

Área y ángulo foliar, coeficiente de extinción de luz y su relación con la biomasa y rendimiento en genotipos de maíz

SÁNCHEZ-MENDOZA, Selene Mariana, ESCALANTE-ESTRADA, José Alberto Salvador y RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, María Teresa

S. Sánchez, J. Escalante y M. Rodríguez

Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Km 36.5 carretera México-Texcoco, 56230. Teléfono 01(595) 952 02 00 Ext. 1330. Montecillo, Texcoco, Estado de México
selene.sanchez@colpos.mx

F. Pérez, E. Figueroa, L. Godínez, R. García (eds.) Ciencias de la Economía y Agronomía. Handbook T-II.-©ECORFAN, Texcoco de Mora, México, 2017.

Abstract

The extinction of light between maize cultivars canopy is influenced by the structure, defined in terms of size, shape and orientation of the components of aerial part of the plant. The objectives of this study were: i) characterize three maize genotypes of highlands based on morphological and physiological canopy attributes, as well as by the attenuation profile or light extinction coefficient, and ii) determine the influence of canopy architecture on total biomass accumulation and grain yield of the studied genotypes. Statistically significant differences in the canopy composition among genotypes were found. Native blue showed a different behavior in comparison with hybrids in canopy characteristics such as greater plant height and average area per leaf. Also the leaf area per plant, green leaves number above the ear and foliar area on which ear is inserted were smaller than hybrids, but the insertion angle of leaves on stem was higher, indicating that the native has a semi-horizontal canopy. H-48 and H-50 hybrids showed the highest light extinction coefficient and intercepted radiation. Canopy structure had influence on grain yield. The size of leaf that subtends the ear, leaf area index, semi-erect canopy and a vertical distribution of leaf area, suitable for filtration and interception of solar radiation were the most important morphological variables.

1 Introducción

La fotosíntesis de los cultivos está determinada por la captura y utilización de la energía solar, y debido a que la luz no puede ser almacenada como tal, la competencia por este recurso dentro de una población vegetal (cultivos) es un proceso que ocurre de manera instantánea (Williams II *et al.*, 2006). Por lo que la distribución de la radiación solar es considerada como el elemento microclimático más importante en una comunidad vegetal y es determinada por la estructura del dosel, el cual es el arreglo espacial de los órganos aéreos de la planta en una comunidad. Las hojas y otros órganos fotosintéticos funcionan como colectores de energía solar, así también como intercambiadores de gases (Russell *et al.*, 1990), por lo que su magnitud y disposición en la planta determinan la producción de biomasa y rendimiento de grano (Valentinuz y Tollenaar, 2006). El rendimiento del maíz es función del patrimonio genético del cultivar, cuya expresión depende de varios factores ambientales y fisiológicos propios de la planta, que generalmente están interrelacionados. Algunos de ellos como la distribución vertical del área foliar y la radiación transmitida dentro del dosel se relacionan estrechamente con el proceso fotosintético. Así, la parte del dosel de las plantas que reciben la mayor proporción de energía radiante incidente incrementará su eficiencia fotosintética (Wall y Kanemasu, 1990; Camacho *et al.*, 1995). Se ha señalado que las diferencias en la atenuación (extinción) de luz entre cultivares de maíz está determinada por la estructura del dosel (Boote y Loomis, 1991), definida en términos de la magnitud, la forma y la orientación de los componentes de la parte aérea de la planta. El coeficiente de extinción de luz del dosel (k) es un factor importante en la ley de Lambert-Beer, ya que su valor está determinado por la estructura del dosel, la especie y el patrón de plantación (Zarea *et al.*, 2005). Puede ser calculado con la ecuación:

$$k = \frac{-\ln(RFAt/RFAi)}{IAF} \quad (1)$$

Donde: RFAt y RFAi son la radiación fotosintéticamente activa transmitida e incidente, respectivamente (Flénet *et al.*, 1996) e IAF es el índice de área foliar. De acuerdo con Madonni y Otegui (1996), la estructura del dosel difiere entre los híbridos de maíz con sus respectivos efectos sobre el coeficiente de extinción de luz. Las propiedades estructurales del dosel que determinan la intercepción de la luz por especie son el índice de área foliar (IAF), la altura de planta (ALT), la distribución vertical del área foliar y el ángulo de inserción foliar.

Se ha demostrado que los híbridos de maíz varían en altura, número de hojas, área foliar individual, ángulo de inserción de las hojas y la distribución del área foliar a lo largo del tallo (Edmeades y Lafitte, 1993; Madonni y Otegui, 1996). Otros autores (Begna *et al.*, 2001) han detectado diferencias en la arquitectura del dosel entre genotipos de maíz, mismas que por ser determinantes en la cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada, tienen impacto sobre el rendimiento de grano y la supresión de la maleza. En los Valles Altos del centro de México se utiliza una amplia gama de materiales genéticos para la producción de maíz (tanto poblaciones nativas (criollos) como mejorados); no obstante, las características estructurales del dosel de éstos, han sido escasamente descritas y estudiadas, por lo tanto se desconoce su efecto sobre el rendimiento de grano, por lo que los objetivos del presente estudio fueron: a) Caracterizar tres genotipos de maíz de Valles Altos con respecto a los atributos morfológicos y fisiológicos del dosel, así como por el perfil de atenuación o coeficiente de extinción de luz, y b) Determinar cómo influye la estructura del dosel en la acumulación total de biomasa y el rendimiento de grano de los genotipos estudiados.

1.1 Materiales y métodos

1.1.1 Área de estudio

El estudio se realizó en el ciclo primavera-otoño de 2012 en un lote experimental del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Texcoo, Estado de México (19° 29' N, 98° 54' O, 2250 m de altitud), bajo condiciones de lluvia estacional a una altitud de 2250 m. El clima es del tipo BS1 que corresponde al menos seco de lo áridos con lluvias en verano, una temperatura median anual de 14.6°C y precipitación media anual de 558.5 mm (García, 2005).

1.1.2 Diseño de tratamientos, diseño experimental, manejo y análisis estadístico

El 8 de mayo de 2012 se sembraron de manera manual dos híbridos generados por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) para la región de Valles Altos: H-48, H-50, además de una población nativa de maíz de grano azul (criollo) cv. San Miguelito perteneciente a la raza Chalqueño (Wellhausen *et al.*, 1971) originario de San Andrés Tocuila, Texcoco, Estado de México. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones, en donde los tratamientos fueron los tres genotipos de maíz. La unidad experimental estuvo compuesta por tres surcos de 5 m de longitud y 0.8 m de ancho, se consideró como parcela útil el surco central. La densidad de población fue de 6.25 plantas m⁻² (patrón de siembra 80 x 20 cm, aproximadamente). No se registraron problemas importantes de plagas o enfermedades durante el desarrollo del experimento. La maleza se manejó de manera manual durante todo el ciclo.

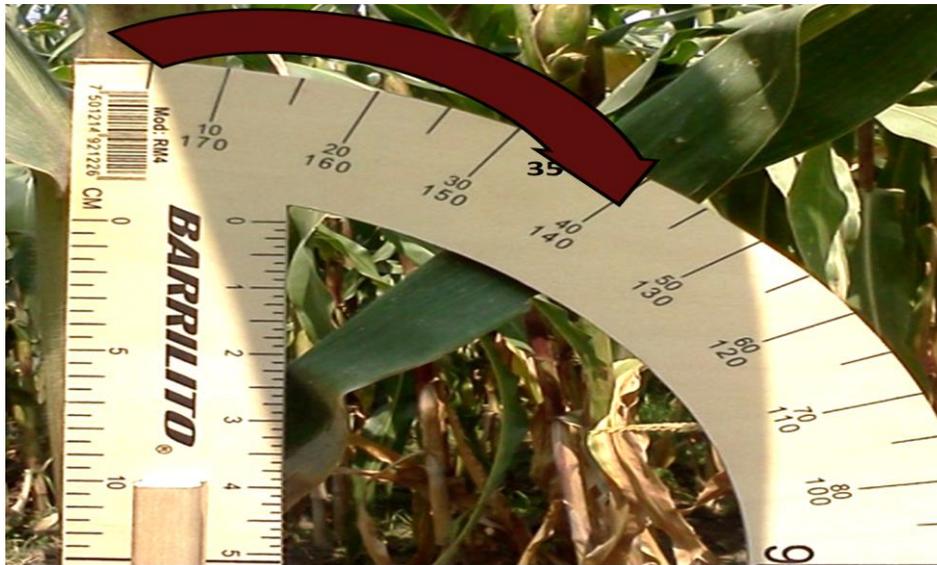
1.1.3 Variables meteorológicas y fenología

Los datos de temperatura máxima (T_{máx}), mínima (T_{mín}) y precipitación pluvial diarias, fueron proporcionados por la estación Agrometeorológica del Colegio de Postgraduados. Con ellos se calcularon promedios decenales para las T_{máx} y T_{mín} y la suma decenal de la precipitación (Ppt, mm) y evaporación (Evp, mm) durante el desarrollo del estudio. Se registró la ocurrencia de las fases fenológicas: días a emergencia (VE), floración femenina (R1) y madurez fisiológica (R6), con base en el criterio presentado en Ritchie y Hanway (1982). A los 100dds, una vez que todos los cultivares habían alcanzado R1, se determinaron las variables fisiológicas y morfológicas.

1.1.4 Variables morfológicas

En dos plantas de la parcela útil se tomaron las siguientes: altura de planta desde el suelo hasta la lígula de la hoja bandera (Pepper *et al.*, 1977), número de hojas verdes presentes en R1 y ángulo de inserción foliar medido desde el tallo hasta la nervadura central de cada hoja en el sentido de las manecillas del reloj con un transportador de madera de 40 cm de longitud (Winter y Ohlrogge, 1973; Figura 1).

Figura 1 Medición del ángulo de inserción foliar con respecto al tallo (vertical) por medio de un transportador de madera



1.1.5 Variables fisiológicas

Se registró la longitud (L) y el ancho máximo (A) de la lámina de cada hoja verde presente en R1, y con estos datos se calculó el área foliar por hoja (AF) mediante el modelo propuesto por Montgomery (1911): $AF = 0.75 * L * A$. La suma de las AF permitió conocer el área foliar total por planta (AFP) y con ella se calculó el IAF con la ecuación $IAF = (AFP/NP) * DP / 100 \text{ dm}^2$; donde AFP = área foliar por planta (dm^2), NP = número de plantas muestreadas y DP = número de plantas m^{-2} . Las lecturas de luz se realizaron a medio día (± 0.5 hrs) utilizando un sensor lineal de quanta (Quantum Line 6 sensor Bar, Spectrum Technologies, Inc.) que mide la radiación fotosintéticamente activa (400-700 nm, RFA). El sensor se colocó perpendicular a las hileras del cultivo (Egli, 1994) y lo más horizontalmente posible. Se tomaron dos lecturas por estrato de 30 cm partiendo desde el suelo (tRFA) y hasta la hoja bandera; además se hicieron dos lecturas por encima de la inflorescencia masculina para conocer la RFA incidente (iRFA). Con los datos relativos de estas observaciones, se determinó el perfil de atenuación de luz de cada cultivar.

Los coeficientes de extinción de luz (k) se calcularon de acuerdo con la fórmula $k = -\ln(tRFA/iRFA)/IAF$ (Pepper, 1977; Flénet *et al.*, 1996). Para determinar la radiación interceptada por el dosel de los cultivares se utilizó el modelo $RI = (iRFA - tRFA)/iRFA$ (Flénet *et al.*, 1996; Awal *et al.*, 2005). A las variables en estudio les fue aplicado un análisis de varianza (ANDEVA), y a las que resultaron con diferencias estadísticas significativas la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$), mediante el programa estadístico SAS versión 9.0 (SAS, 2003).

1.2 Resultados y discusión

1.2.1 Variables meteorológicas y fenología de los cultivares

La Ppt acumulada durante la estación de crecimiento fue de 356 mm, que sumada a los 100mm aproximados, suministrados en los riegos, da un total de 456 mm, de los cuales el 66% se presentó en el periodo vegetativo y el 34% en el reproductivo (Tabla 1).

En promedio, la T_{máx} osciló entre 22.5 y 34.1°C y la T_{mín} entre -2.2 y 12.6 °C. La temperatura más alta se registró en la decena en la que se realizó la siembra (1era decena de mayo) y las más bajas en el mes de noviembre, cuando los cultivares ya habían alcanzado la madurez fisiológica (R6).

Tabla 1 Precipitación pluvial (Ppt, suma decenal), precipitación pluvial acumulada (Ppt_{ac}, suma acumulativa por decenas), temperaturas máximas (T_{máx}, promedio decenal) y mínimas (T_{mín}, promedio decenal) durante el desarrollo de cinco genotipos de maíz. Montecillo, México. Mayo- Noviembre, 2012

Mes	Decena	T _{máx} .(°C)	T _{mín} .(°C)	Ppt. (mm)	Ppt _{ac} (mm)
Mayo	1	34.10	6.20	16.24	16.24
	2	28.50	7.88	16.18	32.42
	3	30.93	3.00	1.25	33.67
Junio	1	31.90	6.50	3.99	37.66
	2	31.00	6.30	31.42	69.08
	3	25.50	9.79	26.23	95.31
Julio	1	25.00	4.50	16.89	112.20
	2	25.25	8.17	54.21	166.41
	3	26.00	8.40	33.09	199.50
Agosto	1	24.70	8.79	35.91	235.41
	2	22.46	12.60	63.56	298.97
	3	25.44	8.93	14.37	313.34
Septiembre	1	28.13	4.80	3.61	316.95
	2	26.21	8.67	18.21	335.16
	3	25.90	7.00	14.90	350.06
Octubre	1	26.92	0.80	6.20	356.26
	2	29.25	0.58	0.00	356.26
	3	28.67	1.40	0.00	356.26

La ocurrencia de las etapas y fases fue variable entre cultivares. H-48 fue el más precoz. Así, la emergencia (VE) se presentó a los 6 dds, la floración femenina (R1) a los 84 dds y la madurez fisiológica (R6) a los 155 dds. H-50 mostró un comportamiento fenológico similar a H-48, aunque requirió 86 y 158 d para alcanzar R1 y R6, respectivamente. Espinosa *et al.* (2003) indican que H-48 presenta sincronía en la floración masculina y femenina a los 82 dds, en promedio, y madurez fisiológica entre 150 y 155 dds, por lo que el comportamiento observado en este estudio coincide con lo descrito. Caso similar es el de H-50, cuya descripción indica que R1 ocurre a los 84 dds y R6 a los 155 dds, dos y tres días antes de lo ocurrido en este estudio. El criollo Azul fue el más tardío, con 9, 96 y 176 d para alcanzar VE, R1 y R6, respectivamente.

1.2.2 Número de hojas verdes (NHV), área foliar por hoja (AFH), área foliar por planta (AFP) e índice de área foliar (IAF)

El número de hojas verdes por planta (NHV), el área foliar promedio por hoja (AFH), el área foliar por planta (AFP), el índice de área foliar (IAF) y la altura de planta hasta la hoja bandera (ALThb) a los 100 dds (11 días después de R1, en promedio), mostraron diferencias significativas entre genotipos (Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Número de hojas verdes por planta (NHV), área foliar promedio por hoja (AFH, dm²), área foliar total por planta (AFP, dm²), índice de área foliar (IAF) y altura de planta hasta la hoja bandera (ALThb, cm) a los 100 dds de cinco genotipos de maíz de Valles Altos. Montecillo, México. Primavera-otoño, 2012

Genotipo	NHV	AFH (dm ²)	AFP (dm ²)	IAF	ALThb (cm)
H-48	12.3 a	4.42 b	57.46 b	3.6 b	249.0 b
H-50	11.33 b	4.46 b	62.90 ab	3.9 ab	253.0 b
Azul	11.33 b	5.51 a	71.32 a	4.5 a	298.0 a
Prob. F	**	*	*	*	*
DMS	1	0.53	9.16	0.57	34.4
C.V.	0.05	3.7	4.9	4.9	4.4

En cada columna medias con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey $P \leq 0.05$)

*: $P \leq 0.05$, **: $P \leq 0.01$; NS = no significativo. DMS = diferencia mínima significativa (Tukey $P \leq 0.05$). C.V. = Coeficiente de variación

El mayor NHV a los 100 dds fue presentado por H-48 (12.3). Sin embargo el tamaño promedio de hoja fue mayor en el criollo Azul (5.52 dm²). Estos datos contrastan con lo encontrado por Camacho *et al.* (1995), quienes al caracterizar nueve genotipos de maíz en Venezuela no observaron diferencias estadísticas significativas para el área promedio por hoja, lo cual indica que la variabilidad en esta característica del dosel en los genotipos del presente estudio es mayor a la de otros. Los valores más altos de área foliar por planta e IAF se encontraron en el nativo Azul (71.3 dm² y 4.5, respectivamente). H-48 mostró el menor tamaño de hoja (AFH) y AFP (4,4 y 57,5 cm²), lo cual dio lugar al IAF más bajo entre los cultivares estudiados (3.6). Los datos del IAF se encuentran en el rango reportado por Maddonni y Otegui (1996) para dos híbridos argentinos (3.6 a 4.7) cuando fueron sembrados a una densidad de 7 plantas m⁻²; y son mayores a lo indicado por Stewart *et al.* (2003), quienes al analizar híbridos convencionales y de altura reducida en Canadá, sembrados a 8 plantas m⁻², encontraron IAF en el rango de 1.53 a 4.65.

1.2.3 Altura de planta

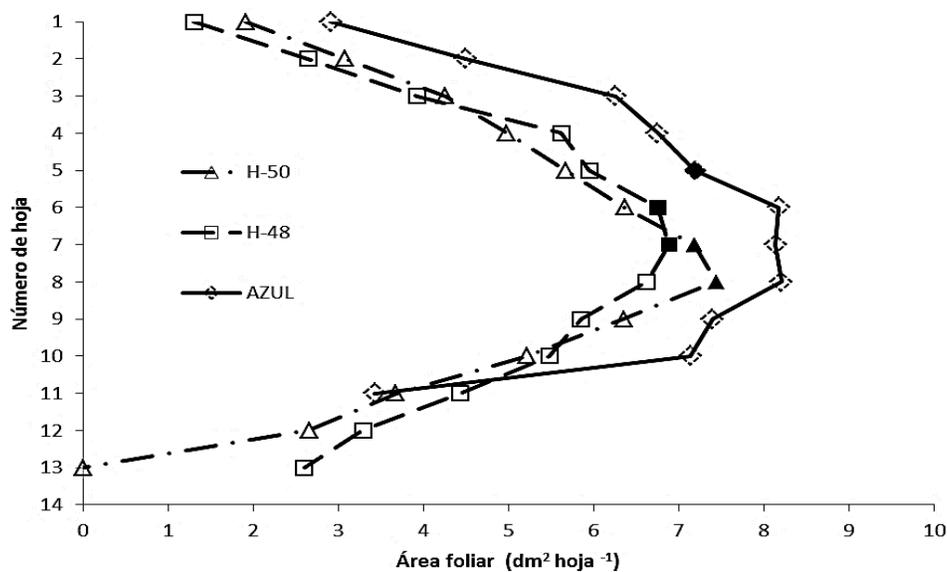
El nativo Azul fue el de mayor altura con 2.98 m hasta la hoja bandera, lo cual indica que podría ser más propenso al acame con los vientos presentes en los Valles Altos de México. Lo anterior concuerda con lo apuntado por Reyes (1990), quien menciona que algunos genotipos criollos pueden alcanzar una altura de hasta 8 m. También coincide con los descriptores para la raza Chalqueño realizados por Hernández X. (1987), donde se indica que los cultivares de esta raza son de mayor altura. De entre los híbridos, H-50 fue el de mayor altura (2.53 m) aunque sólo superó a H-48 por cuatro centímetros, estos datos se encuentran dentro del rango de altura para sus descripciones varietales (Espinosa *et al.*, 2003; INIFAP, 2011).

1.2.4 Perfil vertical del área foliar

Tanto el área foliar promedio por hoja (AFH), como el área de cada hoja en una misma posición, mostraron variación entre genotipos. Las diferencias en el AFH con respecto a su posición en el tallo se presentan en el Gráfico 1.

Se observa que el AFH aumenta progresivamente desde la base de la planta hasta llegar al nudo en el que se insertan la o las mazorcas, punto a partir del cual el AFH tiende a disminuir hasta llegar a la hoja bandera. Es decir, la distribución del área foliar, una vez que todas las hojas están expandidas, puede ser representada con una curva en forma de campana en función del número de hoja, lo cual coincide con estudios como los Dwyer y Stewart (1986), Maddonni y Otegui (1996), Elings (2000) y Valentinuz y Tollenaar (2006), quienes en diferentes condiciones geográficas, climáticas y variando las prácticas agronómicas, encontraron una distribución semejante en el perfil vertical del área foliar en híbridos de maíz, que incluso pudieron ser predichas por medio de modelos matemáticos.

Gráfico 1 Distribución del área foliar individual de cinco genotipos de maíz de Valles Altos (La hoja 1 representa la hoja bandera). Primavera-otoño, 2012. Los marcadores con relleno en negro indican el nudo en el que se insertan la o las mazorcas



Ha sido señalado que el perfil vertical del área foliar tiene influencia sobre la intercepción y utilización de la radiación solar por el dosel, y en consecuencia sobre la acumulación de materia seca y el rendimiento de grano, por lo que su descripción y estudio podrían contribuir y ser considerados como uno de los atributos deseables a considerar en un proceso de mejoramiento genético (Valentinuz y Tollenaar, 2006).

1.2.5 Posición de la mazorca en el tallo

Los híbridos produjeron dos mazorcas, a diferencia del nativo que produjo una. El nudo en el cual se insertaron las mazorcas fue variable entre los genotipos, sin embargo coincidió con la o las hojas con mayor AFH, a excepción del nativo azul.

En el caso de los híbridos, las mazorcas se insertaron entre los nudos 6 y 9 (considerando a la hoja bandera como el nudo 1), los cuales coincidieron con las hojas de mayor magnitud, lo que sugiere una traslocación de fotoasimilados mayor y más directa hacia los frutos en formación. En el nativo Azul, la mazorca se encontró en el nudo 5, que además de ser una posición alta (2.1 m aproximadamente), no coincide con una de las hojas más grandes, lo cual podría limitar el suministro de fotoasimilados para el llenado de grano. La posición del nudo en el que se inserta la mazorca en los genotipos estudiados coincide con el intervalo descrito por Stewart *et al.* (2003) para híbridos de características morfológicas contrastantes en Canadá (5.7-9.7).

1.2.6 Área foliar de la hoja en que se inserta la mazorca

En lo relativo al AF de la hoja en la que se inserta la mazorca o mazorcas, los tres genotipos mostraron hojas de entre 6.5 y 7.5 dm², lo cual se encuentra en el rango registrado por Maddonni y Otegui (1996), Maddonni *et al.* (2001) y Lambert *et al.* (2014), quienes encontraron un tamaño máximo de hoja de la mazorca de aproximadamente 7.5 dm². Lo anterior indica que los cultivares de maíz de Valles Altos cuentan con hojas de tamaño similar a las de otros híbridos de alto rendimiento lo cual podría ser un factor que optimice el proceso de translocación hacia el grano y, conlleve a aumentar el rendimiento ya que ha sido señalado que las hojas que se encuentran próximas a la mazorca (generalmente en la parte media del dosel) tienen la capacidad inherente de aportar mayor cantidad de fotosintatos a la mazorca y con esto ser determinantes en el incremento del rendimiento de grano (Pendleton, *et al.*, 1968).

1.2.7 Ángulo de inserción foliar

El ángulo de inserción foliar en conjunto con el índice de área foliar ejercen influencia sobre la eficiencia fotosintética del dosel. Así, para IAF altos la eficiencia es mayor con hojas erectas (Pendleton *et al.*, 1968; Duncan, 1971; Pepper *et al.*, 1977). En el caso de los genotipos estudiados, se encontraron diferencias estadísticas significativas tanto para el ángulo foliar promedio como para el ángulo foliar por estrato del dosel (Tabla 1.1). En general, el mayor ángulo promedio (61.7) fue mostrado por el nativo Azul, lo cual indica que posee un dosel más planófilo, que aunque podría captar mayor radiación que un dosel erecto también implica un mayor sombreado a las hojas de los estratos bajos, lo que conlleva a la senescencia acelerada de éstas, así como a la reducción de la eficiencia fotosintética de las mismas (Rajcan y Swanton, 2001; Subedi y Ma, 2005).

Tabla 1.1 Ángulo de inserción (° de inclinación con respecto al tallo) de las hojas por abajo, alrededor, por arriba de la mazorca y promedio de todas las hojas verdes a los 100 dds de cinco genotipos de maíz de Valles Altos. Primavera-otoño, 2012

Genotipo	Por abajo	Alrededor	Por arriba	Promedio
H-48	37.0 b	59.0 ab	44.0 b	46.7
H-50	35.7 b	49.2 b	64.2 a	49.7
Azul	45.3 a	73.7 a	66.0 a	61.7
Media	39.3	60.6	58.1	52.7
Prob. F	**	**	**	
DMS	6.1	20.9	10.24	
C.V.	5.7	13.75	7.26	

En cada columna medias con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey $P \leq 0.05$)

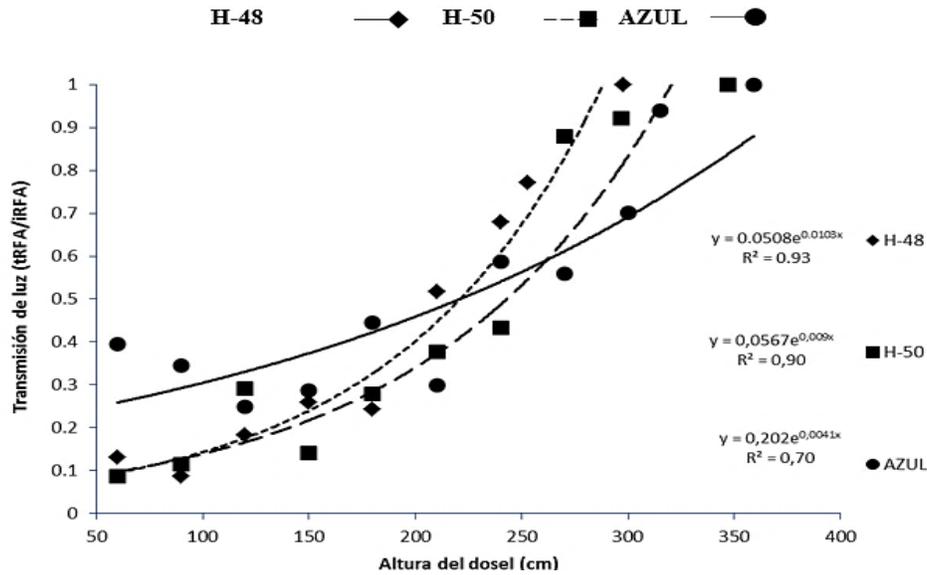
** : $P \leq 0.01$, DMS: diferencia mínima significativa (Tukey, $P \leq 0.05$). C.V.: Coeficiente de variación

Respecto al ángulo foliar por estratos del dosel, se encontró que el menor ángulo promedio de todos los genotipos se ubicó en las hojas que se encuentran por debajo de la mazorca (39.3°), seguidas por las ubicadas por arriba de la mazorca (58.1°). El mayor ángulo promedio se registró para la hojas en las que se inserta la mazorca y las adyacentes (60.6°), lo cual se espera, debido a que el ángulo aumenta conforme crece la mazorca. Estos resultados se encuentran en concordancia con lo propuesto por Mock y Pearce (1975) para el ideotipo de la planta de maíz, que es el término acuñado por Donald (1968) para describir a las plantas con características modelo cuya arquitectura influye de mejor manera sobre la fotosíntesis, el crecimiento y el rendimiento de grano. Al analizar el ángulo foliar por estrato y genotipo, se encontró que en todos los casos el nativo Azul mostró los mayores ángulos en los tres estratos del dosel, lo cual indica que es un dosel planófilo. Para los híbridos, las hojas por abajo de la mazorca mostraron un ángulo foliar estadísticamente similar (37 y 35.7 para H-48 y H-50, respectivamente). En lo que corresponde a las hojas alrededor de la mazorca, H-48 presentó el mayor ángulo foliar (59°), en comparación con H-50 cuyo ángulo promedio de las hojas alrededor de la mazorca fue de 49.2°. Las hojas por arriba de la mazorca de los híbridos H-48 fueron las más erectas. En contraste, las hojas de H-50 y el nativo Azul que presentaron los mayores ángulos con 64° y 66°, respectivamente, por lo que tienden a ser más horizontales. Pendleton *et al.* (1968) señaló que el maíz con las hojas superiores a la mazorca con un ángulo de inclinación cercano a 10° (con respecto al tallo lo cual da lugar a una hoja erecta) posee ventajas en el rendimiento de grano cuando se encuentra acompañado de un índice de área foliar mayor a cuatro. Además, hojas erectas en la parte superior del dosel generan coeficientes de extinción de luz (k) más bajos, debido a que menos luz es interceptada por unidad de IAF (Duncan, 1971; Pepper *et al.*, 1977), por lo que mayor cantidad de área foliar por unidad de superficie es necesaria para una mayor cantidad de radiación interceptada (Monteith, 1969; Saeki, 1960; Pepper *et al.*, 1977). Es importante destacar que la verticalidad de las hojas por arriba de la mazorca permite una transmisión más uniforme de la luz a lo largo de todo el dosel, y de esta manera contribuye a que las hojas en las que se inserta la mazorca y las que se encuentran debajo de ésta, reciban energía solar y continúen el proceso de fotosíntesis, además de retrasar la senescencia de las mismas.

1.2.8 Coeficiente de extinción de luz

Las características del dosel, tales como el ángulo de inserción e índice de área foliar ejercen influencia sobre la cantidad de radiación interceptada por la planta (RI), así como sobre la manera en que ésta se extingue o atenúa a través del dosel del maíz (Boote y Loomis, 1991; Maddonni, *et al.*, 2001). Debido a que los cultivares estudiados mostraron diferencias notables en la estructura del dosel, se infiere que el perfil de atenuación de luz sea diferente para cada genotipo. En el Gráfico 1.1 se muestran los perfiles de atenuación de los genotipos estudiados y se observan claras diferencias genotípicas. En todos los casos la extinción de luz se ajustó a un modelo exponencial, el cual indica que la transmisión de luz decrece de manera proporcional con el descenso en el perfil del dosel; los coeficientes de determinación (R^2) fueron superiores al 70%. Los genotipos H-48 y H-50 fueron los que capturaron la mayor proporción de la radiación incidente, y H-48 presenta el mayor valor de la pendiente, que indica una velocidad de extinción de luz más alta. H-50 muestra un comportamiento similar, aunque la luz decrece a través del dosel de manera más paulatina. El criollo Azul permite mayor transmisión de radiación hacia el suelo y muestra menor velocidad de atenuación de luz, lo cual indica una menor cobertura del suelo en comparación con el resto de los genotipos estudiados, por lo que se esperaría que la maleza en este genotipo tuviera un mayor desarrollo. La atenuación de la luz a través del dosel del maíz, puede ser descrita mediante modelos exponenciales que relacionan la altura de la planta con la radiación solar transmitida a estratos inferiores del dosel.

Gráfico 1.1 Perfil de transmisión de luz de cinco genotipos de maíz de Valles Altos. Datos a los 100 dds. Montecillo, Estado de México. Primavera-otoño, 2012



En la Tabla 1.2 se presentan los valores del coeficiente de extinción de luz (k) de los genotipos estudiados a los 60 cm de altura. El análisis de varianza reveló diferencias significativas entre los materiales genéticos Sin embargo, en todos se observaron bajos valores de k en la parte superior del dosel, que se incrementaron a medida que se desciende en el perfil, lo cual es razonable debido a que el coeficiente de atenuación es una medida indirecta de la luz que es capaz de transmitirse por el dosel. Estos resultados concuerdan con los reportados por Scarsbrook y Doss (1973) y Camacho *et al.*, (1995), quienes al caracterizar nueve genotipos de maíz en Venezuela encontraron que a 2.5 m de altura el k promedio fue de 0.2, y que aumentó conforme se disminuyó la altura, hasta llegar a 0.52 a los 0.5 m de altura de planta.

Tabla 1.2 Coeficiente de extinción de luz (k) a 60 cm de altura y radiación solar interceptada (RI, en la base de la planta) de cinco genotipos de maíz de Valles Altos a los 100 dds. Montecillo, Estado de México. Primavera-otoño, 2012

Genotipo	k	RI
H-48	0.62 a	0.89 a
H-50	0.54 a	0.88 a
Azul	0.35 b	0.57 b
Media	0.52	0.79
Prob. F	**	**
Tukey 0.05	0,17	0,21
C.V.	11,6	9,7

En cada columna medias con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey $P \leq 0.05$)

*: $P \leq 0.05$; **: $P \leq 0.01$, DMS: diferencia mínima significativa (Tukey, $P \leq 0.05$). C.V.: Coeficiente de variación

H-48 mostró el k más alto (0.63) no obstante tener bajo IAF y altura total de planta, sin embargo mostró el mayor NHV, mismas que en los estratos de abajo y arriba de la mazorca mantuvieron ángulos de inserción menores a 45° . Esto contribuyó a una distribución apropiada para alcanzar una RI más alta, ya que esta variable fue máxima en este genotipo (89%). H-50 mostró un comportamiento estadísticamente comparable a H-48.

El nativo Azul mostró el k más bajo, lo cual explica la menor RI (57%). Estos resultados contrastan con lo esperado para un material criollo con hojas generalmente planófilas, lo cual se registró en el estrato superior del dosel donde el ángulo de inserción promedio fue de 66° ; esto implicaría una mayor RI en comparación con los materiales con un dosel más erecto. Sin embargo, las hojas por debajo de la mazorca mostraron un ángulo de inserción promedio de 45.3° , el cual, si bien es mayor al de las hojas de los híbridos, se podría catalogar como un dosel semierecto.

Una planta de maíz con hojas erectas por debajo de la mazorca y más planófilas en la parte superior, se contraponen al ideotipo para este cultivo propuesto por Mock y Pearce (1975), que establece que las hojas del estrato inferior deben tener ángulos foliares amplios, que generen hojas planófilas, para lograr la mayor RI posible y evitar que ésta llegue al suelo; mientras que las hojas superiores del dosel deben tener ángulos más cerrados, los cuales dan lugar a hojas más erectas que permitan que la radiación penetre hacia el estrato inferior del dosel. Las características anteriores, de acuerdo con Fakorede y Mock (1978), resultarían en una alta eficiencia fotosintética y translocación de fotosintatos hacia el grano.

1.2.9 Biomasa y rendimiento de grano

La modificación de las características del dosel con el propósito de aumentar el rendimiento de grano en maíz ha sido tema de estudio desde hace décadas (Ford *et al.*, 2008), ya que aunque se cuente con una planta con la arquitectura perfecta para la cosecha de energía solar y una alta capacidad fotosintética, si el proceso de translocación de los fotoasimilados hacia el grano y el llenado de éstos, no se lleva a cabo de manera apropiada, estas características ideales no serían determinantes para el rendimiento de grano.

La acumulación de biomasa está estrechamente relacionada con la capacidad fotosintética de la planta, mientras el rendimiento de grano con la translocación de fotoasimilados. En la Tabla 1.3 se presentan la biomasa total (BT) y el rendimiento de grano (RG) de los genotipos estudiados, que mostraron cambios estadísticos significativos en función del cultivar. H-50 acumuló la mayor BT (1612 g m^{-2}) y fue estadísticamente similar al nativo. La BT más baja correspondió a H-48 con 1388 g m^{-2} , pero también el rendimiento más alto (605 g m^{-2}), lo cual sugiere un índice de cosecha alto (43%). En contraste, el RG más bajo fue encontrado en el nativo (501 g m^{-2}).

Tabla 1.3 Biomasa total (BT, g m^{-2}) y rendimiento de grano (RG, g m^{-2}) a madurez fisiológica de cinco genotipos de maíz de Valles Altos. Montecillo, Estado de México. Primavera-otoño, 2012

Gen	BT (g m^{-2})	RG (g m^{-2})
H-50	1612.6 a	568.3 ab
Azul	1572.6 a	500.9 b
H-48	1388.1 b	604.9 a
Prob. F	*	*
DMS 0.05	461.8	46.7

En cada columna medias con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey $P \leq 0.05$)

*: $P \leq 0.05$; **: $P \leq 0.01$, DMS: diferencia mínima significativa (Tukey, $P \leq 0.05$). C.V.: Coeficiente de variación

La baja acumulación de BT de H-48 podría explicarse, en parte, a la duración de su ciclo, ya que fue el cultivar más precoz (155 días a madurez fisiológica), lo cual aunado al IAF más bajo entre los cvs. estudiados, podría limitar su capacidad para producir materia seca, no así para generar RG, ya que este híbrido mostró algunas características decisivas para la generación del RG, entre ellas: a) un AIF promedio de 49.6° que se categoriza como semierecto (SNICS, 2009), pero que tiene la particularidad de contar con hojas más erectas por debajo de la mazorca que por arriba de ella, lo cual contrasta con las características del ideotipo de este cultivo (Mock y Pearce, 1975); b) un alto número de hojas por planta pero con la menor AFH y que cuentan con una distribución vertical del área foliar que permite la penetración uniforme de la luz, c) las hojas en las que se insertan las mazorcas son considerablemente más grandes que las encontradas en otras posiciones en este genotipo lo cual es importante ya que ha sido demostrado que las hojas que más contribuyen al establecimiento y llenado de los granos son las que están alrededor de la mazorca, por lo que se busca que ésta, se inserte en las hojas más grandes para que pueda tener un suministro mayor de fotoasimilados (Rajcan *et al.*, 1999; Subedi y Ma, 2005). Los asimilados producidos después de la floración son la fuente más importante en el llenado de grano y, en general, no provienen del tallo, debido a que no pueden ser removilizados desde éste para cubrir los requerimientos de los frutos en crecimiento (Tollenaar, 1977; Lizaso, 2003; Subedi y Ma, 2005). Las características anteriores dan lugar al coeficiente de extinción de luz y radiación interceptada más altos de los cultivares estudiados ($k = 0.39$ y $RI = 89\%$). Esto sugiere que una gran cantidad de radiación es captada y que se distribuye uniformemente a lo largo de todo el perfil vertical del área foliar, permitiendo así a las hojas de los estratos medio y bajo realizar el proceso fotosintético de manera apropiada, al retrasar la senescencia y promover la translocación de los productos hacia el grano (Chen *et al.*, 2014; Tollenaar y Lee, 2006).

El nativo Azul mostró un comportamiento diferente a los híbridos en varias características del dosel, tales como mayor altura de planta y de mazorca así como de área foliar promedio. El área foliar total, el número de hojas por arriba de la mazorca y el área de la hoja en la que se inserta la mazorca fueron de menor magnitud que en los híbridos, pero el ángulo de inserción foliar promedio fue mayor, lo que provocó un coeficiente de extinción de luz y radiación interceptada bajos.

1.3 Conclusiones

Existen diferencias en la estructura del dosel entre los híbridos y el cultivar nativo estudiado. H-48 presentó el coeficiente de extinción de luz y radiación interceptada más altos además del rendimiento de grano más alto del estudio.

La estructura del dosel mostró tener influencia sobre la acumulación de biomasa y el rendimiento de grano. Las variables morfológicas más importantes fueron la magnitud de la hoja en que se inserta la mazorca, el índice de área foliar, la posición semierecta de las hojas y una distribución vertical del área foliar apropiada para una mayor transmisión e intercepción de la radiación solar.

1.4 Referencias

- Awal, M. A.; W. I. W. Ismail; M. H. Harun and J. Endan. 2005. Methodology and measurement of radiation interception by quantum sensor of the oil palm plantation. *Journal of Science and Technology* 27: 1083-1093.
- Begna, S.H.; R.I. Hamilton; L.M. Dwyer; D.W. Stewart; D. Cloutier; L. Assemat; K. Foroutan-pour and D.L. Smith. 2001. Morphology and yield response to weed pressure by corn hybrids differing in canopy architecture. *European Journal of Agronomy* 14: 293–302.

- Boote, K. J. y R. S. Loomis. 1991. The Prediction of Canopy Assimilation. In Modeling Crop Photosynthesis – from Biochemistry to Canopy. American Society of Agronomy Journal and Crop Science Society of America. CSSA Special Publication, 19.
- Camacho, R.; O. Garrido y M. Lima. 1995. Caracterización de nueve genotipos de maíz (*Zea mays* L.) en relación a área foliar y coeficiente de extinción de luz. *Sci. Agric.*, Piracicaba 52 (2): 294-298.
- Donald, C. M. 1968. The breeding of crop ideotypes. *Euphytica* 17: 385-403.
- Duncan, W. G. 1971. Leaf angles, leaf area, and canopy photosynthesis. *Crop Science* 11: 482-485.
- Dwyer, L.M. and D.W. Stewart. 1986. Effects of leaf age and position on net photosynthetic rates in maize (*Zea mays* L.) *Agric. For. Meteorol.* 37:29–46.
- Edmeades, G. O. and H. R. Lafitte. 1993. Defoliation and plant density effects on maize selected for reduced plant height. *Agronomy Journal* 85:850-857.
- Egli, D. B. 1994. Mechanisms responsible for soybean yield response to equidistant planting patterns. *Agronomy Journal* 86: 1046-1049.
- Elings A. 2000. Estimation of leaf area in tropical maize. *Agronomy Journal* 92(3): 436-444.
- Espinosa, A.; M. Tadeo; J. Lothrop; S. Azpiroz; R. Martínez; J. Pérez; C. Tut; J. Bonilla; A. María y Y. Salinas. 2003. H-48, nuevo híbrido de maíz de temporal para los Valles Altos del Centro de México. *Agricultura Técnica en México* 29(01): 85-87
- Fakorede, M.A. and J. J. Mock. 1978. Changes in morphological and physiological traits associated with recurrent selection for grain yield in maize. *Euphytica* 27: 397–409.
- Flénet, F.; J. E. Kiniry; J. E. Board; M. E. Westgate and D. C. Reicosky. 1996. Row spacing effects on light extinction coefficients of corn, sorghum, soybean, and sunflower. *Agronomy Journal* 88: 185-190.
- Ford, E. D.; A. Cocke; L. Horton; M. Fellner and E. Van Volkenburgh. 2008. Estimation, variation and importance of leaf curvature in *Zea mays* hybrids. *Agricultural and Forest Meteorology* 148:1598-1610.
- García E. 2005. Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen. 4ª Edición. Instituto de Geografía. Universidad Autónoma de México. 217 p.
- Hernández X., E. 1987. Xolocotzia. Tomo II. *Revista de Geografía Agrícola*. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México. 356p.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 2011. Día de Campo CEVAMEX 2011. Campo Experimental Valle de México. Memoria Técnica # 12. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. pp. 306.
- Lambert, R. J.; B. D. Mansfield and R. H. Mumm. 2014. Effect of leaf area on maize productivity. *Maydica* 59:58-64.
- Lizaso, J.I.; W.D. Batchelor and M.E. Westgate. 2003. A leaf area model to simulate cultivar-specific expansion and senescence of maize leaves. *Field Crops Research* 80:1–17.

- Maddonni, G. A. and M. E. Otegui. 1996. Leaf area, light interception, and crop development in maize. *Field Crops Research* 48: 81-87.
- Maddonni G. A.; M. E. Otegui y A. G. Cirilo. 2001. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. *Field Crops Research* 71: 183-193.
- Monteith, J. L. 1969. Light interception and radiative exchange in crop stands. J. D. Eastin, F.A. Haskins, C. Y. Sullivan y C. H. M. Van Bavel (Ed.). *Physiological aspects of crop yield*. American Society of Agronomy and Crop Science Society of America, Madison, Wis.
- Mock, J. and R. Pearce. 1975. An ideotype of maize. *Euphytica* 24: 613-623.
- Montgomery, E. C. 1911. Correlation studies in corn. In: *Nebraska Agric. Exp. Stn. Annu. Rep.* Lincoln, NE. pp. 108-159.
- Pendleton, J. W.; G. E. Smith; S. R. Winter and T. J. Johnston. 1968. Field investigations of the relationships of leaf angle in corn to grain yield and apparent photosynthesis. *Agronomy Journal* 60: 422-424.
- Pepper, G. E.; R. B. Pearce and J. J. Mock. 1977. Leaf orientation and yield of maize. *Crop Science* 17: 883-886.
- Rajcan, I. and C. Swanton. 2001. Understanding maize-weed competition: resource competition light quality and the whole plant. *Field Crops Research* 71: 139-150
- Reyes C., P. 1990. *El Maíz y su Cultivo*. AGT-EDITOR S.A. México. 460 pp.
- Ritchie, S. W. and J. J. Hanway. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service. Special report No. 48. Ames Iowa, EEUU. 21 p.
- Russell, G.; B. Marshall and P. G. Jarvis. 1990. *Plant Canopies: Their Growth, Form And Function*. Cambridge University Press.
- Saeki, T. 1960. Interrelationships between leaf amount, light distribution and total photosynthesis in a plant community. *Bot. Mag. Tokyo* 73:55-63.
- SAS Institute. 2003. *SAS/STAT user's guide Release 9.1*. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS). 2009. *Manual Gráfico para la Descripción Varietal del Maíz (Zea mays L.)*. SNICS-CP.
- Scarsbrook, C. E. and B. D. Doss. 1973. Leaf area index and radiation as related to corn yield. *Agronomy Journal* 15: 459-461.
- Stewart, D. W.; C. Costa; L. M. Dwyer; D. L. Smith; R. I. Hamilton and B. L. Ma. 2003. Canopy Structure, Light Interception, and Photosynthesis in Maize. *Agronomy Journal* 95: 1465-1474.
- Subedi, K. D. and B. L. Ma. 2005. Ear position, leaf area, and contribution of individual leaves to grain yield in conventional and leafy maize hybrids. *Crop Science* 45: 2246-2257.

- Tollenaar, M. 1977. Sink source relationships during reproductive development in maize: A review. *Maydica* 22:49–75.
- Tollenaar, M. and E. A. Lee. 2006. Dissection of physiological processes underlying grain yield in maize by examining genetic improvement and heterosis. *Maydica* 51: 399–408.
- Valentinuz, O. R. and M. Tollenaar. 2006. Effect of genotype, nitrogen, plant density, and row spacing on the area-per-leaf profile in maize. *Agronomy Journal* 98: 94-99.
- Wall, G. W. and E. T. Kanemasu. 1990. Carbon dioxide exchange rates in wheat canopies II. Photosynthetic and phytomass production efficiencies. *Agricultural and Forest Meteorology* 49: 103-122.
- Wellhausen, E. J.; L. M. Roberts; X. E. Hernández y P. C. Mangelsdorf. 1951. Razas de Maíz en México. Su origen, características y distribución. Oficina de Estudios Especiales. Secretaría de Agricultura y Ganadería. D.F., México. Folleto Técnico No. 5. 236 p.
- Winter S.R. and A. J. Ohlrogge. 1973. Leaf angle, leaf area, and corn (*Zea mays* L.) yield. *Agronomy Journal* 65(3): 396-397.
- Williams, M. M. II; R. Boydston and A. Davis. 2006. Canopy variation among three sweet corn hybrids and implications for light competition. *HortScience* 41: 1–6.
- Zarea, M. J.; A. Ghalavand and J. Daneshian. 2005. Effect of planting patterns of sunflower on yield and extinction coefficient. *Agron. Sustain. Dev.* 25:513-518.