

Efectos de la cobertura de la superficie, agua y nitrógeno sobre atributos del canopeo de maíz en panojamiento

Irigoyen, A.I., Cambareri, M.A., Echarte, L., Bayala, M. I. y Rivas, R.E.

RESUMEN

La estructura del canopeo comprende el tamaño, la orientación y distribución espacial de los órganos aéreos y su descripción es esencial para comprender los procesos de intercambio de masa y energía, que explican la interceptación de la radiación, la evapotranspiración y el rendimiento del cultivo. Además, la funcionalidad del canopeo puede describirse por el contenido de clorofila. El objetivo de este trabajo es caracterizar atributos de la estructura y de la funcionalidad del canopeo en el momento de máximo desarrollo del cultivo de maíz, un estado crítico para la definición de rendimiento, bajo diferentes condiciones de disponibilidad de agua y nitrógeno, en manejos con y sin cobertura de la superficie por residuos vegetales. Un experimento a campo fue conducido en Balcarce (Argentina) durante la campaña agrícola 2015-2016. Se sembró un híbrido de ciclo intermedio el 4 de noviembre con densidad de 6,2 plantas m². Los tratamientos incluyeron la combinación de (i) dos niveles de disponibilidad de agua (con riego, R y secano, S), (ii) dos tipos de cobertura (sin cobertura, Conv, y suelo con un cultivo de cobertura previo de vicia (*Vicia villosa* Roth.) y avena (*Avena sativa* L.), CC), y (iii) dos niveles de fertilización nitrogenada (0, N0 y 200 kg N ha⁻¹, N1). En panojamiento (VT) fueron caracterizados los atributos altura de plantas (Afin), altura de inserción de la última hoja (AUL), número de hojas (NTH), índice de área foliar verde (IAFV) y contenido de clorofila (unidades SPAD). Se representaron los perfiles verticales de área verde de cada hoja individual (AFV), unidades SPAD y unidades funcionales (SPAD x AFV). Los canopeos CC alcanzaron menor IAFV y porte que los canopeos Conv. Sin restricciones de agua, la mayor reducción del área foliar por efecto de CC ocurrió en la porción media del canopeo. Los atributos NTH, IAF AUL y Afin no fueron afectados por la fertilización nitrogenada, independientemente del tipo de cobertura de la superficie y disponibilidad de agua. La distribución vertical de los atributos funcionales (unidades SPAD x área foliar verde) fue más uniforme sin restricciones de agua en el suelo (R) que en condiciones limitantes (S).

Palabras clave: área foliar, altura, número de hojas, unidades SPAD, índice verde normalizado

Irigoyen, A.I., Cambareri, M.A., Echarte, L., Bayala, M. I. and Rivas, R.E., 2018. Effects of surface cover, water and nitrogen on attributes of maize canopy at tasseling. RADA IX: 75-84

SUMMARY

Canopy structure includes size, orientation and spatial distribution of aerial organs and its description is essential to understand the exchanges of mass and energy that determine radiation interception, evapotranspiration and crop yield. Besides the canopy functionality can be also described by chlorophyll content. The objective of this manuscript is to characterize attributes of the canopy structure and functionality at tasseling, a critical stage for grain yield definition, in maize grown under contrasting soil water availability, nitrogen supply and soil surface cover. One field experiment was conducted at Balcarce (Argentina) during the 2015-2016 growing season. An intermediate hybrid was sown on 4 November with a density of 6,2 plants m⁻². Treatments included the combination of (i) two water regimes (irrigated, R and rainfed, S), (ii) two soil covers (without soil cover, Conv, and soil with a previous cover crop of vicia (*Vicia villosa* Roth.) and oat (*Avena sativa* L.), CC), and (iii) two N supplies (0, N0 and 200 kg N ha⁻¹, N1). Canopy structural and functional attributes (i.e. plant height, number of leaves, green leaf area index, IAFV, and chlorophyll content, SPAD units) were characterized at tasseling (VT). Vertical distribution of green leaf area, SPAD units and functional leaf units were analyzed as a function of leaf insertion. Maize canopy height and green leaf area index was lower in maize with CC than in conventional maize; and the greatest leaf area reduction occurred in the middle part of the canopy, in soils without water limitations. Final number of leaves (NTH), plants height (AUL and Afin) and green leaf area index (IAFV) were not affected by N supply, regardless of soil cover or water availability. Vertical distribution of functional attributes (SPAD units x green leaf area) was more uniform within canopy, in non-water limited (R) than in water limited conditions (S).

Key words: leaf area, height, number of leaves, SPAD units, normalized green index

Irigoyen, A.I., Cambareri, M.A., Echarte, L., Bayala, M. I. y Rivas, R.E.: Unidad Integrada Balcarce: Facultad de Ciencias Agrarias UNMdP -INTA Balcarce. Ruta Nac. 226, km 73,5, Balcarce CC 276 (7620), Argentina. Correspondencia a: irigoyen.andrea@inta.gov.ar

INTRODUCCIÓN

La estructura del canopeo comprende el tamaño, la orientación y distribución espacial de los órganos aéreos y su descripción es esencial para comprender los procesos de intercambio de masa y energía (Norman y Campbell, 1989).

En maíz, el tipo de crecimiento del híbrido afecta la generación de área foliar verde (Birch *et al.*, 2003; Maune, 2014). La estructura del canopeo también se modifica por prácticas de manejo como la fecha de siembra, la densidad de plantas y la disponibilidad de nutrientes y agua (Maddonni *et al.*, 2001; Valentinuz y Tollenaar, 2006; Birch *et al.*, 2008; Díaz, 2015; Corral, 2016). Curvas en forma de campana para la distribución de área foliar verde (AFV) han sido descritas en la literatura bajo diferentes tratamientos (Keating y Wafula, 1992; Dwyer y Stewart; 1996; Boedhram *et al.*, 2001; Corral, 2016).

Nitrógeno y agua son factores determinantes del desarrollo foliar, condicionando además del área foliar verde (AFV) alcanzado, la senescencia de las hojas y la actividad fotosintética. La deficiencia de nitrógeno reduce la producción de biomasa al disminuir la expansión foliar y la eficiencia de conversión de la radiación (Andrade *et al.*, 1996). Sin embargo, el efecto del nitrógeno es escaso sobre el número final de hojas (Lemcoff y Loomis, 1986; Muchow y Davis, 1988). Las deficiencias de agua durante el desarrollo vegetativo del cultivo reducen la tasa de expansión y división celular, provocando una disminución en el AFV y en la altura de las plantas (Andrade *et al.*, 1996; Tardieu *et al.*, 2000).

En Balcarce, han sido descritos atributos morfológicos en canopeos de maíz sin limitantes hídricas ni nutricionales bajo siembra directa y convencional (Maune, 2014; Corral, 2016) y en seco (siembra directa) bajo dos manejos agronómicos con diferente nivel de intensificación (Díaz, 2015). Es de interés, describir los efectos de la disponibi-

lidad de agua y de nutrientes asociados al empleo de cultivos de cobertura (CC) previos al maíz. Los CC muestran algunos beneficios adicionales con respecto a los manejos conservacionistas tradicionales por sus efectos sobre la eliminación de malezas, el posible aumento en la disponibilidad de agua para el cultivo siguiente, la reducción de la erosión y el reciclado de nutrientes, entre otros (Clark, 2012).

La presencia de residuos en superficie por sus efectos sobre la temperatura del suelo (Stone *et al.*, 1999) y la disponibilidad de agua (Murungu *et al.*, 2011, Restovich *et al.*, 2012) puede afectar tanto la generación de área foliar como la elongación y entonces el patrón vertical de área foliar. A su vez, las variaciones en el desarrollo y en el estado nutricional e hídrico del cultivo pueden ser monitoreados a partir de algunos índices que consideran las variaciones de reflectancia espectral (Rousse *et al.*, 1973; Viña *et al.*, 2004; Ciganda *et al.*, 2008; Nguy Robertson *et al.*, 2012; Carmona *et al.*, 2015).

Se ha encontrado que el perfil de clorofila puede ser sensible a algunas prácticas de manejo agronómico como la densidad de plantas y el nivel de fertilización (Díaz, 2015, Irigoyen *et al.* 2015) y es de interés evaluar si la presencia de residuos en superficie por cultivos de cobertura previos al maíz provoca en los canopeos variaciones en la distribución vertical de la clorofila y en la respuesta espectral. En ocasiones, se emplea el nivel de clorofila en la hoja de la espiga (Ciganda *et al.*, 2009) o en la porción superior del canopeo (Gitelson *et al.*, 2005) para predecir el contenido total en el canopeo.

El objetivo del presente trabajo es caracterizar atributos de la estructura y de la funcionalidad del canopeo en el momento de máximo desarrollo del cultivo de maíz bajo diferentes condiciones de disponibilidad de agua y nitrógeno, en manejos con y sin cobertura de la superficie por residuos vegetales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio y condiciones de cultivo

El ensayo fue conducido durante la campaña agrícola 2015-16 en Balcarce (-37°45', 58°18' W; 130 m snm) sobre un Argiudol típico de 1,7 m de profundidad. Los tratamientos evaluados incluyeron la combinación de (i) dos niveles de disponibilidad de agua (con riego, R y secano, S), (ii) dos tipos de cobertura (sin cobertura, Conv, y suelo con un cultivo de cobertura previo CC), y (iii) dos niveles de fertilización nitrogenada (0, N0 y 200 kg N ha⁻¹, N1).

El 27 de mayo se realizó la siembra del cultivo de cobertura compuesto por vicia (*Vicia villosa* Roth.) y avena (*Avena sativa* L.), con una densidad de 34 kg ha⁻¹ para cada uno de los componentes de la mezcla. La emergencia del CC fue el 8 de junio y se le permitió crecer hasta el 7 de octubre (*i.e* aproximadamente 20 días antes de la siembra del maíz), momento en el que se realizó el matado químico (con glifosato a la dosis de 4 l ha⁻¹). Posteriormente, se picó mecánicamente la cobertura y se determinó el rendimiento en materia seca (827 y 673 kg ha⁻¹ para avena y vicia, respectivamente).

Un híbrido de maíz de ciclo intermedio (DK692 VT3, MR118) se sembró el 3 de noviembre. Se logró una densidad media de 6,2 plantas m⁻². La fertilización nitrogenada (N1, 200 kg N ha⁻¹) se realizó en el estado de seis hojas desarrolladas (V6).

El riego fue aplicado por goteo manteniendo el agua en el suelo por encima del 50% de agua disponible y se inició el 28 de diciembre, a los 44 y 47 días desde emergencia (DDE) para los tratamientos Conv y CC, respectivamente. El contenido de agua en el suelo fue monitoreado periódicamente, mediante el método gravimétrico (0-0,10 m) y el de dispersión de neutrones (0,1-1,7 m) con equipo Troxler mod.4300. En este caso, se obtuvo la lámina de agua según la calibración de Suero y Travasso (1988). La disponibilidad de agua en el suelo fue expresada como porcentual según la expresión:

$$AD (\%) = (Alm - Alm_{Lmin}) / AD \times 100 \quad (1)$$

Siendo Alm (mm) el almacenaje de agua en el suelo en la fecha en cuestión, Alm_{Lmin} (mm) el almacenaje al límite mínimo o punto de marchitez y AD (mm) el agua disponible.

Determinaciones a campo de atributos del canopeo

En el estado de tres hojas desarrolladas (V3) se marcaron cinco plantas consecutivas en cada sub-subparcela y, a partir de ese momento, las determinaciones fenométricas y fenológicas fueron realizadas semanalmente sobre 15 plantas para cada tratamiento.

Se seleccionó el estado de aparición de la inflorescencia masculina (VT) para caracterizar la estructura y funcionalidad del canopeo, dada su importancia en el momento crítico para la definición del rendimiento en maíz.

Fueron evaluados los tratamientos de acuerdo con: a) número total de hojas (NTH), b) altura de inserción de la lígula de la última hoja expandida

(AUL) medida desde superficie, c) altura final (Afin) medida desde la superficie del suelo al tope del canopeo, d) índice de área foliar verde (IAFV) y e) índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

El área foliar verde por planta (AFV) fue determinada mediante la integración del área de hojas individuales, que a su vez fue estimada mediante un modelo multiplicativo entre longitud, ancho máximo de la lámina y un factor constante (0,75) atribuido a la forma de la hoja. El IAFV fue determinado ajustando con la densidad de 6,2 plantas m^{-2} .

Para describir el efecto de los tratamientos sobre la distribución vertical de los atributos en el estado VT se representaron perfiles con base en la altura relativa de inserción de cada hoja verde en relación con la altura de inserción de la última hoja desarrollada (AUL) en cada canopeo:

- Perfil de distribución del AFV (cm^2) de cada hoja verde presente.
- Perfil de distribución de unidades de clorofila foliar provenientes de las determinaciones con SPAD-502 meter (Minolta, Illinois, USA), realizadas en la porción media de la lámina de cada hoja verde presente. Valores menores a 50 unidades SPAD, indican que se encuentra comprometido el rendimiento del cultivo (Sainz Rozas y Echeverría, 1998).
- Perfil de distribución de unidades funcionales obtenido a partir del producto de unidades SPAD x área foliar de cada hoja verde presente.

En el eje vertical de esos tres perfiles, el valor máximo 1 representa la altura normalizada de inserción de la última hoja desarrollada en cada tratamiento. Las hojas que mostraban senescencia completa (0% de área foliar verde) no se consideraron para la representación.

Se construyó un perfil adimensional para caracterizar la uniformidad de la distribución vertical de atributos funcionales. En el eje vertical de ese perfil, el valor 1 representa la altura normalizada de inserción de la última hoja desarrollada en cada tratamiento. En el eje horizontal de ese perfil, el valor 1 representa la integración de los atributos funcionales (desde el tope hacia la base del canopeo) normalizada por el valor máximo en cada tratamiento. La línea 1:0 representa una distribución homogénea de los atributos de funcionalidad desde el tope (altura relativa=1) hasta la base (altura relativa=0).

También se seleccionó el estado de aparición de la inflorescencia masculina (VT) para describir el NDVI en el estado de desarrollo máximo del cul-

tivo. La reflectancia del canopeo se determinó con espectroradiómetro de campo portátil JAZ (Ocean Optics, Dunedin, FL) entre las 10:00 y las 14:00 horas y en condiciones de cielo descubierto. La calibración de cada una de las mediciones fue realizada usando superficies de reflectancia máxima (blanco) y mínima (negro). La máxima reflectancia se determinó mediante el empleo de una superficie estándar de reflectancia difusa (Ocean Optics WS-1) y la mínima reflectancia se obtuvo mediante el cierre de la entrada de luz a la fibra óptica. El sensor (visible-infrarrojo cercano) se colocó manteniendo una distancia de 0,50 m sobre la superficie. Los espectros fueron obtenidos mediante la conexión del espectroradiómetro de campo y el software SpectraSuite (Ocean Optics, Dunedin FL). El NDVI se calculó a partir de las mediciones de la reflectancia en el rango de luz roja (entre 0,6 y 0,7 μm) e infrarrojo cercano del espectro (entre 0,7 y 1,1 μm), de acuerdo con Rouse *et al.* (1973). La aparición de las inflorescencias masculinas en la parte superior del canopeo en el estado VT no afecta sensiblemente el NDVI en el máximo desarrollo del cultivo, ya que modifica en forma similar la reflectancia en el numerador y en el denominador del índice (Viña *et al.*, 2004). Se ajustó una relación no lineal entre el índice de vegetación NDVI y el índice de área foliar verde del canopeo (a escala de parcela= 24 puntos; 8 tratamientos y 3 repeticiones).

Diseño experimental y análisis de datos

Los tratamientos fueron distribuidos en un diseño con parcelas sub-subdividas con tres repeticiones, con los niveles de disponibilidad de agua (S y R) en las parcelas principales, los niveles de cobertura en las subparcelas (Conv y CC) y los niveles de fertilización nitrogenada (N0 y N1) en las sub-subparcelas. Cada sub-subparcela incluía 6 hileras de 12 m de extensión distanciadas entre sí a 0,70 m.

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) previa evaluación de la homogeneidad de varianza (Littell *et al.*, 1996) empleando el procedimiento PROC MIXED del paquete SAS (SAS/IML® 14.1, 2015) para testear los efectos de la disponibilidad de agua (A), cobertura de la superficie (C) y fertilización nitrogenada (N) y sus interacciones en los atributos del canopeo. Cuando las interacciones fueron significativas se aplicó test de contrastes para comparar los valores medios (con nivel de significancia 0,05).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estado VT se alcanzó a los 70 días desde siembra (DDS) bajo siembra convencional (Conv) y entre los 78 y 80 DDS con cobertura (CC). En la Figura 1 se muestra la evolución del agua en el suelo hasta aproximadamente los 80 días desde siembra (cuando todos los tratamientos alcanzaron el estado VT). Los tratamientos S exhibían una condición más limitante en la disponibilidad de agua para el cultivo (0,32 a 0,40 de la fracción de agua disponible, FAD) que los tratamientos R (0,53 y 0,74 de FAD). La lámina de riego aplicada hasta VT alcanzó 158 mm para RConv y 194 mm para los tratamientos RCC.

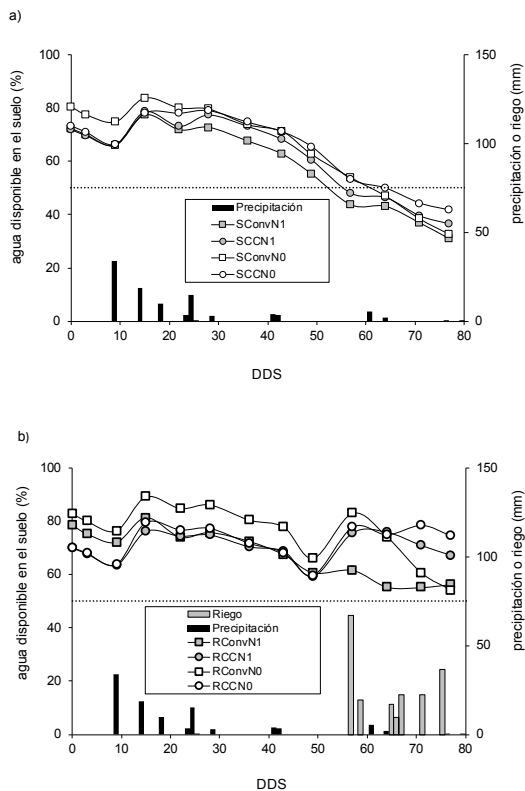


Figura 1. Evolución del agua en el suelo bajo cultivo de maíz desde siembra (DDS) al momento de aparición de la inflorescencia masculina (VT) con manejos contrastantes de agua y nitrógeno, con y sin cultivo de cobertura previo (Balcarce, campaña agrícola 2015-2016). a. secano (S). b. bajo riego (R). CC: con cultivo de cobertura, Conv: siembra convencional, N0: sin fertilización nitrogenada, N1: fertilización nitrogenada en estado V6. La línea punteada representa el nivel de 50 % de agua disponible.

En la Tabla 1 se muestran los atributos observados en panojamiento. La altura del canopeo (AUL y Afin) fue menor en CC (en cada nivel de disponibilidad de agua). El número de hojas no fue afectado

por los tratamientos de fertilización (N0 y N1) para un mismo nivel de disponibilidad de agua, en concordancia con lo reportado en la literatura (Lemcoff y Loomis, 1986; Muchow y Davis, 1988). Los efectos de CC fueron más evidentes en el tamaño final alcanzado en las hojas que en el número total de hojas desarrolladas (NTH). El IAFV del canopeo de maíz con cultivo de cobertura previo a la siembra (CC) fue 0,57 del IAFV en siembra convencional (Conv), independientemente si fue o no fertilizado y de la condición hídrica (R o S).

Tabla 1. Número total de hojas (NTH), altura de inserción de la lígula de la última hoja expandida (AUL), altura final de la planta (Afin), índice de área foliar verde (IAFV) al momento de aparición de la inflorescencia masculina (VT) en maíz bajo manejos contrastantes en disponibilidad de agua y nitrógeno, con y sin cultivo de cobertura previo.

Agua	Cobertura	Nitrógeno	NTH *	AUL (m) *	Afin (m) *	IAFV (m ² m ⁻²) *
R	CC	N0	20,2 b	1,52 B	1,88 b	2,82 B
		N1	19,9 b	1,53 B	1,90 b	2,86 B
	Conv	N0	21,0 a	1,80 A	2,13 a	4,68 A
		N1	21,0 a	1,72 A	2,10 a	4,86 A
S	CC	N0	20,6 b	1,27 b	1,61 b	2,51 b
		N1	20,6 b	1,25 b	1,59 b	2,47 b
	Conv	N0	21,3 a	1,61 a	1,99 a	4,51 a
		N1	21,1 a	1,57 a	2,00 a	4,48 a

* Interacción Agua x Cobertura x Nitrógeno no significativa ($p > 0,05$). Letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre coberturas, a través del nivel de disponibilidad de agua y nitrógeno. Letras mayúsculas y minúsculas iguales en una misma columna indican diferencias no significativas entre coberturas a través de niveles de nitrógeno, para un mismo nivel de disponibilidad de agua.

R: riego, S: secano, CC: con cultivo de cobertura, Conv: siembra convencional, N0: sin fertilización nitrogenada, N1: fertilización nitrogenada en estado V6.

Los canopeos de maíz bajo siembra convencional mostraron mayores índices de vegetación (i.e NDVI). Cabe destacar que los canopeos del manejo sin residuos en superficie (Conv), tanto cuando se desarrollaron bajo riego como en secano, exhibieron índices que se ubicaron en el plateau de la relación con el índice de área foliar verde (Figura 2), mientras que los canopeos de maíz siguiendo al CC estuvieron en la porción creciente de la curva. Algunas funciones que han sido empleadas anteriormente para relacionar NDVI y área foliar verde en maíz son del tipo no lineal, con una asíntota alrededor de valores de 0,7 y sin variaciones por encima de los 4 m² m⁻² de IAFV (Nguy-Robertson *et al.*, 2012). Los datos obtenidos en el rango de condiciones de manejo del presente trabajo muestran un ajuste semejante.

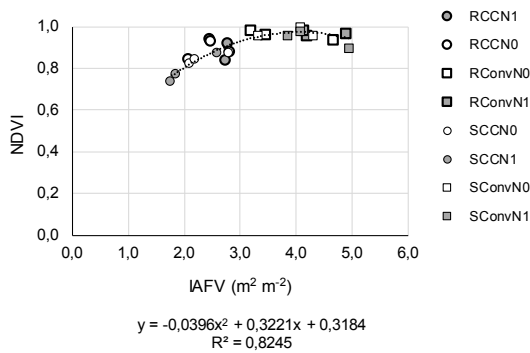


Figura 2. Relación entre el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de área foliar verde (IAFV) en el momento de aparición de inflorescencia masculina (VT) en maíz bajo manejos contrastantes en disponibilidad de agua y nitrógeno, con y sin cultivo de cobertura previo (escala de parcela).

En la Figura 3 se representa la distribución vertical del AFV para los tratamientos evaluados con un comportamiento diferente entre el cultivo con riego y sin riego con curvas en forma de campana similares a las descritas en la literatura (Keating y Wafula, 1992; Dwyer y Stewart, 1996; Boedhrum *et al.*, 2001; Corral, 2016). Se observó que la mayor reducción en el área foliar en los tratamientos RCC ocurrió en la porción media del canopeo, que corresponde a las hojas de mayor tamaño potencial (Birch *et al.*, 2003; Maune, 2014; Corral, 2016), mientras que en secano la reducción ocurrió desde la porción inferior del canopeo, indicando que el efecto de falta de agua sobre la generación de área foliar se manifestó desde las primeras hojas desarrolladas. Además, el progreso de la senescencia en VT fue más evidente en manejos CC, con 7 u 8 completamente inertes en la mitad inferior, quedando apenas 4 o 5 hojas que aportan área foliar activa fotosintéticamente en esa porción de canopeo.

Los canopeos bajo siembra convencional, que exhibieron mayor IAFV también exhibieron mayor contenido de clorofila en la mayoría de las hojas (Figura 4). Los perfiles de clorofila en hoja fueron diferentes entre coberturas de la superficie (CC vs. Conv), pero no entre los niveles de fertilización (N0 vs. N1). Los canopeos de maíz sin cultivo de cobertura previo (Conv) exhibieron de 8 a 10 hojas sin limitaciones nutricionales (50 a 60 unidades SPAD), de acuerdo con lo descrito por Sainz Rozas y Echeverría (1998). Por su parte, con riego y con manejo convencional (N0 y N1) se observó una menor variabilidad en las unidades SPAD, especialmente en la mitad inferior del canopeo. La fertilización con N no modificó el perfil de unidades SPAD, excepto para maíz siguiendo a CC y bajo riego.

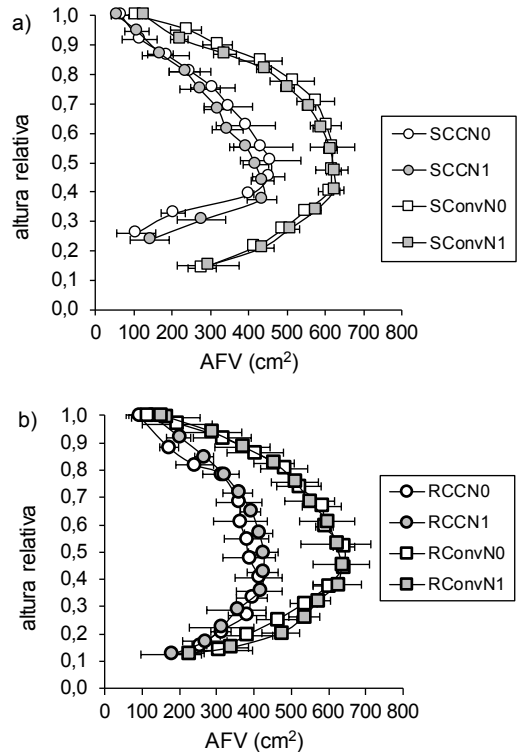


Figura 3. Perfil medio de distribución de área foliar verde (AFV) con la altura relativa del canopeo en el momento de aparición de inflorescencia masculina (VT) en maíz bajo manejos contrastantes en disponibilidad de agua y nitrógeno, con y sin cultivo de cobertura previo. a. secano (S). b. bajo riego (R). CC: con cultivo de cobertura, Conv: siembra convencional, N0: sin fertilización nitrogenada, N1: fertilización nitrogenada en estado V6. La altura relativa indica la altura de inserción de cada hoja verde en relación con la altura de inserción de la última hoja desarrollada en el canopeo. Se indica con barra horizontal el error estándar.

En la Figura 5 se muestra el perfil de distribución de los atributos funcionales (producto de unidades SPAD x área foliar verde) para los tratamientos evaluados, distinguiéndose más claramente una curva en forma de campana con máximos en la porción media del canopeo en los tratamientos sin cultivo de cobertura (Conv). Esa forma típica de distribución vertical puede observarse desde los estados vegetativos hasta VT (Dwyer y Stewart, 1986; Keating y Wafula, 1992; Valentinuz y Tollenaar, 2006; Corral, 2016) y luego puede progresar en forma diferente de acuerdo con los tratamientos (Ciganda *et al.*, 2008; Díaz, 2015; Corral, 2016). En general, las hojas próximas a la espiga (parte central del canopeo) mantienen las tasas de fotosíntesis y se tornan senescentes más lentamente que las de la porción superior o inferior del canopeo (Dwyer y Stewart, 1986).

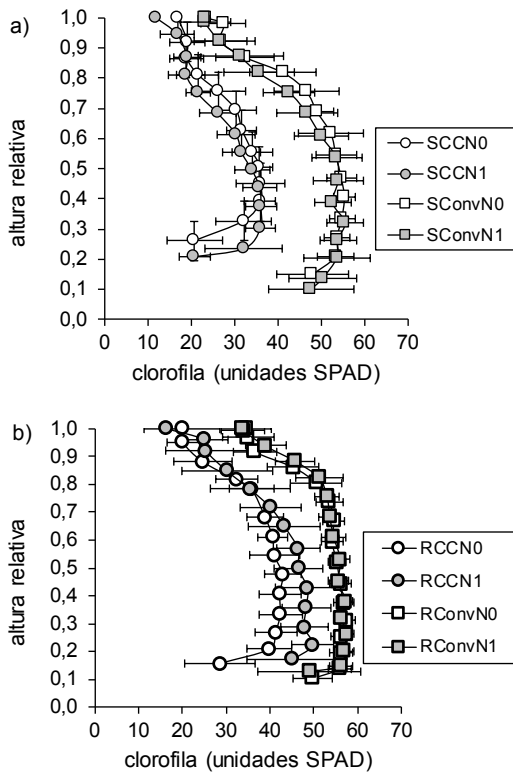


Figura 4. Perfil de distribución de clorofila (unidades SPAD) con la altura relativa del canopeo en el momento de aparición de inflorescencia masculina (VT) en maíz bajo manejos contrastantes en disponibilidad de agua y nitrógeno, con y sin cultivo de cobertura previo. a. secano (S). b. bajo riego (R). CC: con cultivo de cobertura, Conv: siembra convencional, N0: sin fertilización nitrogenada, N1: fertilización nitrogenada en estado V6. Se indica con barra horizontal el error estándar. La altura relativa indica la altura de inserción de cada hoja verde en relación con la altura de inserción de la última hoja desarrollada en el canopeo.

La inclusión de CC redujo la funcionalidad del canopeo respecto al manejo Conv y ese efecto fue mayor en condiciones de secano. Además de un perfil diferente entre manejo CC y Conv (tanto con adecuada o baja disponibilidad de agua) y que es resultante de la integración de las Figuras 3 y 4, se puede describir la distribución relativa de la funcionalidad dentro de cada canopeo (Figura 6). En la forma propuesta en este trabajo, es posible distinguir una menor funcionalidad en la porción superior del canopeo en secano (CC y Conv), mientras que los manejos bajo riego (independientemente del tratamiento de cobertura) exhibieron una distribución más uniforme de la funcionalidad del canopeo.

A partir de la descripción de una distribución no uniforme a través del canopeo de los atributos

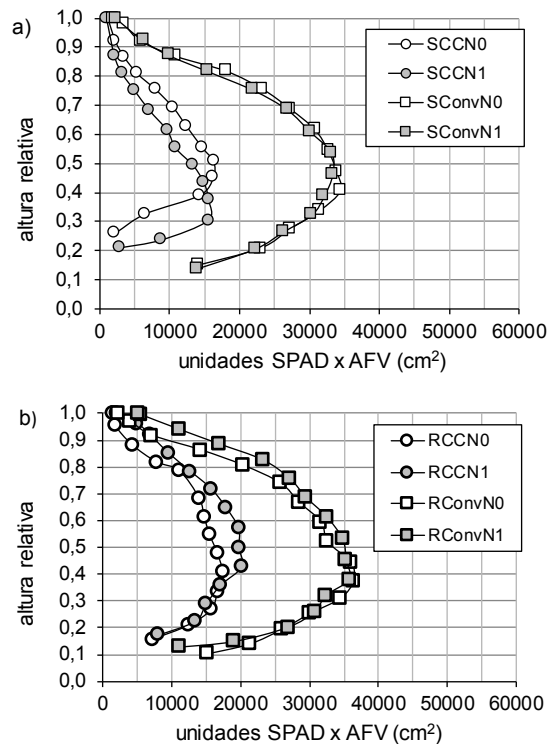


Figura 5. Perfil de distribución de unidades funcionales (unidades SPAD x área foliar verde) con la altura relativa del canopeo en el momento de aparición de inflorescencia masculina (VT) en maíz, bajo manejos contrastantes en disponibilidad de agua y nitrógeno, con y sin cultivo de cobertura previo. a. secano (S). b. bajo riego (R). CC: con cultivo de cobertura, Conv: siembra convencional, N0: sin fertilización nitrogenada, N1: fertilización nitrogenada en estado V6. La altura relativa indica la altura de inserción de cada hoja verde en relación con la altura de inserción de la última hoja desarrollada en el canopeo.

funcionales, se entiende que la aplicación de modelos de estimación de la clorofila total a partir del contenido medido exclusivamente en las hojas de la parte superior del canopeo y del área foliar total, como el propuesto por Gitelson *et al.* (2005), podría distorsionar el resultado para el estado de desarrollo máximo bajo condiciones limitantes de agua.

La interpretación de las relaciones entre agua disponible, área foliar funcional (área foliar verde más nivel de clorofila) e índices de vegetación, determinados bajo diferentes manejos agronómicos y en forma secuencial durante la estación completa del cultivo, posibilitará la implementación de índices agrometeorológicos de predicción de rendimiento.

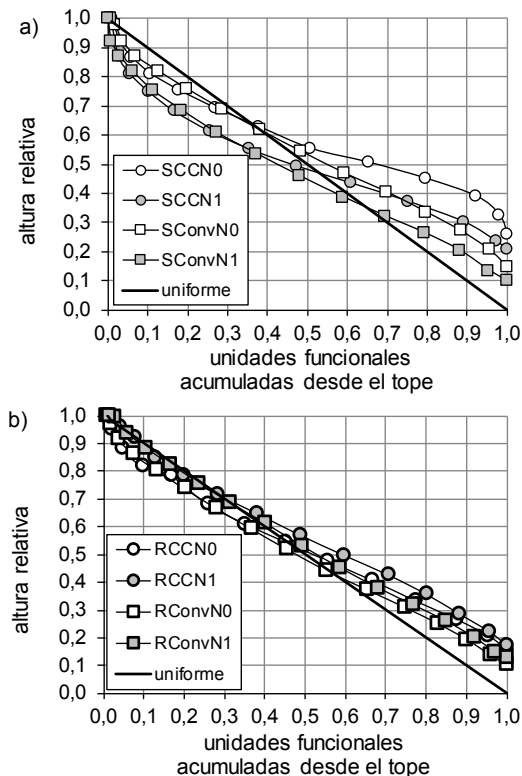


Figura 6. Perfil normalizado de unidades funcionales (unidades SPAD x área foliar verde) acumuladas desde el tope del canopeo y expresadas respecto al valor máximo observado en cada tratamiento en el momento de aparición de inflorescencia masculina (VT) en maíz, bajo manejos contrastantes en disponibilidad de agua y nitrógeno, con y sin cultivo de cobertura previo. a. seco (S). b. bajo riego (R). CC: con cultivo de cobertura, Conv: siembra convencional, N0: sin fertilización nitrogenada, N1: fertilización nitrogenada en estado V6. La altura relativa indica la altura de inserción de cada hoja verde en relación con la altura de inserción de la última hoja desarrollada en el canopeo.

CONCLUSIONES

En este estudio se caracterizó la influencia de la inclusión de un cultivo de cobertura sobre atributos estructurales y funcionales del canopeo de maíz (*i.e.* área foliar verde, unidades de SPAD y unidades funcionales) en un momento crítico para la definición del rendimiento (*i.e.* panojamiento) y en condiciones de agua contrastante en el suelo. Se demostró que la presencia de un cultivo de cobertura modifica la estructura del canopeo y reduce su funcionalidad, en cualquier condición de agua en el suelo; aunque las disminuciones son mayores en condiciones de agua limitante (*i.e.* tratamientos en seco) que en condiciones sin restricciones de agua (*i.e.* tratamientos regados). En este sentido, en condiciones de agua no limitante,

la mayor reducción del área foliar por efecto de la cobertura ocurre en la porción media del canopeo; mientras que, en condiciones de agua limitante, la disminución en el área foliar se evidencia desde la porción inferior. La distribución vertical de las unidades funcionales (unidades SPAD de clorofila x área foliar verde) es más uniforme dentro del canopeo sin restricciones de agua que en condiciones de agua limitante.

Se presume que estos cambios en los atributos funcionales y estructurales del canopeo de maíz, asociados a la presencia de un cultivo de cobertura, resulten en reducciones de la interceptación y de la eficiencia en el uso de la radiación fotosintéticamente activa, razón por la cual el cultivo de cobertura disminuiría la producción de biomasa del cultivo de maíz. Futuros trabajos deberían evaluar los elementos y factores que influyen en el manejo con cultivo de cobertura (*e.g.* temperatura del suelo y del aire, humedad del suelo, contenido de nutrientes) y que pueden contribuir a explicar la respuesta de los atributos estructurales y funcionales de maíz subsiguiente, con el fin de orientar prácticas de manejo (*i.e.* fecha de secado del cultivo de cobertura, densidad de plantas y espaciamiento entre hileras de maíz, fertilización del cultivo de cobertura y del maíz) para promover un incremento o el mantenimiento de la producción ante la inclusión de un cultivo de cobertura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP) que ha provisto la financiación del presente trabajo en el marco del proyecto "Atributos biofísicos y estructurales del canopeo en maíz" (UNMdP-AGR505/16). A. Irigoyen y R. Rivas son investigadores de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC). L. Echarte es investigadora del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet). M. I. Bayala es personal de apoyo de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC).

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, F.H.; Cirilo, A.; Uhart, S.y M.E. Otegui, 1996. *Ecofisiología del cultivo de maíz*. DekalbPress. Balcarce, Argentina. 292 p.
- Birch, C.J.; Thornby D.; Adkins S.; Andrieu B. and J. Hanan, 2008. Architectural modelling of maize under water stress. *Australian J. of Exp. Agriculture* 48: 335-341.

- Birch, C.J.; Vos, J. and P.E.L. Van Der Putten, 2003. Plant development and leaf area production in contrasting cultivars of maize grown in a cool temperate environment in the field. *European Journal of Agronomy*. 19: 173-188.
- Boedhram, N.; Arkebauer, T.J. and W.D. Batchelor, 2001. Season-long characterization of vertical distribution of leaf area in corn. *Agronomy Journal* 93:1235-1242.
- Carmona, F.; Rivas, R. and D. Fonnegra, 2015. Vegetation Index to estimate chlorophyll content from multispectral remote sensing data. *European Journal of Remote Sensing* 48: 319-326.
- Clark, A. 2012. *Managing crop cover profitability*. 3th ed. United Book Press, USA., 244 p.
- Ciganda, V.; Gitelson, A. and J.S. Schepers, 2008. Vertical profile and temporal variation of chlorophyll in maize canopy: quantitative "crop vigor" indicator by means of reflectance-based techniques. *Agronomy Journal* 100: 409-417.
- Ciganda, V.; Gitelson, A. and J. Schepers, 2009. Non-destructive determination of maize leaf and canopy chlorophyll content. *Journal of Plant Physiology* 166: 157-167.
- Corral, A. 2016. Densidad de plantas y estructura del canopeo de maíz. Tesis de graduación. UNMdP, Balcarce, Argentina. 54 p.
- Díaz, V. 2015. Área foliar verde y estructura del canopeo en el cultivo de maíz bajo sistemas con diferente grado de intensificación en la producción de granos. Tesis de graduación. UNMdP, Balcarce, Argentina. 42 p.
- Dwyer, L.M. and D.W. Stewart, 1986. Leaf area development in field-grown maize. *Agronomy Journal* 78:334-343.
- Dwyer, L.M.; Stewart, R.I. Hamilton, R.I. and L. Houwing, 1992. Ear position and vertical distribution of leaf area in corn. *Agronomy Journal* 84:430-438.
- Gitelson, A. A., Viña, A.; Verma, S.B.; Rundquist, D.C.; Arkebauer, T.J.; Keydan, G.; Leavitt, B.; Ciganda, V.; Burba, G.G. and A.E. Suyker, A.E. 2006. Relationship between gross primary production and chlorophyll content in crops: Implications for the synoptic monitoring of vegetation productivity. *Journal of Geophysical Research* 111, D08S11, doi:10.1029/2005JD006017.
- Keating, B.A and B.M. Wafula, B.M. 1992. Modelling the fully expanded area of maize leaves. *Field Crops Research* 29:163-176.
- Irigoyen, A.; Corral, A.; Díaz, V.N. and L. Echarte. 2015. Chlorophyll leaf profile and light attenuation during reproductive stages of maize as affected by plant population. In: de Campos, A.B.; Gabriels, D. and Deyanira, L.L. (ed.) *Impacts of Agroecosystems on Environment*. CH. I. Environmental sustainability of agrosystems: 23-28. UNESCO Chair of Eremology, Ghent University, Belgium and International Centre of Eremology (ICE), Ghent University, Belgium.
- Lemcoff, J.H. and R.S. Loomis, 1986. Nitrogen influences on yield determination in maize. *Crop Science* 26: 1017-1022.
- Littell, R. C.; Milliken, G. A.; Stroup, W. W.; R.D. Wolfinger. 1996. *SAS System for Mixed Models*. SAS Institute Inc.: New York. 633 p. Maddonni, G.A.; Otegui, M.E. and A.G. Cirilo, 2001. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize architecture and light attenuation. *Field Crops Research* 71: 183-193.
- Maune, C. 2014. Fechas de siembra y desarrollo del área foliar pre-antesis en híbridos de maíz de diferente madurez relativa. Tesis de graduación, UNMdP, Balcarce, Argentina. 46 p.
- Muchow, R. and R. Davis, 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semiarid tropical environment. *Field Crop Research* 18: 17-30.
- Murungu, F.S.; C. Chiduzza, C. and P. Muchaonyerwa, 2011. Effects of relay inter-cropping summer cover crops with maize on cover crop biomass and maize yields in a warm-temperate region of South Africa, *South African Journal of Plant and Soil* 28:2, 147-150
- Nguy-Robertson, A.; Gitelson, A.; Peng, Y.; Viña, A.; Arkebauer, T. and D. Rundquist, 2012. Green leaf area index estimation in maize and soybean: combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. *Agronomy Journal* 104: 1336-1347.
- Norman, J.M. and G.S. Campbell, 1989. Canopy structure. In: Percy, R.W., Ehleringer, J. R., Rundel, P.W. (ed.) *Plant Physiological Ecology*, Springer, Netherlands, p. 301-325.
- Restovich, S. B.; Andriulo, A.E and S.I. Portela, 2012. Introduction of cover crops in a maize-soybean rotation of the Humid Pampas. *Field Crops Research* 128: 62-70.
- Rouse J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A. and D. Deering, 1973. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *Prog. Rep. RSC 1978-1*. Remote Sensing Cent., Texas A&M Univ., College Station.
- Sainz Rozas, H. and H.E. Echeverría, 1998. Relación entre las lecturas del medidor de clorofila (Minolta SPAD 502) en distintos estadios del ciclo del cultivo de maíz y el rendimiento del grano. *Revista de Facultad de Agronomía de La Plata*. 103: 37-44.
- SAS University Edition. 2015. *SAS/IML® 14.1 User's Guide*. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Stone, P.J.; Sorensen, I.B. and P.D. Jamieson, 1999. Effect of soil temperature on phenology, canopy development, biomass and yield of maize in a cool temperate climate. *Field Crops Research* 63:169-178.

- Tardieu, F.; Reymond, M.; Hamard, P.; Granier, C. and B. Muller, 2000. Spatial distributions of expansion rate, cell division rate and cell size in maize leaves. *Journal of Experimental Botany* 51: 1505-1514.
- Suero, E.E. y M.I. Travasso, 1988. Determinación de humedad y densidad de suelos. Métodos de radiación. Actas de XII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Corrientes.
- 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.
- Viña, A.; Gitelson, A.; Rundquist, D.C.; Keydan, D.; Leavitt, B. and J. Schepers, 2004. Monitoring maize (*Zea mays* L.) phenology with remote sensing. *Agronomy Journal* 96: 1139-1147.