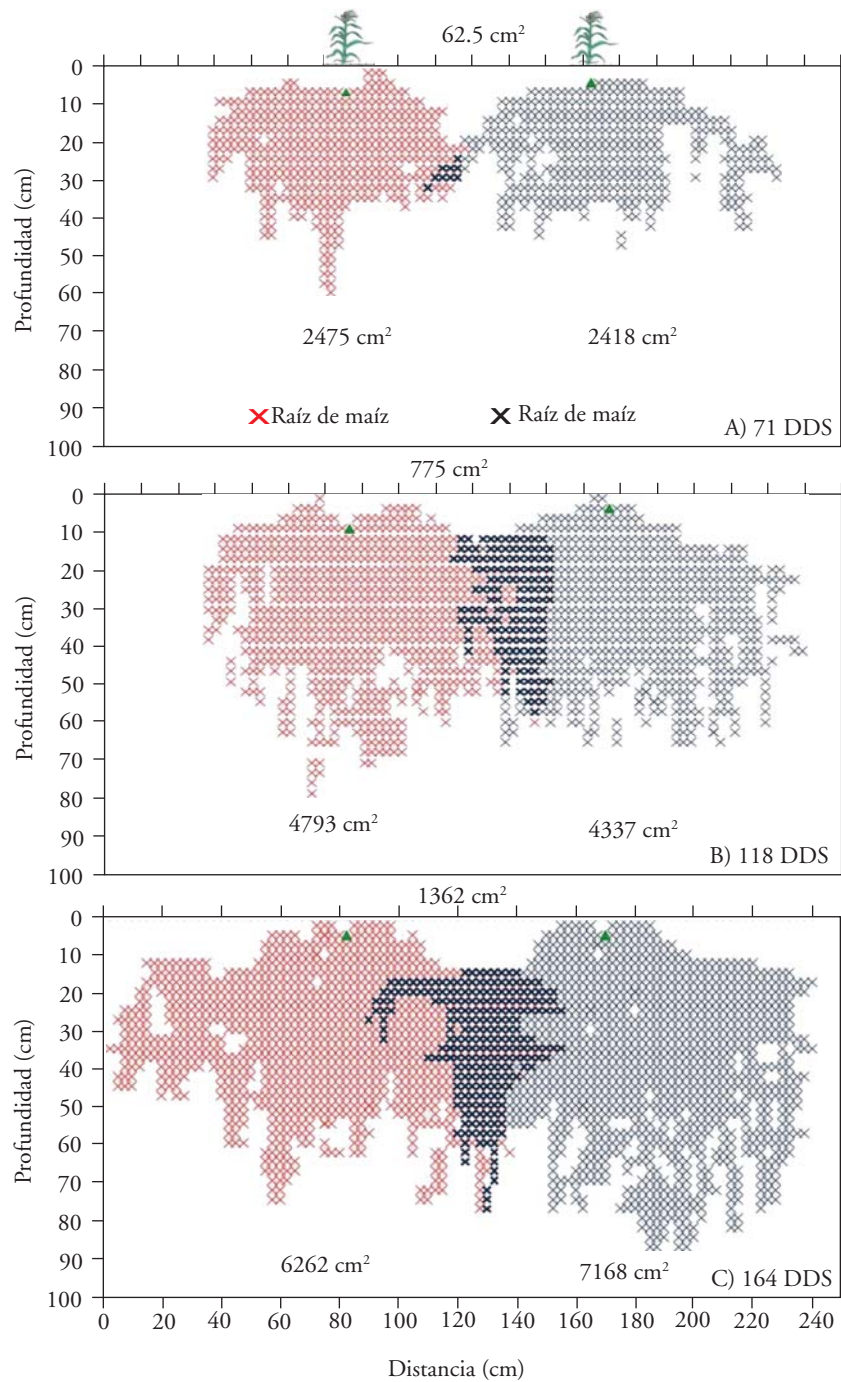


Figura 3. Distribución del sistema radical de maíz ‘H 155’ en cultivo simple, a los 71 (A), 118 (B) y 164 (C) DDS. El número entre las plantas indica el área de traslape de las raíces y el número abajo del área de color del gráfico indica el área con presencia de raíces. Los triángulos representan los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

Figure 3. Distribution of maize root system ‘H 155’ in simple crop, at 71 (A), 118 (B) and 164 (C) DDS. The number among the plants shows the roots overlapping area and the number under the chart color area indicates the area with roots presence. Triangles represent the sites of insertion of the plants in the furrow.

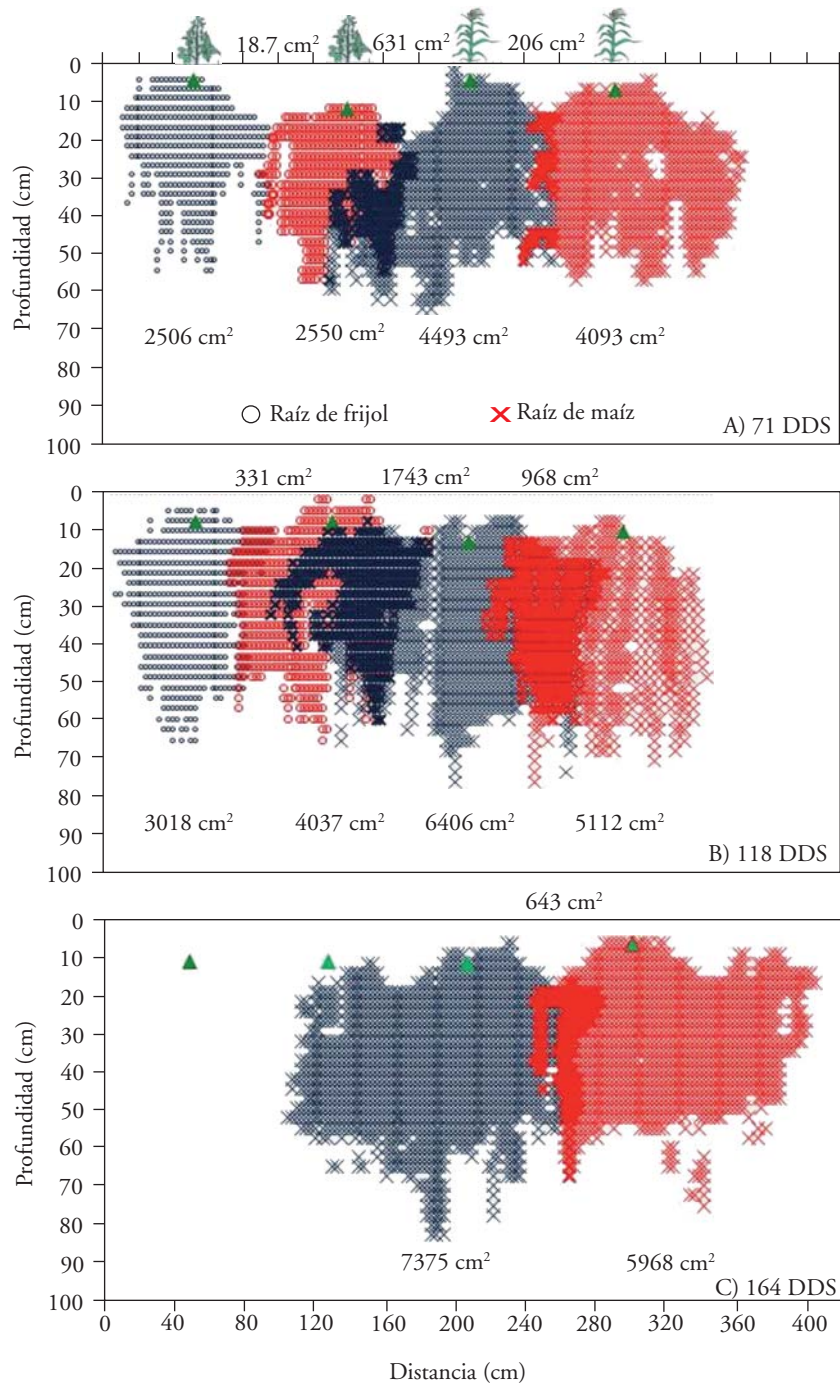


Figura 4. Distribución del sistema radical de maíz ‘H 155’ y frijol ‘Negro 8025’ intercalados MMFF a los 71 (A), 118 (B) y 164 (C) DDS. El número entre las plantas indica el área de traslape de las raíces y el número abajo del área de color del gráfico indica el área con presencia de raíces. Los triángulos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

Figure 4. Distribution of maize root system ‘H 155’ and bean ‘Negro 8025’ intercrop MMFF at 71 (A), 118 (B) and 164 (C) DDS. The number among the plants shows the roots overlapping area and the number under the chart color area indicates the area with roots presence. Triangles represent the sites of insertion of the plants in the furrow.

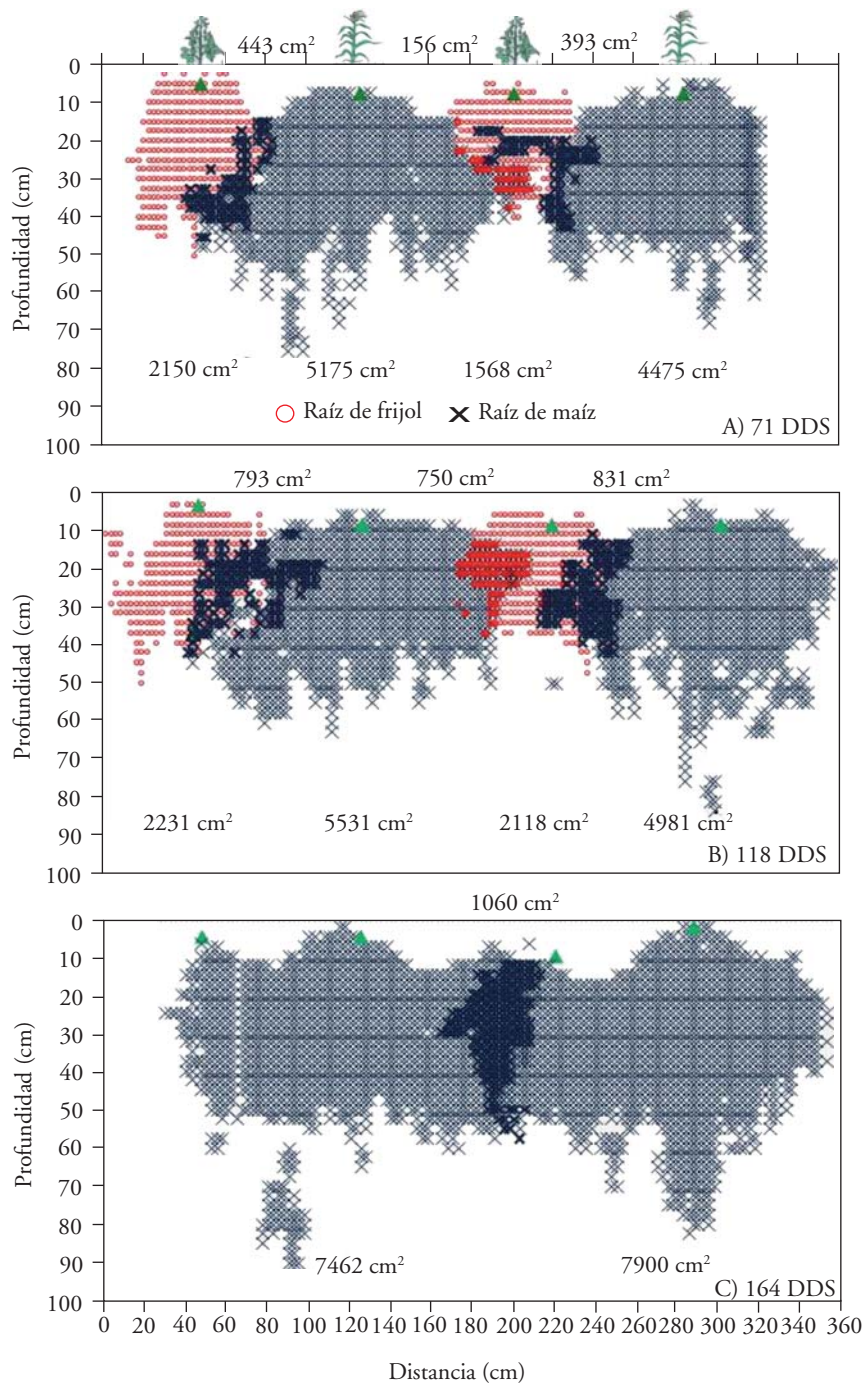


Figura 5. Distribución del sistema radical de maíz 'H 155' y frijol negro '8025' intercalados MFMF a los 71 (A), 118 (B) y 164 (C) DDS. El número entre las plantas indica el área de traslape de las raíces y el número abajo del área de color del gráfico indica el área con presencia de raíces. Los triángulos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

Figure 5. Distribution of the maize system of 'H 155' and bean 'Negro 8025' intercrop MMFF at 71 (A), 118 (B) and 164 (C) DDS. The number among the plants shows the roots overlapping area and the number under the chart color area indicates the area with roots presence. Triangles represent the sites of insertion of the plants in the furrow.

traslape de las raíces de maíz de plantas separadas por dos surcos de frijol (ya no había plantas 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.

El crecimiento de las raíces de maíz tiende a ser exponencial hasta los 40 d después de la germinación (Johanne y Lynch, 2012). A los 70 DDS las raíces de maíz y frijol, en todos los arreglos topológicos, exploraron poca profundidad lo cual no aumentó durante el resto del ciclo (118 y 164 DDS). En el maíz 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 y encontrada entre los 47-60 cm de profundidad. Por arriba de este estrato la textura fue arcillo limosa (6-47 cm) y se presentó la mayor área con presencia de raíces. No obstante, se observaron raíces de maíz por debajo de este estrato (Figuras 2-5), mientras que las de frijol no estuvieron presentes. En un estudio de sistemas intercalados de maíz y soya (*Glycine max* L. Merr.), las raíces del maíz se extendieron debajo de la raíz de la soya y en ambas especies la densidad de raíces fue mayor en los primeros 30 cm de profundidad y en el área cercana a la base de la planta (Yang *et al.*, 2010).

Las raíces del maíz profundizaron más y tuvieron más área de exploración que las del frijol (Figuras 2-5), de manera que invadieron lateralmente y verticalmente los surcos de frijol. Estos resultados son similares a los reportados por Hai-Yong *et al.* (2013), quienes intercalaron 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, lo cual es semejante al valor (150 cm) observado por Jonsson *et al.* (1988) 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 causó en el frijol mayor expansión lateral y área de exploración a los 118 DDS. Además, dado 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 madurez fisiológica.

this layer (Figures 2-5), whereas the beans were not present. In a study about intercropping systems of maize and soybean (*Glycine max* L. Merr.), maize roots spread below the soybean root, and in both species, roots density was higher in the first 30 cm depth and near to the plants base (Yang *et al.*, 2010).

The maize roots were deeper and had more exploration area than beans (Figures 2-5); in such a way that they invaded laterally and vertically the bean's furrows. These results are similar to those of Hai-Yong *et al.* (2013), who intercropped maize and legumes. The lateral extension of maize roots, in simple cultivation, at 164 DDS (during grain filling) reached an average of 151 cm, which is similar to the value (150 cm) reported by Jonsson *et al.* (1988) in simple maize cultivation with Elonga. The topological MFMF arrangement allowed maize to have higher lateral root distribution and area of exploration at 164 DDS. Whereas MMFF arrangement resulted in higher bean lateral expansion and exploration area at 118 DDS. Besides, given that bean and maize harvest was at 125 and 221 DDS, maize plants could use soil water and nutrients not used by bean plant after its physiological maturity.

Photosynthetic active radiation (RFA), leaf area index (IAF) and leaf number

The RFAs on maize plants was significantly higher in the MFMF system respect to other topological arrangements at 57, 78 and 141 DDS (Table 1). These dates correspond to the R5 bean stage (pre-flowering), pod filling and maize grain filling respectively. RFAs in bean at 57 DDS was not affected by the topological arrangement; but, at 78 and 111 DDS the lower values of RFAs were found in the MMFF and MFMF topological arrangements (Table 1).

The IAF of bean at 49 DDS, during the flowering phase (R5), was greater in intercropping than in simple crop ($p \leq 0.001$), whereas IAF at 57 DDS was no longer different between topological arrangements; but during pod filling (84 DDS) the IAF of the FF was significantly higher to MMFF and MFMF topological arrangements (Figure 6A).

Maize plants at 49 DDS were in ear differentiation and bean plants were flowering. At this stage the lowest maize IAF arose in the MMFF intercrop

Radiación fotosintéticamente activa (RFA), índice de área foliar (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) llenado de vaina y llenado de grano de maíz respectivamente. 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 los menores valores de RFA_{ts} se presentaron en los arreglos topológicos MMFF y MFMF (Cuadro 1).

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; pero durante el llenado de la vaina (84 DDS) el IAF del FF fue significativamente superior al de los arreglos topológicos MMFF y 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 menor IAF del maíz se presentó en el

($p \leq 0.05$) (Figure 6B). However, from this phase on, the topological arrangement had no significant effect or the number of leaves per plant changed (21 ± 0.11). The estimation of the RFAs in the maize furrows was lower than beans in all topological arrangements and measurement dates. This is attributed to the maize being the dominant species (Tsubo and Walker, 2002), with greater leaf area (Figure 6), height and its canopy intercepts more RFA than beans, which contributes to the efficient use of the RFA.

During the phenological stages of bean pod filling (78 DDS) and maize grain filling (141 DDS) each species reached the maximum leaf area (Figure 6A and 6B) and in which there could be maximum light competition. At the 78 DDS RFAs were more transmitted in the simple bean crop and the MFMF arrangement, since at this stage they showed a low leaf area (Figure 6A).

In maize, simple cropping and intercropping MMFF arrangement RFAs was lower at 57 DDS; therefore, plants in these treatments intercepted more RFA than the MFMF system. Thus, it can be deduced that basal leaves in MFMF system had no RFA limitation, unlike MM basal leaves of the system.

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.

Table 1. Effect of the topological arrangement on the RFA percentage transmitted to the soil (RFA_{ts}) occupied by maize and beans, according to the topological arrangement during the crop cycle.

| Arreglo topológico [†] | Días después de la siembra | | | |
|---------------------------------|----------------------------|------------|------------|------------|
| | 57 | 78 | 111 | 141 |
| | Maíz | | | |
| MM | 41.30±4.62 | 18.13±2.08 | 8.29±1.79 | 13.29±3.56 |
| MMFF | 45.31±3.46 | 18.50±6.37 | 8.09±1.41 | 21.05±5.20 |
| MFMF | 64.87±1.15 | 29.79±3.17 | 9.50±1.93 | 46.12±3.84 |
| DMS 0.05 | 5.55 | 6.00 | 1.18 | 10.93 |
| | Frijol | | | |
| FF | 71.11±1.70 | 35.02±2.45 | 26.63±1.49 | ‡ |
| MMFF | 68.80±2.02 | 20.75±1.39 | 27.09±2.46 | ‡ |
| MFMF | 72.11±2.31 | 32.85±2.83 | 16.02±3.01 | ‡ |
| DMS 0.05 | 4.42 | 6.66 | 7.60 | |

[†] MM: cultivo simple de maíz, FF: cultivo simple de frijol, MMFF: cultivo 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 \pm error estándar [‡]MM: simple maize crop, FF: simple bean crop, MMFF: intercropping two rows of maize and two rows of bean, and MFMF: intercropping one row of maize and one of beans. [‡]At 121 DDS beans had been harvested. Values are average of 12 samples \pm standard error.

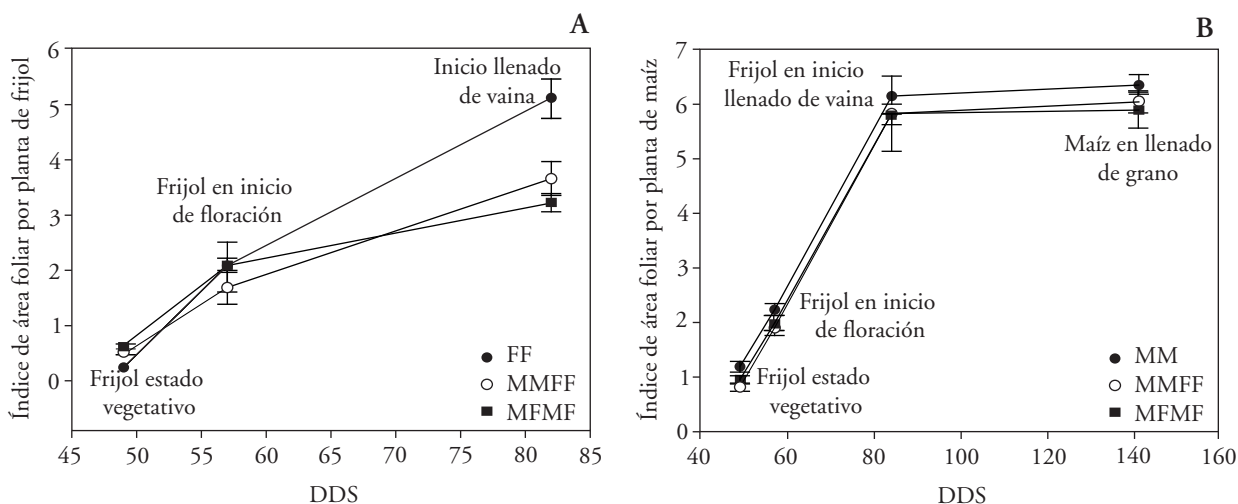


Figura 6. Índice del área foliar de plantas de frijol (A) 'Negro 8025' y maíz (B) 'H155' en función del tiempo en tres arreglos topológicos: FF, cultivo simple de frijol; MM, cultivo simple de maíz; MMFF, intercalados dos surcos de maíz seguidos de dos de frijol; MFME, intercalado un surco de maíz seguido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

Figure 6. The leaf area index of bean plants (A) 'Negro 8025' and (B) 'H155' maize as a time function in three topological arrangements: FF, beans simple crop; MM, maize simple crop; MMFF, intercropped two maize rows and two bean rows; MFME, intercropped one maize row and one bean row. DDS = 49, 57, 84, and 141. Six plants average \pm SE.

intercalado MMFF ($p \leq 0.05$) (Figura 6B). Sin embargo, desde esta fase el arreglo topológico no tuvo efecto significativo ni cambió el número de hojas por planta (21 ± 0.11). 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.

En las etapas fenológicas llenado de vaina del frijol (78 DDS) y llenado de grano del maíz (141 DDS) 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 MFME, 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, desde los 57 DDS la RFA_{ts} fue menor; por lo tanto, las plantas en estos tratamientos interceptaron más RFA que las del sistema MFME. Así, se puede deducir que las hojas basales del sistema

The greatest RFA distribution in the intercropping system MFME resulted in higher grain yield of maize. In addition, there was no difference in the number of leaves or leaf area of the maize plants in all treatments at 57, 84, and 141 DDS (Figure 6). This supports the statement shown before, that, higher number of maize leaves on MFME arrangement took advantage of the intercepted radiation, unlike the maize in simple cultivation where the RFA interception decreases from the upper part of the canopy to the bottom.

Biomass

Bean biomass at 57 DDS and in later stages, including harvest, was on the MFME array lower than in the MMFF and the FF (Figure 7A). In maize 84 DDS total biomass production was greater when it was intercropped than in the simple crop (Figure 7B). This response was maintained during the rest of the cycle and was reflected in the harvest at 221 DDS. This effect was due to the amount of grain biomass because of other organs of the canopy or stubble (sheets + pods + rachis + culmo + husks + male inflorescence) did not differ between treatments (Table 2).

MFMF no tuvieron limitación en la disponibilidad de RFA, a diferencia de las hojas basales del sistema MM. La mayor distribución de la RFA en el sistema intercalado MFMF se reflejó en un mayor rendimiento 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 de que más hojas de maíz en el arreglo MFMF aprovecharon la radiación interceptada, a diferencia del maíz en cultivo simple donde la interceptación de la RFA disminuye de la parte superior del dosel a la 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 los arreglos MMFF y FF (Figura 7A). En el 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. El efecto se debió a la cantidad de biomasa del grano pues la de los demás órganos del dosel o rastrojo (láminas+ vainas + raquis + culmo + espigas + inflorescencia masculina) no fue diferente entre los tratamientos (Cuadro 2).

Durante el crecimiento y desarrollo del maíz y frijol intercalados, las relaciones interespecíficas en el arreglo MMFF aumentaron el 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). Esta interacción positiva maíz x frijol en el intercalado MMFF se puede deber 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 d antes que en el maíz, fecha en la cual la producción de biomasa total de frijol fue menor en el intercalado

During the growth and development of maize and bean intercropping, interspecific relationships in the MMFF arrangement increased maize yield and had no effect on bean yield compared with simple crops, whereas in the MFMF arrangement, maize had a higher and bean a lower yield.

The maize x bean positive interaction in the MMFF can be interpreted as a facilitation and complementarity relationship, in which the legume increased maize productivity (Vandermeer, 1995; Li *et al.*, 2006; Malézieux *et al.*, 2009). This positive interaction maize x bean in the MMFF intercropped may be due to the roots architecture of both species, nitrogen symbiotic fixation (Johanne and Lynch, 2012) and the efficiency in the solar radiation (Sivakumar y Virmani, 1984; Tsubo *et al.*, 2001).

The effect of the topological arrangement in bean biomass was observed at the beginning of the blooming (57 DDS), 27 d before than maize, in this date the total bean biomass production was lower in the MFMF intercropping than in the MMFF and simple crop. Gardiner and Craker (1981) reported similar results in biomass of bean cv. Soldier at 57 DDS. The grain yield of beans at harvest (125 DDS) in the MFMF array was 12 % lower compared to the simple cultivation. O'Callaghan *et al.* (1994) also reported a decrease in the yield of intercropping bean from 12 to 33 %, and 55 % Santalla *et al.* (2001). In our study the lower production of biomass in the MFMF intercropping remained for the rest of the cycle, which was due to the maize shade over the bean plants in this topological arrangement, as the basal leaves of beans intercepted less RFA and decreased the IAF in 40 % at 49 DDS and 84 % at 84 DDS, compared to the simple cultivation. The IAF decrease of the bean due to intercropping was also reported by Gardiner y Craker (1981). Another reason for the decrease in the bean biomass at the MFMF intercropping was 38 % less root area for soil exploration, compared to the simple crop (Figure 2 and 5). Gliessman and Francis (1986) highlight that regardless the yield reduction in beans and pumpkins, the intercropping ERT was higher than one.

Relative efficiency of land (ERT)

The ERT of the total biomass in the intercropping arrangements was > 1, except for the MFMF system at 57 DDS, with a low bean ERT value in that date.

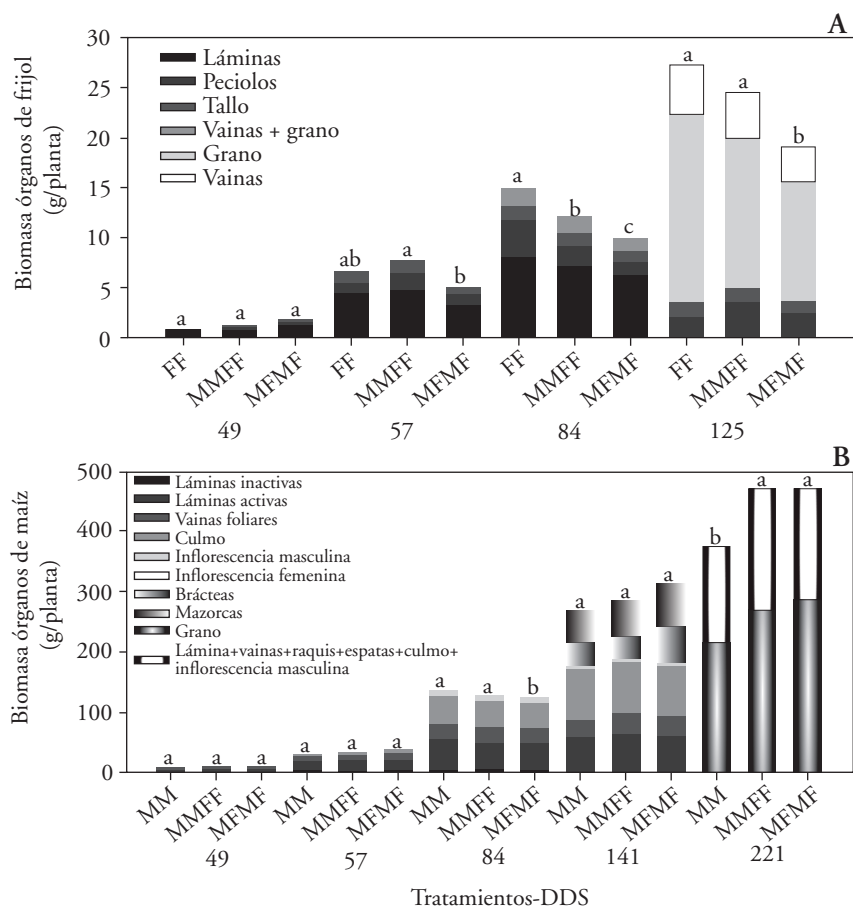


Figura 7. Efecto del arreglo topológico en la producción de biomasa de (A) frijol y (B) maíz en cinco fases del ciclo de cultivo. DDS; días después de la siembra. Letras distintas sobre las barras de cada fecha denotan diferencia significativa ($p \leq 0.05$). FF: cultivo simple de frijol, MM: cultivo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

Figure 7. Effect of the topological arrangement in biomass production of (A) bean and (B) maize in five growth phases. DDS: days after sowing. Different letters on each date bars denote significant differences ($p \leq 0.05$). FF: simple bean crop, MM: simple maize crop, MMFF: two rows of maize intercropped with two of beans, MFMF: a maize furrow intercropped with one of beans.

MFMF que en el MMFF y cultivo simple. Gardiner y Craker (1981) 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) también reportan una disminución en el rendimiento del frijol intercalado de 12 a 33 %, y Santalla *et al.* (2001) de 55 %. En nuestro estudio la menor producción de biomasa en el arreglo MFMF se mantuvo en el resto del ciclo, lo cual se debió al sombreado de las plantas de maíz sobre el frijol en este arreglo topológico, pues

The partial ERT of beans and maize ranged from 0.98 to 1.15 and 0.65 to 1.78. The final ERT which considers only the maize grain weight at 225 DDS and bean seeds at 125 DDS was of 1.12 and 1.07 for the MMFF and MFMF topological arrangements. The partial ERT of the maize and bean harvest were of 0.64 0.47 in the MMFF, and 0.67 and 0.34 in the MFMF. The contribution of yield proportion by maize to the ERT was 0.57 and 0.64 in the MMFF and MFMF intercropping systems.

The ERT values of 1.12 in the MMFF systems and 1.07 in MFMF means that it would require

las hojas basales del frijol interceptaron menos RFA y disminuyeron el IAF en 40 % a los 49 DDS y 84 % a los 84 DDS, con respecto al cultivo simple. La disminución en el IAF de frijol por efecto del intercalado también fue reportada por Gardiner y Craker (1981). Otra causa de la disminución en la biomasa del frijol intercalado en el sistema MFMF fue el desarrollo de 38 % menos área de exploración radical, en comparación a la del cultivo simple (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 fue mayor de uno.

Eficiencia relativa de la tierra (ERT)

La ERT de la biomasa total en los arreglos intercalados fue > 1, excepto en el sistema MFMF a los 57 DDS, con un valor bajo de la ERT del frijol en esa 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, que considera solo el peso de grano de maíz a los 225 DDS y el del frijol a los 125 DDS, fue 1.12 y 1.07 para los arreglos topológicos MMFF y MFME, 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 MFME. La proporción de rendimiento aportado por el maíz, a la ERT, fue 0.57 y 0.64 en los intercalados MMFF y MFME, respectivamente.

Los valores de ERT de 1.12 en el sistema MMFF y 1.07 en MFME, 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. Estos resultados son similares a los reportados en sistemas intercalados de maíz/frijol y maíz/frijol/calabaza (Santalla *et al.*, 2001; Johanne y Lynch 2012).

Turrent (2014)⁴ en el mismo sitio experimental, entre 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. Y en 2006 y 2007 con la misma densidad de siembra y dosis de fertilización, usando el híbrido de maíz H-151 y la misma variedad de frijol de este estudio, obtuvo la ERT de 1.24 y 1.01 en los sistemas MMFF y MFME, respectivamente.

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

Table 2. Grain yield and stubble of corn 'H 155' in three topological arrangements at 221 DDS.

| Arreglo topológico [†] | Rendimiento (g planta ⁻¹) | |
|---------------------------------|---------------------------------------|--------------|
| | Grano | Rastrojo |
| MM | 157.21±12.56 | 153.81± 4.19 |
| MMFF | 197.04±9.84 | 197.98±17.01 |
| MFME | 205.87±8.01 | 186.45±9.26 |
| DMS 0.05 | 30.53 | 61.46 |

[†]MM: cultivo simple de maíz, MMFF: dos surcos de maíz seguido por dos de frijol, MFME: un surco de maíz intercalado seguido de uno de frijol. Los valores son promedio de 12 muestras ± ES ❖ [†] MM: simple maize crop, MMFF: intercropping of two maize and two bean rows, MFME: One maize one bean furrow intercropping. Values are the average of 12 samples ± SE.

between 1.12 and 1.07 ha cultivated with maize and bean as simple crops to obtain the yields of 1 ha intercropped. These results are similar to those reported in maize and bean and maize intercropping, bean and squash (Santalla *et al.*, 2001; Johanne and Lynch 2012).

Turrent (2014)⁴ at the same experimental site, between 2003 and 2005, obtained an ERT of intercropped maize and beans of 1.44, with optimum combinations of plantation density and fertilization. And during 2006 and 2007 with the same planting density and fertilization dose, using hybrid maize 'H-151' and the same bean variety used for this study, he obtained a ERT of 1.24 and 1.01 in the MMFF and MFME systems.

With the MIAF system an ERT of 1.96 has been obtained when intercropping of maize and bean in the growing spring-summer season, bean in relief in the autumn-winter season and trees of guava (Camas, 2011). This suggests that the studied topological arrangements could give higher ERT when intercropping with fruit trees and a succession with other crops.

In both intercrops studied, the proportion of maize yield was greater than 0.6. The ERT of the MFME system was 4.46 % higher than that of the

⁴Turrent, F.A. Investigador Titular C. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (aturrent37@yahoo.com.mx).

Con el sistema MIAF se ha 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 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 MMFF fue 4.46 % mayor que la del MMFF y aunque tal diferencia no fue significativa en nuestro estudio, Turrent (2014)⁴ muestra un valor 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 adoptar el sistema con la mayor ERT, sino aquel que genere mayor rendimiento de la especie de su interés, siempre que no eleve los costos de producción. En las condiciones de este estudio y basándose en la ERT más alta, el sistema MMFF fue superior .

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 del estrato de suelo explorado y de la parte aérea, la cual se reflejó en la distribución de raíces, intercepción de la radiación solar en el dosel y mayor producción de biomasa de maíz.

Los mayores rendimientos del maíz intercalado con frijol, respecto del cultivo simple, se debieron a la mayor captación de la radiación fotosintéticamente activa en todo 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

MMFF but this difference was not significant in our study; but Turrent (2014)⁴ showed a value of around 10 % with maize H-151. For both, farmer families and the MIAF system design it is a priority to get the highest maize grain yield, because it is a basic food. In this way the farmers may not take the system with the higher ERT, but one that generates the highest yield of the species of interest, provided that it does not raise production costs. Under the conditions of this study and on the basis of the highest ERT, MMFF system was superior.

CONCLUSIONS

Maize developed a higher exploring root area than beans. Both species reached their typical rooted depth at 71 DDS, regardless of the topological arrangement. The smallest area with presence of bean roots and the largest of maize arose at the furrow of maize intercropped with one of beans arrangements.

Intercropping of maize and bean in stripes led an advantage-level soil stratum explored and aboveground, which was reflected in the distribution of roots, interception of solar radiation in the canopy and increased the maize biomass production.

The higher yields of maize intercropped with beans, respect to the simple cultivation, were due to the increased uptake of photosynthetically active radiation in the entire canopy.

The decrease in the yield of beans, when it is intercropped with maize, depends on the topological arrangement including both species.

—End of the English version—

---*---

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.

Callejas-Rodríguez, R., E. Rojas-Torres, C. Benavidez-Zavala, y E. Kania-Kuhl. 2011. Crecimiento y distribución de raíces y su relación con el potencial productivo de parrales de vides de mesa. *Agrociencia* 46: 23-35.

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 J. Kohashi S. 1993. El rendimiento y crecimiento del frijol. Manual para la toma de datos. Colegio de Postgraduados. 84 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*: Francis, C.A. (ed). *Multiple Cropping Systems*. pp: 82-95. Macmillan, New York, USA.
- Govaerts B., M. Barrera-Franco, M. Limón-Ortega A., P. Muñoz-Jiménez, P. Sayre K., y 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.
- 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. Bot.* 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.
- Rosales S.R., J.A. Acosta G., J.S. Muruaga M., J. Hernández C., G. Esquivel E., y P. Pérez H. 2004. Variedades mejoradas de frijol del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Libro Técnico Num. 6 INIFAP-CIRCE-CEVAMEX. 148 p.
- 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. *Rev. Mex. Cienc. Agric.* 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.