

# Rendimiento potencial de maíz en los valles de Norpatagonia: una aproximación desde los modelos de simulación

**L. Reinoso<sup>ab</sup>, R.S. Martínez<sup>ab</sup>, J. Mercou<sup>c</sup>, M. Gutierrez<sup>d</sup> y M.E. Otegui<sup>e</sup>.**

<sup>a</sup> EEA INTA Valle Inferior del Rio Negro. <sup>b</sup> Universidad Nacional de Rio Negro. <sup>c</sup> Agencia De Extensión Rural INTA San Luis. <sup>d</sup> Sistema Chacras AAPRESID. <sup>e</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) en EEA Pergamino (INTA), Facultad de Agronomía Universidad de Buenos Aires, Argentina.

## RESUMEN

Este trabajo explora, mediante el uso de modelos de simulación agronómicos, estrategias para alcanzar altos rendimientos en el cultivo de maíz en las condiciones agroecológicas de los valles irrigados del norte de la Patagonia Argentina. Se pudo determinar así que la principal restricción a la productividad potencial del maíz en la zona estudiada es la ocurrencia de heladas tardías, que no harían aconsejable el adelantamiento de la siembra a fechas anteriores al 15-Oct. Las temperaturas bajas, además, provocan retrasos muy importantes en la emergencia del cultivo (más de 15 días) para siembras en primera quincena de Octubre. El retraso de la fecha de siembra más allá de los primeros días de Diciembre puede provocar que las heladas tempranas ocasionen la terminación abrupta del llenado del grano en un número importante de años. Sin restricciones hídrico-nutricionales, y utilizando una densidad de plantas que garantice alcanzar un 95% de intercepción de luz poco antes de la floración, con siembras durante la segunda quincena de Octubre se podrían lograr rendimientos entre 15000 y 17000 kg ha<sup>-1</sup> en el 75% de los años. La penalización al rendimiento no sería muy importante con el atraso de la fecha de siembra hasta el 15-Nov (14000 y 16000 kg ha<sup>-1</sup> en el 75% de los años). Con siembras de primera quincena de diciembre el rendimiento cae muy marcadamente (8700 a 11000 kg ha<sup>-1</sup> en el 75% de los años). Experimentos a campo corroboran estas estimaciones, pero alertan sobre las altas dosis de nitrógeno necesarias y, consecuentemente, el ajuste del manejo de la fertilización.

## Introducción

Los valles de la Norpatagonia presentan condiciones agroclimáticas aptas para la producción de maíz bajo riego. Por un lado, el periodo libre de heladas es suficientemente largo para la realización del cultivo. Por otro, la combinación de alta radiación solar (heliofania) con temperaturas medias bajas da lugar a relaciones fototermales elevadas, que ofrecen un marco productivo favorable para lograr altos niveles de producción (Andrade *et al.*, 1996).

La intensificación de la producción implica la incorporación de tecnologías y el desarrollo de estrategias de manejo para incrementar los rendimientos por unidad de superficie, haciendo un uso más eficiente de los recursos que necesita el cultivo para producir (radiación, agua, nutrientes), pero al mismo tiempo reduciendo los efectos negativos

sobre el ambiente (Salvagiotti *et al.*, 2009). A la hora de diseñar estrategias de manejo para maximizar el rendimiento en las condiciones agroecológicas de los valles irrigados Norpatagónicos es necesario conocer la brecha entre rendimiento real y potencial y qué opciones existen de acortar esa brecha.

El rendimiento potencial de un cultivo puede definirse como el rendimiento obtenido por un cultivar adaptado, bajo condiciones ambientales favorables, sin limitaciones de agua y nutrientes, y sin daños ocasionados por plagas o enfermedades (Evans y Fischer, 1999). En estas condiciones, los factores que tienen una marcada influencia sobre el rendimiento del cultivo son la radiación, que constituye la fuerza motriz de la fotosíntesis, y la temperatura, principal condicionante de la longitud del ciclo para realizar fotosíntesis (Andrade *et al.*, 1996). Consecuentemente, la combinación de ambas variables definirá la producción de biomasa total. La proporción de dicha biomasa que se asigne a la producción de grano dependerá fuertemente de las condiciones fototermales durante el período crítico que se extiende por unos 30 días centrados en la floración. Durante dicho período, niveles elevados de radiación solar y amplitud térmica (diferencia entre la temperatura del día y de la noche), combinados con una elevada capacidad de interceptación de luz por parte del cultivo, dan lugar a un aumento en la fijación de granos que determina altos rendimientos de maíz (Cantarero *et al.*, 1999; Barbieri *et al.*, 2002).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar, mediante el uso de modelos de simulación agronómicos, estrategias para alcanzar altos rendimientos en el cultivo de maíz en las condiciones agroecológicas de los valles irrigados del norte de la Patagonia Argentina

## **Oferta Ambiental**

Según los registros históricos (47 años) de la estación agrometeorológica de la EEA INTA Valle Inferior, el valle presenta una temperatura media anual de 14,1 °C y una temperatura máxima media anual de 20,9 °C. En los meses de enero, febrero y diciembre se registran las temperaturas medias más elevadas (Fig. 1a). El período libre de heladas meteorológicas promedia los 170 días, con fecha medias que lo ubican entre el 9 de Abril (tempranas) y el 20 de octubre (tardías). La precipitación media anual es de 408 mm, con variaciones interanuales entre 196 mm (2008) y de 697 mm (2000). Si bien el 65% de las lluvias se concentra en primavera-verano, la distribución no es homogénea, ya que en los meses de diciembre y enero los registros no superan los 65 mm.

El factor principal que determina los niveles elevados de radiación incidente (Figura 1) es la latitud, que afecta principalmente la duración del día y la intensidad de radiación que llega a un determinado lugar. Los valles irrigados de la Norpatagonia se encuentran ubicados entre los 39 y 40° de latitud sur, donde la oferta de radiación es máxima y, debido a su clima semiárido, la incidencia de nubosidad es muy baja respecto a ambientes más húmedos característicos de la zona núcleo maicera (Figura 1b). La combinación de los factores mencionados determina altos valores de heliofanía en Norpatagonia.

## Rendimiento Potencial de Maíz: Resultados de Modelización

Los modelos funcionales de simulación de cultivos son herramientas adecuadas para para estimar la producción potencial e identificar factores limitantes de la producción o para analizar cambios en el manejo de los cultivos, incluida la oferta hídrica. Además de generar escenarios específicos, estos modelos permiten medir la probabilidad y la incertidumbre asociada a esos escenarios y determinar en forma cuantitativa el riesgo asociado a respuestas alternativas. En este trabajo se aplicaron dos modelos, uno ecofisiológico simple y el más desarrollado DSSAT CERES-Maize, para estimar el rendimiento en grano potencial ( $RG_P$ ).

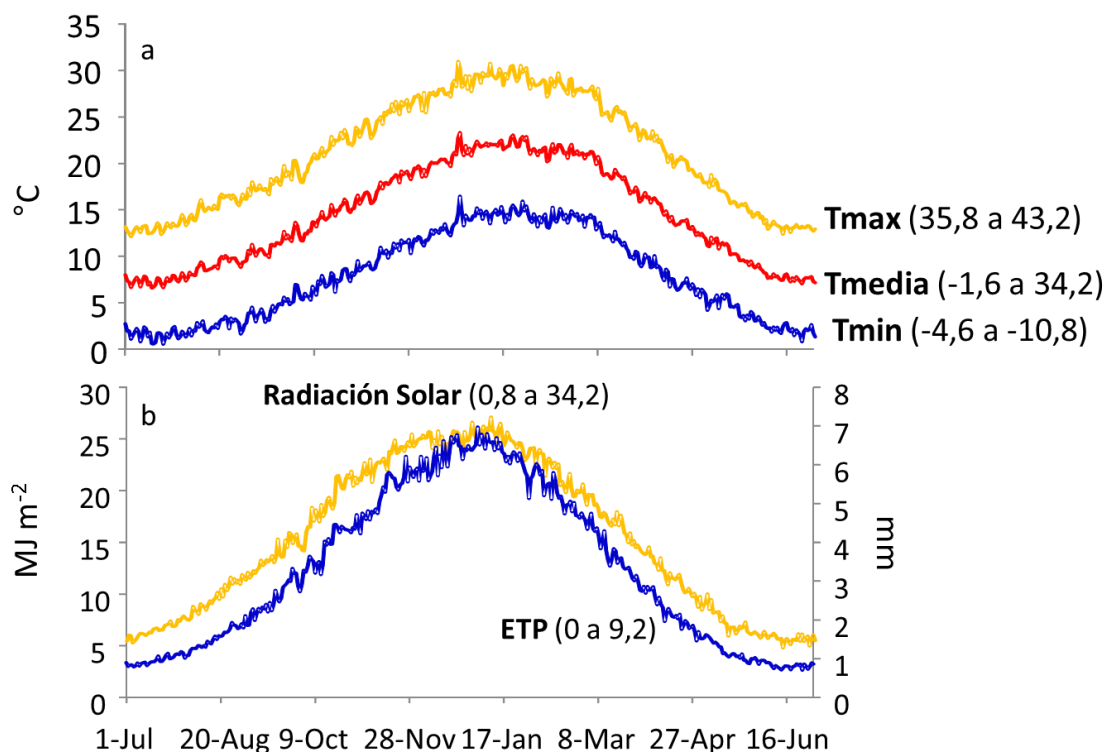


Figura 1. Evolución de (a) las temperaturas máxima ( $T_{max}$ ), mínima ( $T_{min}$ ) y media ( $T_{media}$ ), y (b) la radiación solar y la evapotranspiración potencial (ETP) de la localidad de Viedma ( $40^{\circ}48'S$   $63^{\circ}00'O$ ), Rio Negro. Valores promedio diario de 47 años. Entre paréntesis se indican los valores mínimo y máximo de cada variable registrados para el período analizado.

El modelo ecofisiológico simple utiliza valores diarios de eficiencia de interceptación de luz ( $e_i$ ), obtenidos en forma experimental bajo riego y en densidad óptima, los aplica a los registros de radiación solar incidente de la zona de interés para estimar la cantidad de radiación solar interceptada diaria y, con esta última, estima la biomasa total a partir del producto con la eficiencia en el uso de la radiación (EUR). La duración del ciclo, y consecuentemente la marcha diaria de la  $e_i$ , están definidos por los requerimientos en tiempo térmico (grados día) del híbrido elegido. En este modelo, el valor diario de EUR puede verse modificado por temperaturas subóptimas para la fotosíntesis. Una vez calculada la biomasa, el rendimiento se obtiene mediante el producto de ésta con el

índice de cosecha característico de híbridos modernos de maíz. Un detalle del procedimiento se puede encontrar en Otegui *et al.* (1996).

DSSAT CERES-Maize utiliza una aproximación similar a la del modelo ecofisiológico, sólo que parte de una instancia previa, la de generar un índice de área foliar (IAF) y a partir de él estimar la  $e_i$ . También difiere del modelo ecofisiológico simple en que tanto la expansión como la EUR pueden variar por efecto de la temperatura. La principal diferencia con el modelo ecofisiológico es que CERES-Maize calcula los componentes del rendimiento (Número de granos y peso del grano), lo que puede contribuir a entender un poco mejor qué sucede en diferentes etapas en distintos ambientes. CERES-Maize también puede ser utilizado para el estudio de limitaciones de agua y nitrógeno, pero esto no será tratado por modelización en este trabajo.

Ambos modelos utilizan datos diarios de radiación solar y de temperaturas máximas y mínimas. Para las 46 campañas agrícolas simuladas, los datos fueron obtenidos de la estación del SMN en Viedma, distante a 8 km de la EEA Valle Inferior. Se efectuaron simulaciones cada 15 días a partir del 1-October, en que aún existe un riesgo moderado de heladas tardías.

Los resultados de la simulación de 46 campañas agrícolas permitieron establecer que, en un 75% de los años, siembras del 1-Oct exponen a los cultivos ya emergidos a por lo menos un día con temperaturas inferiores a 0 °C (Figura 2a). En esa fecha de siembra, en el 37% de los años los cultivos experimentarían temperaturas inferiores a -1°C en postemergencia. Con siembras del 1-Oct o anteriores, además, la emergencia de los cultivos se vería excesivamente demorada (> 18 días) en el 50% de los años (Fig. 3a), lo cual promueve una disminución del logro de plantas y consecuentemente la heterogeneidad en el *stand* de plantas. Por otra parte, con siembras posteriores Octubre el llenado del grano se prolonga por disminución de la temperatura durante dicha etapa (Fig. 3b), pero también aumenta el riesgo de daño por heladas en esta etapa (datos no mostrados). Así, las heladas tempranas llegarían a interrumpir anticipadamente el llenado con siembras del 15 de Diciembre o posteriores. En cambio, los días con temperaturas supra-óptimas (máximas por sobre 35°C) que pueden afectar el rendimiento serían similares para las siembras entre el 1-Oct y el 15-Dic (Figura 2b).

La adecuación de la fenología del cultivo a la variación estacional esperable en radiación incidente y temperatura determina la tasa de crecimiento en el período crítico de determinación del número de granos y consecuentemente el rendimiento en grano final. En general, la estrategia consiste en lograr un IAF suficientemente elevado al inicio del período crítico (tendiente a maximizar la  $e_i$ ) y que dicho período coincida con la mejor combinación fototermal para así para maximizar la fijación de granos. Siembras comprendidas entre el 1 y el 15-Oct lograrían ubicar el mayor IAF con la mayor oferta radiativa, posibilitando alcanzar los máximos rendimientos para la zona de estudio (Figura 4). También se observa que para la siembra temprana hay una proporción más larga del ciclo ocupada por prefloración, producto de las temperaturas frescas que retrasan el ritmo de aparición de hojas. En la siembra de Noviembre es más equilibrada la duración de ambas fases. De sembrarse en Diciembre (no graficado) sería proporcionalmente más largo el llenado de los granos que la etapa prefloración, pero dicho llenado ocurriría con radiación solar fuertemente decreciente, originando bajo peso de los granos.

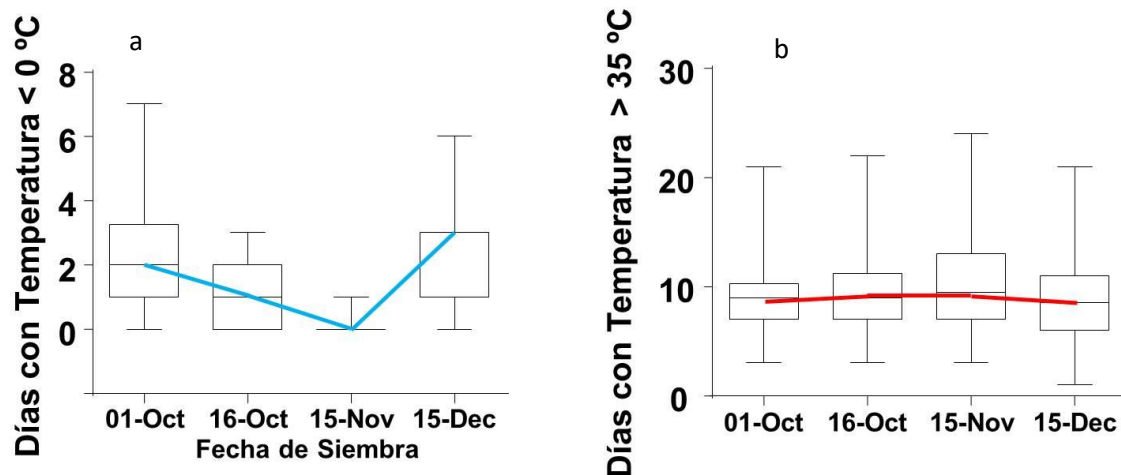


Figura 2. Número de días con temperaturas por debajo de 0 °C (a) y por encima de 35 °C (b) para distintas fechas de siembra. Datos meteorológicos correspondientes a una serie de 47 años para Viedma, Valle Inferior.

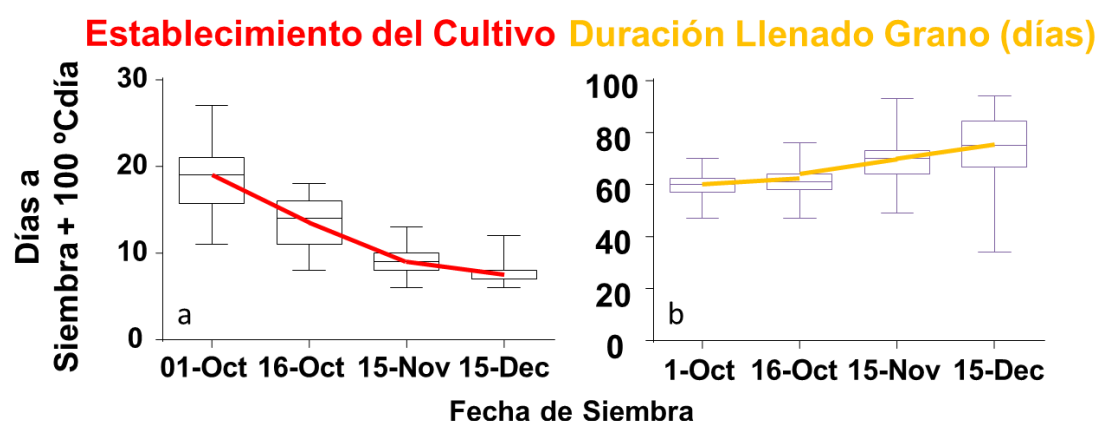


Figura 3. Efecto de la fecha de siembra sobre (a) los días desde la siembra a la emergencia del cultivo (100 °C día), y (b) la duración del llenado de grano.

Dentro del rango de siembras evaluado, y asegurando densidades que permitan obtener el 95% de intercepción de luz en etapas críticas, ambos modelos de simulación predicen rendimientos potenciales similares, con rangos entre 15000-18000 kg/ha para el ecofisiológico (Fig. 5a) y 17500-19000 kg ha<sup>-1</sup> para el CERES-Maize (Fig. 5b). La penalización al rendimiento no sería muy importante con el atraso de la fecha de siembra hasta el 15 de Noviembre, permitiendo un rendimiento en granos entre 14000 y 16000 kg ha<sup>-1</sup> en el 75% de los años. Al analizar los componentes del rendimiento (número y peso de los granos) mediante el modelo CERES-Maize (Fig. 6) se comprobó que ambos se mantienen elevados con siembras hasta el 15-Nov, viéndose sustancialmente reducidos cuando la siembra se atrasa a Diciembre.

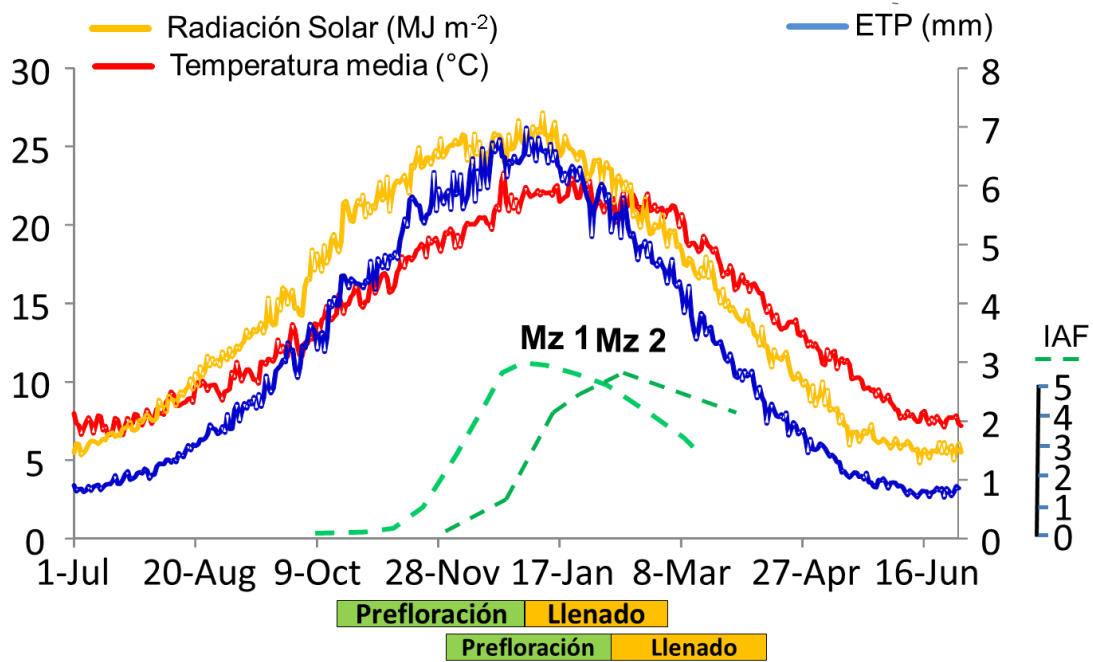


Figura 4. Evolución de la radiación solar (RS), la temperatura media (Tmedia), la evapotranspiración de referencia (ET) y el índice de área foliar (IAF) para fechas de siembra del 1 de Octubre (Mz1) y 15 de Noviembre (Mz 2) en Viedma, Rio Negro.

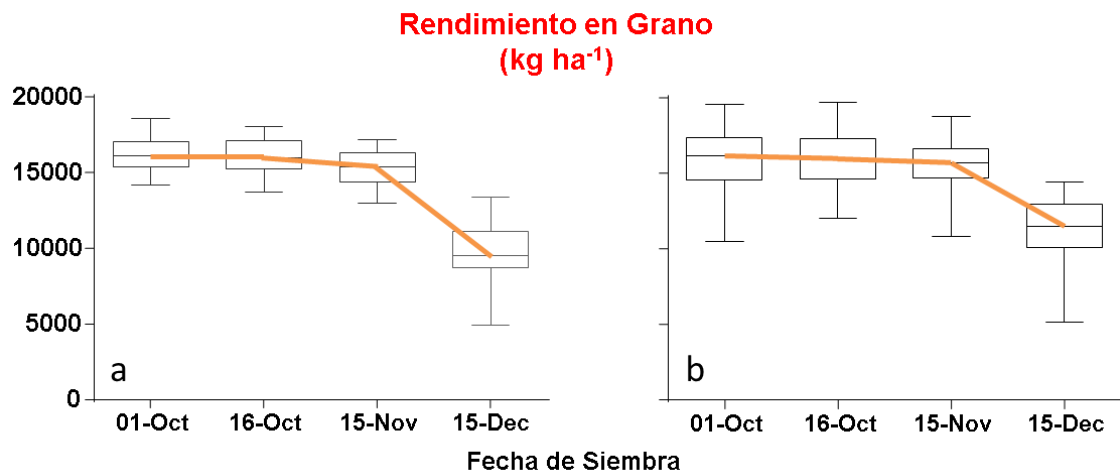


Figura 5. Estimación del rendimiento en grano mediante (a) un modelo ecofisiológico simple y (b) el modelo DSSAT-CERES Maize

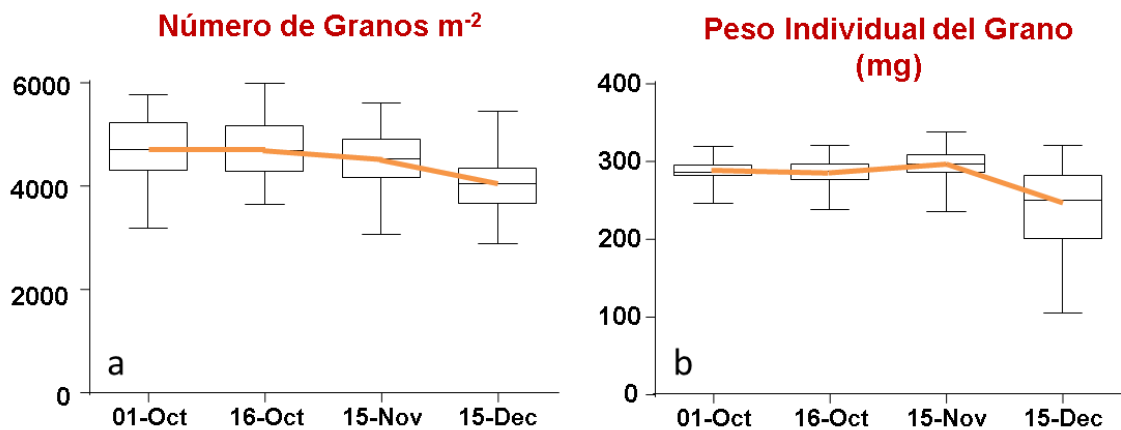


Figura 6. Estimación mediante el modelo DSSAT CERES-Maize de (a) el número de granos, y (b) el peso individual del grano

### Estrategias de manejo para alto Rendimiento según resultados de experimentación a campo

A partir del año 2000 se comenzaron a realizar ensayos comparativos de rendimientos utilizando híbridos comerciales, ajustando el manejo local para trabajar con las menores limitaciones de los cultivos, acercando los rendimientos a los potenciales comentados en la primera parte de este trabajo. De aquí se desprenden ensayos con materiales comerciales con rendimientos comprendidos entre los 12000 y 19000 kg ha<sup>-1</sup>, destacándose en ese momento el material Cargill Titanium I1G (Margiotta, *et al.*, 2001). De una serie de ensayos comparativos de rendimientos entre el año 2006 y el 2012 se destacan datos puntuales de rendimientos en el orden de magnitud de los 20000 kg ha<sup>-1</sup> (Margiotta *et al.*, 2008; Margiotta *et al.*, 2009; Reinoso *et al.*; 2010). En la campaña 2011/2012 se realizaron ensayos ajustando el manejo para obtener el rendimiento potencial aplicando macro y micronutrientes (Figura 7). El año fue particular porque hubo altas temperaturas en el período de floración, que incluso afectaron la polinización de muchos materiales, pero llegando aun en ese caso a 19500 kg ha<sup>-1</sup>.

La variabilidad en las propiedades de los suelos aluvionales presentes en los valles irrigados de la Norpatagonia incide sobre la uniformidad del rendimiento en áreas productivas. Los diferentes niveles de materia orgánica presente, bajos en la mayoría de los lotes, obligan a fertilizar el cultivo con altas dosis de nitrógeno para no limitar la actividad fotosintética y lograr altos rendimientos, pero con la precaución de evitar el lixiviado de nitratos en condiciones de riego integral. A nivel regional, existen algunas experiencias que demuestran una evidente respuesta del maíz a la aplicación de N. Ensayos llevados adelante en el Valle Inferior de Río Negro en dos series de suelos con contenido de materia orgánica de 1,1% y 4% respectivamente, demostraron la existencia de respuesta a la aplicación de N, siendo requerida en el primer caso una dosis de 370 kg de N ha<sup>-1</sup> para alcanzar el máximo rendimiento, mientras que fue suficiente la mitad de esta dosis en el ambiente con mayor contenido de MO (%) en el suelo (Martínez. *et al.*, 2012). En estas experiencias también se evaluó la respuesta al agregado de fósforo (P) en suelos con niveles de P del orden de las 17 ppm, no

observándose respuesta significativa y situando al N como el principal nutriente responsable de la generación del rendimiento.

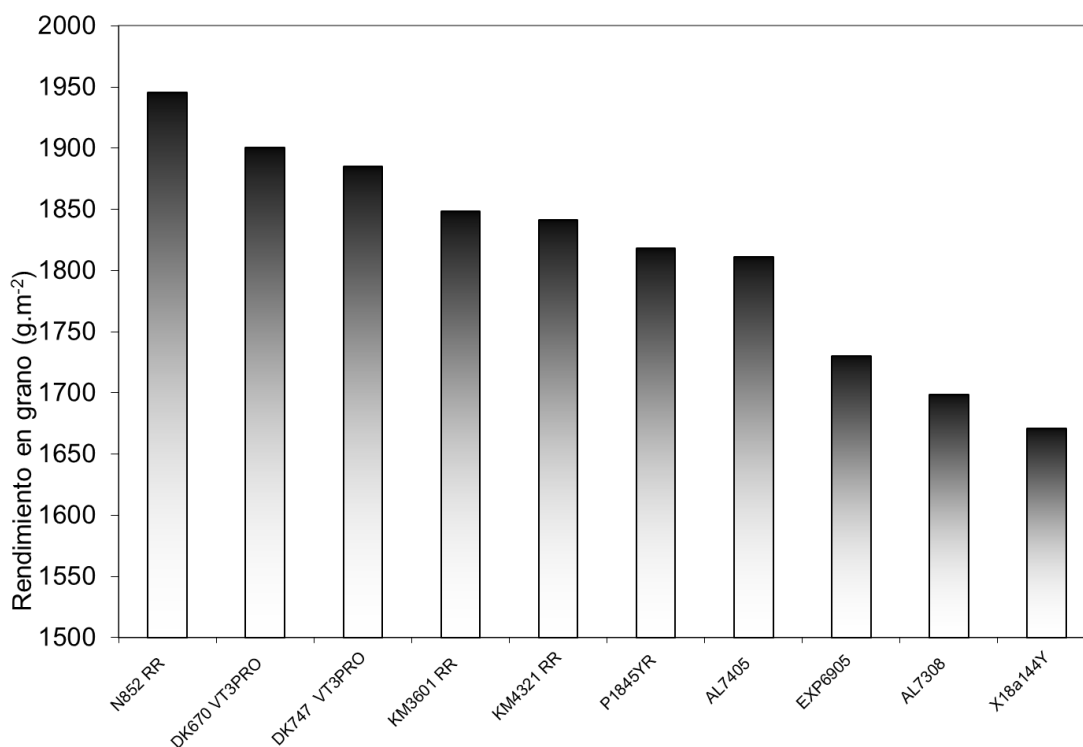


Figura 7: Resultados de un ensayo comparativo de rendimiento en la EEA Valle Inferior del Río Negro. Fecha de siembra: 10 de octubre Distanciamientos entre hileras; 0.70 m. Densidad: 100.000 plantas/ha

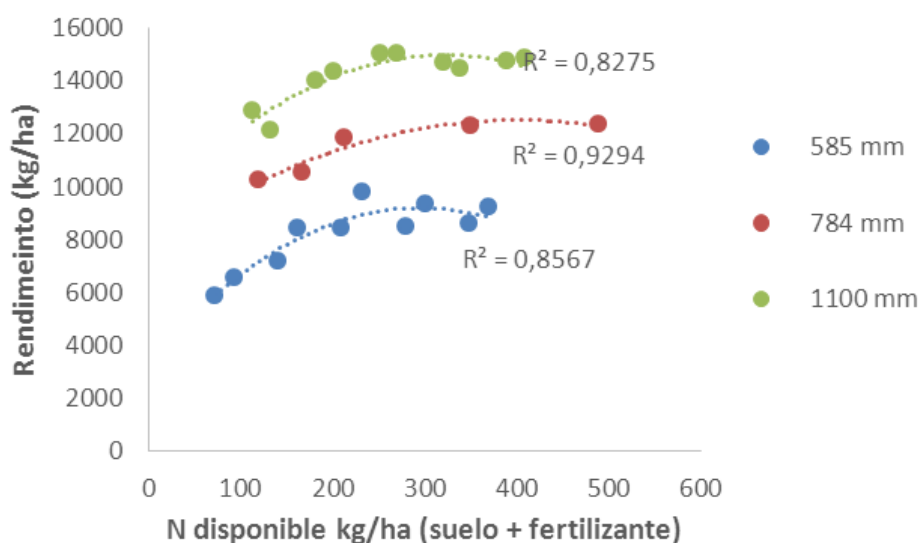
El riego que debe aplicarse en la zona es integral y no suplementario, por lo que el agua aplicada mediante riego por aspersión debería ser del orden de los 800 mm durante el ciclo del cultivo, lo cual lleva a considerar un alto costo de aplicación del mismo. En riego gravitacional, trabajos realizados durante muchos años con pequeños y medianos productores han mostrado a la siembra en surcos como una alternativa que favorece la implantación y la estabilidad de rendimientos con una aplicación de 7 u 8 riegos, totalizando aproximadamente 1000 mm de agua en el ciclo.

Ajustar la dosis de nitrógeno al rendimiento esperado en función de la lámina de riego a aplicar es clave para mejorar la eficiencia de uso del N y la rentabilidad del cultivo. En una serie de ensayos llevados a cabo bajo riego por pivot a campo muestran que mejor disponibilidad hídrica estaría aumentando la eficiencia de uso del N, pasando de 32 kg de grano/kg N disponible con 585 mm de riego a 50 kg de grano/kg N disponible con 1100 mm, lo que representa aproximadamente un 60 % de incremento en la EUN (Figura 8).

En la actualidad se está alcanzando rendimientos entre 13000 y 17000 kg ha<sup>-1</sup> a nivel de lote en condiciones no limitantes de suelo, lo cual implica riego con fertilización nitrogenada del orden de los 200 kg de N ha<sup>-1</sup> y densidades de 90000 pl ha<sup>-1</sup> a cosecha.



Estos resultados ponen en evidencia que se estaría logrando a campo el 80 % del rendimiento potencial, punto donde es posible estabilizarse.



**Figura 8.** Relación entre Nitrógeno disponible (suelo + fertilizante) y rendimientos reales de maíz para las campañas 2014/2015 con 784 mm disponibles en el ciclo del cultivo (*puntos rojos*), 2015/2016 con 585 mm disponibles (*puntos azules*) y 2016/2017 con 1100 mm disponibles (*puntos verdes*). El ciclo fue intermedio, la densidad de 75000 plantas ha<sup>-1</sup> y el riego por aspersión en lote de productor (establecimiento Kaitaco, General Conesa, Río negro).

### Comentarios finales:

Los principales factores limitantes en la zona de estudio que deben optimizarse para alcanzar altos rendimientos son el nitrógeno y el riego. Conocer topes de rendimiento ayuda a trabajar sobre rendimientos reales y ponerles extremos a distintos factores de manejo. Las experiencias realizadas a lo largo de más de 20 años de experimentación en los valles Norptagónicos sobre el cultivo de maíz muestran coherencia con los resultados obtenidos con los modelos de simulación estudiados. Los altos niveles de fertilización con N implican un manejo más eficiente del elemento para optimizar la rentabilidad del cultivo y minimizar los efectos negativos medioambientales. El ajuste de variables de manejo como la fecha de siembra, el riego, los momentos de fertilización, el genotipo y la densidad determinan la capacidad del cultivo para capturar los recursos disponibles, mejorando la EUN. Conocer los factores que limitan la producción y ajustar la disponibilidad de los recursos con los momentos en que se generan los principales componentes del rendimiento permitirá alcanzar los máximos rendimientos para cada ambiente.

### Bibliografía

Andrade, FH; AG Cirilo; SA Uhart & ME Otegui. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. La Barrosa (Ed.). Dekalbpres. INTA, FCA-UNMP. Balcarce, Argentina.

- Barbieri, PA; H Sainz Rojas & F Andrade. 2002. Narrow rows in corn under no till: Accumulation and dry matter partition.
- Cantarero, MG; AG Cirilo & FH Andrade. 1999. Night Temperature at Silking Affects Kernel Set in Maize. *Crop Sci.* 39:703–710.
- Evans, L & R Fischer. 1999. Yield potential: Its definition, Measurement and significance. *Crop Sci.* 39:1544-1551.
- Margiotta, F. A., L. Reinoso y R. S. Martínez. 2008. Evaluacion de materiales comerciales de maiz Campaña 2007/2008. 13 pp. EEA INTA Valle Inferior. [en línea]: <http://anterior.inta.gov.ar/f/?url=http://anterior.inta.gob.ar/valleinferior/info/documentos/vegetal/MaizBeltran.pdf>
- Margiotta, F.A, L. Reinoso y R.S. Martínez. 2009. Evaluación de materiales comerciales de maíz. Campaña 2008/2009. 25 pp. EEA INTA Valle Inferior. [en línea]: [http://www.syngentaenvivo.com.ar/2012/ensayos/Maiz-grano/ECR\\_Maiz\\_Viedma\\_Beltran\\_2008\\_09.pdf](http://www.syngentaenvivo.com.ar/2012/ensayos/Maiz-grano/ECR_Maiz_Viedma_Beltran_2008_09.pdf)
- Margiotta, F.A.; Martinez, R. 1992. Efecto de la Epoca de Siembra, Densidad y Fertilización sobre el Rendimiento de Maíz de regadío en el Valle Inferior del Río Negro. V Congreso Nacional del Maíz y II Reunión Sud Americana de Maiceros.
- Margiotta, F.A.; Martínez, R.M.; Iglesias, H.; Arriaga, .O.; Chidichimo, H.O. & Sempe, M.E. 1988. Fertilización de maíz bajo riego en el Valle Inferior de Río Negro. Actas IV Congreso Nacional de Maíz. Pergamino. pág:106-112.
- Margiotta, F; Alarcón, A y Chaves, H. 2001. El cultivo de maíz en el Valle Inferior. Experiencias con híbridos en dos tipos de suelos. Comunicaciones. 37:8-9. INTA EEA Valle Inferior.
- Martínez, Roberto R. S.; Margiotta, Francisco; Reinoso, Lucio; Martínez, Roberto M. Buscando alcanzar altos rendimientos del cultivo de maíz: experiencias en los valles Norpatagónicos. 3ra Reunión Internacional de Riego-INTA Manfredi. Octubre 2012.
- Otegui, M.E., Ruiz, R.A., y Petruzzini, D. 1996. Modeling hybrid and sowing date effects on potential grain yield of maize in a humid temperate region. *Field Crops Res.* 47:167-174.
- Reinoso L. Martinez R.S., Margiotta F., D´onofrio M. Y Zalba P.2010a Rendimiento de maiz y sus componentes frente a cambios en la frecuencia de riego y disponibilidad de nitrogeno en los valles irrigados de la norpatagonia. IX Congreso Nacional de Maiz y I Simposio Nacional de Sorgo. Rosario 2010. 17 al 19 de Noviembre de 2010. En actas del congreso Nacional de Maíz y 1° Simposio Nacional de Sorgo.
- Salvagiotti, F. 2009. Rendimientos potenciales en maíz. Brechas de producción y prácticas de manejo para reducirlas. En: Para mejorar la producción 41. EEA Oliveros INTA. P 61-66.