



Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
Escuela para Graduados

Productividad del agua en maíz (*Zea mays, L.*) cultivado bajo sistemas de riego y de secano en San Luis, Argentina.

Martin Augusto Ibarra

Trabajo Final para optar al Grado Académico de
Especialista en Producción de Cultivos Extensivos

Córdoba - 2014

Productividad del agua en maíz (*Zea mays, L.*) cultivado bajo sistemas de riego y de secano en San Luis, Argentina.

Martin Augusto Ibarra

Tutor: Ing. Agr. (M. Sc.) Jorge Luis Mercau

**Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias del Tribunal
Evaluador**

Ing. Agr. (M. Sc.) Gustavo Ovando

.....

Ing. Agr. (Dr.) Fernando Salvagiotti

.....

Ing. Agr. (Dra.) Claudia Vega

.....

Presentación Formal Académica

1 de octubre de 2014

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Universidad Nacional de Córdoba

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor, Jorge Luis Mercau, por su tarea durante mi formación como especialista, a SER Beef S.A, que permitió llevar adelante este trabajo con datos y horas de trabajo, en especial a su responsable de agricultura, Nicolás Ríos Centeno, quien alentó mi búsqueda continúa de mejora profesional. Agradezco también a mis familiares, en particular a mi Mamá por ser la luz de mis ojos, a Florencia por su amor y paciencia, al Grupo de Estudios Ambientales - IMASL - por hacerme un lugar, a la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Córdoba por formarme y a la Dra. Claudia Vega, quien sentí presente en todo el camino de la especialización en producción de cultivos extensivos. Rock...

Tabla de contenido

	Pág.
LISTA DE TABLAS.....	<i>v</i>
LISTA DE FIGURAS.....	<i>vi</i>
LISTA DE SIGLAS O ABREVIATURAS.....	<i>ix</i>
Abstract	1
Resumen	2
Introducción	3
Materiales & Métodos	4
Región de Estudio	4
Ubicación	4
Clima	6
Suelos	8
Base de datos de los lotes	9
La oferta total del agua	10
Indicadores agroclimáticos	10
Análisis de Frontera	11
Resultados	13
Fronteras	13
Brechas de productividad	16
Fecha de siembra	16
Densidad de plantas lograda	17
Cociente fotothermal, temperaturas extremas y déficit de presión de vapor	18
Distribución del agua en lotes de secano	19
Distribución del agua bajo riego y sobre riego	21
Estado hídrico del suelo en cultivos bajo riego	22
Disponibilidad tecnológica en riego	24
Respuesta a la fertilización nitrogenada	24
Discusión	26
Conclusiones	31
Bibliografía	32

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación taxonómica de los suelos de los establecimientos de SER Beef S.A. según mapa de suelos de Ser Beef elaborado por Tecnoagro. Se agrega también la estimación de la capacidad para almacenar agua útil de estos suelos, en base a estimación local de contantes hídricas para muestras del primer metro de cada perfil.....	9
Tabla 2: Distribución de la oferta de agua (mm) para los 179 lotes, 92 en secano y 87 bajo riego. Agua remanente al 1 de abril (antecesor), lluvias entre esa fecha y la siembra (FS), y desde la siembra a madurez fisiológica (R6), riegos totales (desde el primero de abril a madurez fisiológica) y solo en pre-siembra.....	13
Tabla 3: Número de lotes asignado a las distintas condiciones de oferta y categorías de rendimiento logrado (ver Figura 3 y texto para más detalles).....	16
Tabla 4: Frecuencia relativa en distintas fechas de siembra, de lotes cercanos (Techo) y más alejados (Medio) de la frontera en secano y bajo riego (con oferta menor a 1030 mm).....	17
Tabla 5: Medidas estadísticas resumen para la variable “N disponible” (N suelo + N fertilizante), según las clases de mayor productividad (T) y menor productividad (M) del agua ofrecida en los distintos escenarios: secano, riego y sobre riego.....	25
Tabla 6: Productividad del agua transpirada (San Luis y Nebraska) o evapotranspirada (Balcarce y Catrilo) en el ciclo del cultivo de maíz para producir grano (Prod. kg.ha-1.mm-1), déficit de presión de vapor durante el día (DPV día, kPa, valores medios para las fechas de floración en cada localidad, ver materiales y métodos para más detalles) y productividad del agua corregida por el DPV día (Prodc (kg.ha-1.mm-1.kPa). Para las cinco localidades se presentan los valores máximos de productividad, que se podrían usar como frontera a alcanzar, y los valores medios de los casos estudiados.....	28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localización de los 5 establecimientos (marca amarilla) de SER Beef S.A, limite de los distintos establecimientos (polígonos rojos) y limite provincial (línea blanca), en la región central de la provincia de San Luis, Argentina. También con marcas amarillas se ubican los Aeropuertos donde se encuentran las estaciones meteorológicas usadas en el estudio.....5

Figura 2: Radiación solar incidente (MJ/(m².día-1)), Temperatura (°C) media y máxima diaria del aire (a y b, las líneas punteadas verticales indican la fecha media de ocurrencia de la última y de la primera helada); Balance hídrico aparente (c y d, mm/mes); y ; Déficit de presión de vapor medio del día (e y f, Kpa) medios para el período 1971 – 2010 a largo del año (junio a junio) en San Luis Aero (a, c y e) y Villa Reynolds Aero (b, d, f). Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.....7

Figura 3: Relación entre la oferta total de agua (suma del remanente del cultivo anterior más las lluvias y los riegos hasta la madurez fisiológica en cada lote), en mm, y el rendimiento, en kg/ha, para los 179 lotes analizados. Con 1030 mm de oferta se logra alcanzar un rendimiento, 12000 kg/ha, que no es superado con ofertas mayores. Se identifican lotes en secano (rombos amarillos), y lotes bajo riego, por debajo o por sobre esa oferta total (cuadrados azules y triángulos rojos, respectivamente). Debajo del umbral de oferta se ajustó una frontera de máxima productividad en base al percentil 95 de los rendimientos (pendiente 12.7 kg/mm, ordenada a abscisas de 60 mm). Se separan lotes con rendimientos extremadamente bajos y raros delimitando una frontera “piso” en base al percentil 5 de los rendimientos. Los lotes con rendimientos “cercaños” a la frontera de máxima producción se separan mediante una frontera “techo” ajustada al percentil 80 de los rendimientos (ver texto para mayor detalle). Los círculos rojos solo resaltan dos conjuntos de lotes con productividades del agua superiores a la frontera ajustada a los datos.....15

Figura 4: Frecuencias acumuladas para las fechas de siembra observadas en las situaciones de Secano (cuadrados amarillos), Riego (círculos celestes) y Sobre riego (triángulos Rojos)

en el conjunto de lotes pertenecientes al Techo (símbolos grandes y líneas gruesas) y Medio (símbolos pequeños y líneas finas) de productividad del agua.....17

Figura 5: Frecuencias acumuladas para la densidad de plantas logradas en situaciones de Secano (cuadrados amarillos), Riego (círculos celestes) y Sobre riego (triángulos rojos) en el conjunto de lotes pertenecientes al Techo (símbolos grandes y líneas gruesas) y Medio (símbolos chicos y líneas finas) de productividad del agua.....18

Figura 6: Frecuencia acumulada de: a) el cociente fototermal “Q”, b) el numero de días con temperaturas máximas mayores a 35°C y, c) el déficit de presión de vapor medio diario “DPV”, para la ventana crítica de los cultivos en Secano (cuadrados amarillos), Riego (círculos celestes) y Sobre riego (triángulos Rojos) en el conjunto de lotes pertenecientes al Techo (símbolos grandes y líneas gruesas) y Medio (símbolos pequeños y líneas finas) de productividad del agua.19

Figura 7: Contribución relativa a la oferta total de agua del remanente del cultivo antecesor y las precipitaciones a lo largo del ciclo del cultivo para lotes de secano que pertenecen al Medio (columnas claras) y al Techo (columnas oscuras) de productividad del agua. La longitud de las barras de error equivale al error estándar para cada población.....20

Figura 8: Rendimiento en función de la lluvia alrededor de la floración para siembras tempranas (antes del 15/11, promedio 22/10) con una pobre (a) o buena (b) recarga inicial del perfil y, siembras tardías (desde el 15/11, promedio 6/12) (c). Se consideró con buena recarga inicial a aquellos lotes que sumaron más de 200 mm entre el agua útil residual del cultivo antecesor al 1° d abril y las lluvias desde esa fecha hasta el estado V8. Las líneas punteadas corresponden a lluvias de 150 mm y rendimientos de 2000 kg.ha-1.....21

Figura 9: Contribución relativa a la oferta total de agua del remanente del antecesor y las precipitaciones y riegos a lo largo del ciclo del cultivo para lotes bajo riego (arriba) y sobre regados (abajo) que pertenecen al Medio(a y c, izquierda) y al Techo (b y d, derecha) de productividad del agua. En recuadro, dentro de cada panel, se presentan los promedios y

desvíos del agua residual, lluvias, riego y del total de la oferta de ambos grupos de lotes (expresados en mm).....22

Figura 10: Frecuencia acumulada de los contenidos de agua útil estimados por gravimetría en el inicio del ciclo (inicio, a y b) alrededor de la floración (flor, c y d) y en madurez fisiológica (fin, e y f) para la población “riego” (a, c y e) y sobre riego (b, d y f) para los lotes cercanos (T, líneas gruesas) y lejanos a la frontera (M, líneas finas).....23

Figura 11: Disponibilidad tecnológica de riego. Sobre eje X se encuentra el número de posiciones que riega un equipo y la posición que se encuentra regando.....24

Figura 12: Frecuencia acumulada de: (a) Nitrógeno del suelo disponible a la siembra; (b) nitrógeno disponible del fertilizante y (c) nitrógeno disponible total (suelo + fertilizante), de los cultivos en Secano (Cuadrados amarillos), Riego (Círculos celestes) y Sobre riego (triángulos Rojos) en el conjunto de lotes pertenecientes al Techo (símbolos grandes y líneas gruesas) y Medio (símbolos chicos y líneas finas) de productividad del agua.....25

LISTA DE SIGLAS O ABREVIATURAS

abr: abril

BH: balance hídrico

CV: coeficiente de variación

DPV: déficit de presión de vapor

DE: desvío estándar

d: día

dic: diciembre

ET: evapotranspiración

ETP: evapotranspiración potencial

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations

FS: fecha de siembra

F: Fraga

INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

LC: La Cleides

M: lotes de productividad media

M.O: materia orgánica

Max: máximo

MJ: Mega Joule

Min: mínimo

N: nitrógeno

N-NO₃: nitrógeno de nitratos

nov: noviembre

oct: octubre

PDA: Fosfato di amónico

PMA: Fosfato mono amónico

PDC: Paso de las Carretas

P: lotes de productividad piso

p95: percentil 95

p80: percentil 80

p05: percentil 5

pl: planta

Q: cociente fototermal

R3: granos completamente cuajados

R6: madurez fisiológica

Rad: radiación

SB: San Bernardo

SL: San Luis

SR: sobre riego

T: lotes de productividad techo

Temp: temperatura

T max: temperatura máxima

T min: temperatura mínima

UAN: Nitrato de amonio

V6: seis hojas de maíz completamente desplegadas

V8: ocho hojas de maíz completamente desplegadas

VM: Villa Mercedes

VR: Villa Reynolds

VT/R1: floración

Productividad del agua en maíz (*Zea mays, L.*) cultivado bajo sistemas de riego y de secano en San Luis, Argentina.

Abstract

Maize production in San Luis is highly variable due to water supply. However, higher rainfall or irrigation, generate uneven yield responses. Crop technology development in the region is still limited and the possible causes of this response variability have not been explored systematically. The aims of this study were: to determine the boundary of maximum water productivity for rainfed and irrigated maize, identify the main causes for lower productivity and to explore possible ways to reduce this gap. A database was constructed and analyzed from crops managed by SER Beef SA, an agricultural company located in the center of San Luis province. 179 maize paddocks along six crop seasons, 2006/07 to 2011/12, were consolidated; which included a wide variety of environments and water supply. The Boundary of maximum water productivity was drawn through quantile regression between total water supply (residual water stored from previous crops until April 1st plus rainfall and irrigation from April 1st to sowing date and rainfall and irrigation from sowing to physiological maturity) and on farm crop yield. Maize yield increased along with water supply up to 1030 mm, reaching near 12 tn.ha⁻¹. For lower water supply, a maximum water productivity boundary was adjusted. In average, only 60 mm were not transpired and that the transpired water use efficiency to produce grain reached 12.7 kg.mm⁻¹. Late sowing dates, high levels of nitrogen fertilization and a non excessive irrigation, were the most clearly management components leading maize crops to that boundary of maximum water productivity. Irrigation, under a restricted water supply, increased the proportion of plots close to that boundary. Because of the wide range of water supply explored, this boundary analysis enables the evaluation of water management and the design of technology for the maximization of maize yields on a wide part of Argentinian semiarid region.

Keywords: On farm water productivity, Maize, Irrigated crop, Rainfed crop, Centro de Argentina

Resumen

La producción de maíz en San Luis está sujeta a una fuerte variabilidad por la oferta de agua. Sin embargo, el aumento de esa oferta, por mayores lluvias o por riego, genera aumentos de rendimientos dispares. En la región es todavía escasa la generación de tecnología y las razones de esa variabilidad no han sido exploradas en forma sistémica. Los objetivos de este trabajo fueron: i) cuantificar el efecto del aumento de la oferta de agua sobre el rendimiento de maíz en sistemas de producción de riego y de secano, ii) definir una frontera de rendimiento alcanzable para distintas ofertas de agua en sistemas de producción de riego y de secano, y, iii) diagnosticar las posibles causas de alejamientos de la frontera de máxima productividad del agua en sistemas de producción de riego y de secano. Se construyó y analizó una base de datos sobre la gestión de lotes de una empresa agropecuaria, SER Beef S.A., situada en el centro de la provincia de San Luis. Se consolidaron 179 casos reales del cultivo de maíz en seis campañas agrícolas, desde la 2006/2007 a la 2011/2012, incluyendo el manejo en una amplia variedad de ambientes y regímenes de suministro de agua. Se trazó la frontera de máxima productividad del agua ofrecida a través de un método de regresión cuantil entre la oferta total de agua (suma del agua residual del cultivo antecesor almacenada en el suelo al primero de abril, de las precipitaciones y riego desde el 1° de abril a la fecha de siembra y de las precipitaciones y riegos desde siembra hasta madurez fisiológica) y el rendimiento obtenido a campo. La producción de maíz aumentó junto con el aumento de la oferta de agua hasta los 1030 mm, alcanzando un techo de rendimiento próximo a las 12 tn.ha⁻¹. Con ofertas mayores no se registraron aumentos del rendimiento. Para las ofertas menores, la frontera de productividad ajustada indica que la eficiencia de uso del agua transpirada para producir grano sería de 12.7 kg.mm⁻¹ y que solo 60 mm ofrecidos no serían transpirados. El uso de fechas de siembra más tardías y de mayores niveles de fertilización nitrogenada son los componentes de manejo que más claramente acercaron los lotes de maíz a esa frontera de máxima productividad del agua. El riego, con una oferta acotada, aumentó la proporción de lotes próximos a esa frontera. Por el amplio rango de oferta explorado, el análisis de frontera que presenta este trabajo sirve de base para evaluar la gestión del agua y diseñar tecnologías que permitan maximizar la productividad del cultivo de maíz en gran parte del centro del cordón semiárido de la Argentina.

Introducción

La demanda de productos agrícolas continúa creciendo debido al aumento de la población, la mejora en la calidad de la dieta y, los crecientes requerimientos de biocombustibles y biomateriales (Andrade, 2011). La producción agrícola se basa en el uso del agua de lluvia a la que en algunas regiones se le agrega agua de ríos o napas subterráneas a través del riego. Aumentar la oferta de agua a través del riego sería una forma de aumentar la producción, sin embargo, el riego también genera preocupación por la competencia con la creciente demanda de agua potable (Pengue, 2006). El sector agrícola enfrenta entonces el desafío de producir más alimentos con la misma, e incluso menos agua, lo que solo es posible si se aumenta la productividad que se logra a partir del agua ofrecida (Zwart & Bastiaanssen, 2004) tanto por las lluvias como por el riego.

En zonas subhúmedas y semiáridas, donde la producción está expuesta a una importante variabilidad y frecuente escasez en la oferta de agua, resulta más conveniente plantear los objetivos de producción en términos de proximidad a la frontera de productividad del agua ofrecida, que alcanzar una meta de rendimiento (French & Shultz, 1984 a). Las fronteras de productividad del agua permiten a productores, investigadores y políticos, fijar metas realistas de rendimiento y requerimientos de agua ayudando a identificar opciones de manejo para mejorar la productividad del agua (Grassini et al., 2011 a). En secano, es necesario implementar estrategias capaces de transformar con la máxima eficiencia el agua disponible para enfrentar el desafío de la variabilidad de las lluvias. En estas zonas con claras deficiencias hídricas durante el ciclo de los cultivos, el agregado de agua mediante el riego permitiría incrementar la producción y sobre todo reducir la variabilidad, mejorando la renta y reduciendo el riesgo de la empresa (Bongiovanni et al., 2011). Sin embargo, como la rentabilidad del riego depende de mantener una buena productividad del agua agregada y del total de agua ofrecida, su transformación eficiente es una meta de manejo. Por eso, en ambientes semiáridos tanto en riego como en secano, conocer la frontera de productividad del agua es una potente herramienta para la gestión de los sistemas de producción.

La mejora de la productividad del agua en maíz es crítica en la Argentina (Grassini et al., 2013). El país es un gran productor y exportador de maíz, o sus productos derivados, y además el cultivo es un componente clave de las secuencias agrícolas en distintas regiones

potenciando también a otros cultivos, como la soja (Calviño & Monzón, 2009). La diferencia entre las producciones logradas para una oferta de agua y una frontera de máxima productividad alcanzable define una brecha de rendimientos que puede ser cubierta con un mejor manejo de la oferta de agua (Passioura, 2006). Determinar la magnitud de la brecha y evaluar posibles formas de achicarla requiere cuantificar en cada región productora esa máxima productividad y entender que condiciones permiten lograrla. En Nebraska, una de las regiones importantes en producción mundial de maíz bajo riego, se ha determinado que se puede alcanzar una productividad de hasta 28 kg de grano ha⁻¹ por mm de agua transpirada en el ciclo, con tan solo 100 mm de agua perdida por otras vías, y que en muchos casos la producción está lejos de esa meta (Grassini et al., 2009 b y 2011 b). En Argentina se ha realizado una aproximación similar para girasol (Grassini et al., 2009 a), pero no para soja y maíz, los dos cultivos que constituyen la mayor parte de la producción del país.

La producción de maíz en San Luis se ha cuadruplicado en menos de una década (de 191000 tn, en promedio para las cosechas 2006 a 2008, a 847000 tn para las cosechas 2011 a 2013, en base a estimaciones del Sistema Integrado de Información Agropecuaria (SIIA). Ese aumento se produjo por una mayor superficie cosechada (de 52000 a 186000 ha para ambos períodos) como por un consistente aumento de sus rendimientos (de 3,6 a 4,5 tn respectivamente). La escasa cantidad y elevada variabilidad de las lluvias en la provincia ponen a prueba las bondades de los sistemas de producción desarrollados en zonas con mayor historia de producción y mejores condiciones hídricas (Viglizzo & Jobbágy, 2010). En parte por eso, el aumento registrado coincidió además con una creciente superficie agrícola bajo riego (Saénz et al., 2011). No obstante, todavía es insuficiente el esfuerzo de distintas instituciones públicas y privadas locales en el desarrollo y ajuste de tecnologías de manejo adecuadas, tanto en secano como en riego.

El objetivo del presente trabajo fue determinar la frontera de máxima productividad del agua ofrecida en cultivos de maíz en secano y bajo riego, las causas que nos alejan de ella y explorar cuales pueden ser las posibles vías para reducir esa brecha localmente. Para eso se generó y evaluó una amplia base de datos reales de producción de lotes de maíz bajo riego y en secano de la empresa SER Beef, 179 casos, cubriendo seis campañas y todos sus campos.

Materiales & Métodos

Región de estudio

Ubicación

El estudio se realizó en cinco establecimientos de SER Beef S.A., ubicados en la región centro de la provincia de San Luis (Figura 1). Cuatro de ellos; Villa Mercedes (VM, 33°33'29''S, 65°39'47''W), Fraga (F, 33°30'17''S, 65°46'09''W), Paso de las Carretas (PDC, 33°26'28''S, 65°52'02''W) y La Cleides (LC, 33°20'34''S, 65°56'06''W), se encuentran entre las localidades de Villa Mercedes y San Luis, desde unos 20 km de la primera y unos 30 de la última, alrededor de la localidad de Fraga, con un total de 13.350 ha bajo agricultura. La mayor parte de Paso de las Carretas se encuentra bajo riego por pivotes (7560 ha), tomando el agua de un canal revestido que la trae desde el dique homónimo, lindante con el campo. Los otros tres campos de esa zona tienen toda su superficie agrícola en secano. El quinto campo, San Bernardo (SB, 33°28'25''S, 66°30'53''W), se halla ubicado a 20 km al sudoeste de la ciudad de San Luis, limitando al oeste con la salina del Bebedero. Allí la agricultura solo se realiza bajo riego con pivotes (1750 ha), que toman el agua desde un acuífero subterráneo.

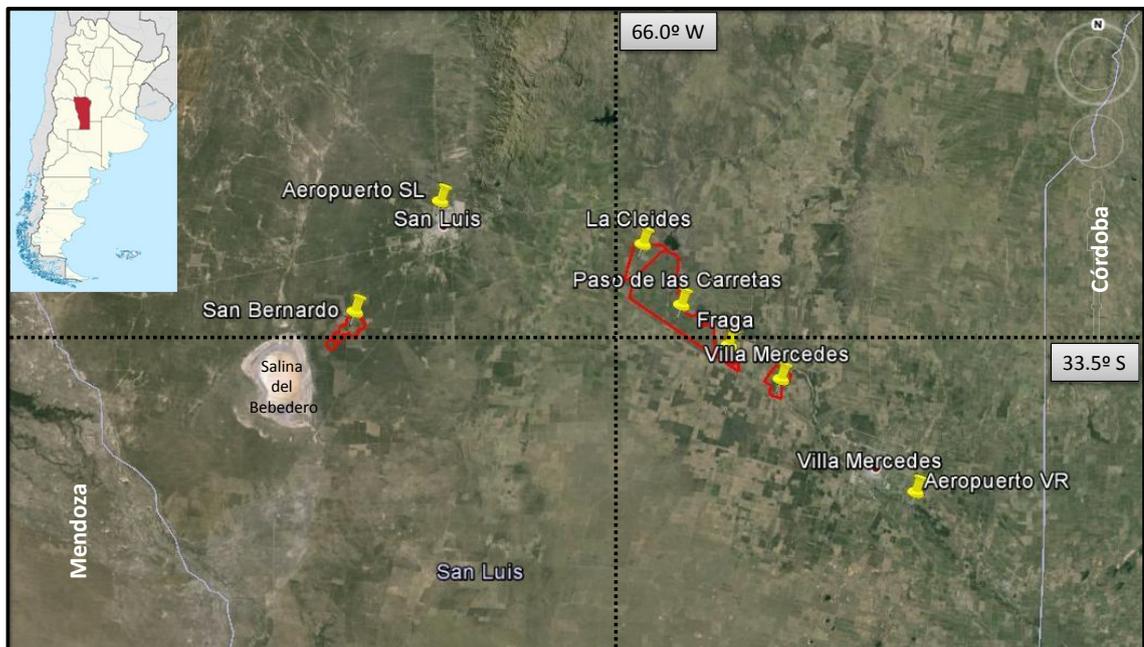


Figura 1: Localización de los 5 establecimientos (marca amarilla) de SER Beef S.A, limite de los distintos establecimientos (polígonos rojos) y limite provincial (línea blanca), en la región central de la provincia de

San Luis, Argentina. También con marcas amarillas se ubican los Aeropuertos donde se encuentran las estaciones meteorológicas usadas en el estudio.

Clima

El clima general de la región tiene características continentales. Sin embargo existen algunas diferencias entre los campos ubicados cerca de Fraga, un poco más altos (630 a 807 msnm), fríos y húmedos, y San Bernardo (SB), al oeste de San Luis, más bajo (500 msnm), cálido y seco. Para describirlas se utilizaron los registros históricos (1971 – 2010) de las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional del aeropuerto de Villa Reynolds (33°44'12'' S, 65°23'01'' W), próximo a Villa Mercedes, para los primeros y el aeropuerto de San Luis (33°17'06'' S, 66°21'10'' W) para el campo del oeste (Figura 1). Los niveles medios de radiación incidente y la temperatura media anual en San Luis, superan a Villa Mercedes en 1.6 MJ/m² y 1.7 °C respectivamente (Figura 2, a y b). La marcha de temperatura máxima media histórica es muy similar, llegando a 30°C el promedio del período diciembre-enero-febrero en ambas localidades. El periodo libre de heladas agronómicas (temperatura mínima inferior a 2°C en abrigo) es mayor en San Luis, con una fecha media de ocurrencia de última helada el 29 de septiembre y de primera helada el 2 de mayo. En cambio, en Villa Mercedes, el periodo se acorta en más de 60 días, siendo el 5 de noviembre y el 5 de abril las fechas medias de ocurrencia de última y primer helada (Figura 2, a y b).

Los campos difieren fuertemente en la exposición de los cultivos al déficit hídrico. En el este, la precipitación media anual del período 1971 – 2010 es de 566 mm (CV 32%, 593 mm en los últimos 10 años) y el 79% de las lluvias ocurren en la estación de crecimiento de un maíz temprano (octubre a marzo). En cambio, al oeste, la media anual de precipitaciones es de apenas 351 mm (CV 35%, 456 mm en los últimos 10 años) y la estación de crecimiento para un maíz temprano (septiembre a febrero) recibe el 73% del total. La evapotranspiración de referencia (para una cobertura de alfalfa sin déficit de agua) supera ampliamente el régimen de precipitaciones durante todo el año en ambos puntos de estudio. En base a la ecuación de Penman Monteith FAO (1998) San Luis alcanza 1590 mm de demanda, superando en promedio los 7 mm.d⁻¹ entre diciembre y febrero, mientras que en Villa Mercedes es menor, sumando 1198 mm y en ningún mes supera en promedio los 6 mm.d⁻¹ de demanda. Dada las diferencias de lluvias y demandas, el déficit en San

Bernardo es de 1239 mm, duplicando al de los otros campos, donde se ubica en torno a los 632 mm (Figura 2, c y d). Un factor importante para la planificación de los cultivos, y que se relaciona a las diferencias de ET, es el déficit de presión de vapor medio del día, que en promedio es 0.2 kPa mayor en San Luis que en Villa Mercedes, con una diferencia más acentuada en verano. (Figura 2, e y f).

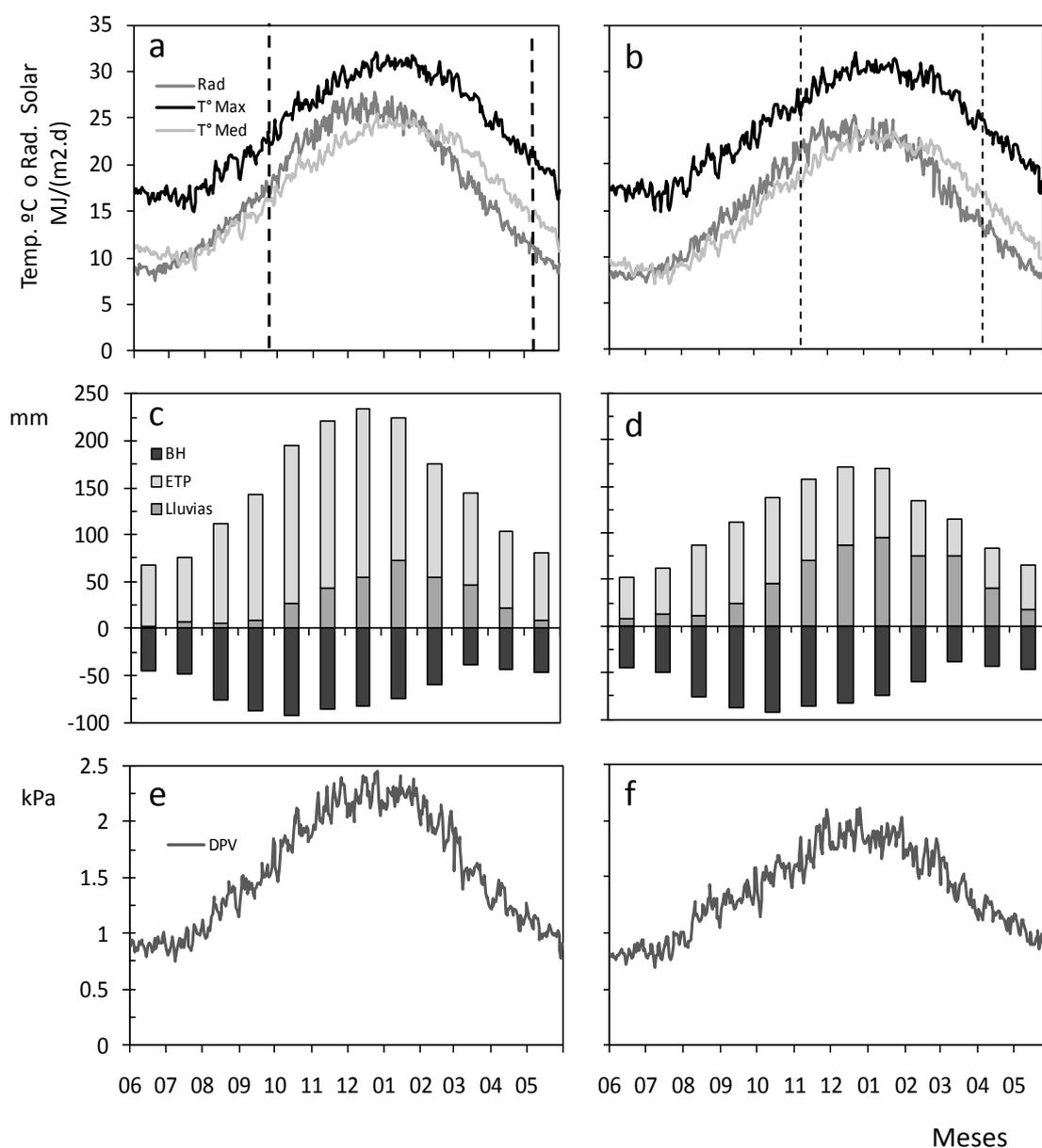


Figura 2: Radiación solar incidente (MJ/(m².día⁻¹)), Temperatura (°C) media y máxima diaria del aire (a y b, las líneas punteadas verticales indican la fecha media de ocurrencia de la última y de la primera helada); Balance hídrico aparente (c y d, mm/mes); y ; Déficit de presión de vapor medio del día (e y f, kPa) medios

para el período 1971 – 2010 a largo del año (junio a junio) en San Luis Aero (a, c y e) y Villa Reynolds Aero (b, d, f). Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.

Suelos

Los establecimientos cercanos a Fraga se encuentran en la región denominada “Planicie de acciones eólicas”, caracterizados por su relieve ondulado, constituido por formaciones eólicas (viejos médanos) re trabajados por el agua. La granulometría del material originario, es bastante uniforme, variando de franco-arenosa a arenosa-franca (Estudio de suelos Tecnoagro). El material originario de los suelos de San Bernardo es de origen sedimentario, traído por el viento y remodelado por el agua. Se trata de materiales de textura franco-arenosa a arenoso-franca, normalmente con un contenido de carbonato de calcio de alrededor del 4% y con un bajo contenido original de sodio (Estudio de suelos Tecnoagro). La clasificación taxonómica de los suelos de los establecimientos se detalla en la Tabla 1. A partir de los análisis químicos del suelo que se realizan en la empresa rutinariamente para la toma de decisiones (más de 1000 análisis de suelo a la fecha), se pudo realizar una descripción de más detalle que el que surge de las cartas del INTA y el mapa de los campos. En los campos del este, para los primeros 20 cm del perfil, el contenido medio de materia orgánica (M.O) es del 1.15 % (0.8 a 1.8 %), el fosforo disponible promedia 22 ppm (9 a 63 ppm), con un pH medio de 8.5, por la presencia de carbonato de calcio. En San Bernardo, a la misma profundidad, la MO promedia 1.39 % (1.19 - 1.72 %), el fosforo disponible 24 ppm (15 a 41 ppm), y el pH 8.5. Las constantes hídricas estimadas por el laboratorio Tecnoagro para los suelos bajo agricultura en los campos estudiados permiten cuantificar contenidos de agua útil que van desde los 78 a los 127 mm por metro de suelo (Tabla 1).

Tabla 1: Clasificación taxonómica de los suelos de los establecimientos de SER Beef S.A. según mapa de suelos de Ser Beef elaborado por Tecnoagro. Se agrega también la estimación de la capacidad para almacenar agua útil de estos suelos, en base a estimación local de contantes hídricas para muestras del primer metro de cada perfil.

ESTABLECIMIENTOS	ORDEN	SUBORDEN	GRAN GRUPO	SUBGRUPO	SERIE	Agua Util (mm/m)
Villa Mercedes Fraga Paso de las Carretas La Cleides	MOLISOL	USTOL	HAPLUSTOL	ENTICO	LOMA PLANA	102
					LOMA	112
				FLUVENTICO	TERRAZA	115
	ENTISOL	ORTENTE	USTORTENTE	TIPICO	LOMA ALTA *	112
					PSAMENTE	USTIPSAMENTE
				MEDANO		
San Bernardo	MOLISOL	USTOL	HAPLUSTOL	ENTICO	LOMA GRUESA SB	127
					LOMA SB	125

Base de datos de los lotes

Se consolidó una completa base de información para 179 lotes, de entre 40 y 200 ha cada uno, sumando un total de 19.600 ha, todos los casos fueron destinados a la producción de maíz para grano. La base abarca, seis campañas agrícolas de la empresa SER Beef, desde la campaña 2005/2006 a la campaña 2011/2012. Noventa y dos lotes se manejaron en seco: Villa Mercedes (26), Fraga (14), Paso de las Carretas (32) y La Cleides (20); y ochenta y siete bajo riego: Paso de las Carretas (65) y San Bernardo (22). Las siembras de maíz fueron entre la última decena del mes de agosto y la última decena del mes de diciembre con híbridos de madurez relativa entre 118 y 124 días. Los cultivos antecesores de los casos estudiados fueron: soja (45 %), maíz (24%), girasol (13%), soja II (9%), sorgo (4%), alfalfa (4%) y algodón (1%). En todos los lotes se registró la densidad de siembra y se hizo un recuento de plantas logradas. El nitrógeno de nitratos, medido para los primeros 60 cm del suelo cuando el maíz tenía entre 2 y 4 hojas, osciló entre 9 y 196 kg N-NO³.ha⁻¹. Tanto en riego como en seco se realizó una fertilización fosfatada incorporada a la siembra con dosis que varían entre 60 y 130 kg ha⁻¹ de PDA (grado técnico, 18-46-0) o PMA (grado técnico, 11-52-0). La fertilización nitrogenada se completó con UAN chorreado en V6, con una dosis que varió desde 20 a 200 kg N.ha⁻¹ de acuerdo al resultado del análisis de suelo y la recomendación del laboratorio para el objetivo de rendimiento propuesto por la empresa.

El sistema de riego es con pivotes centrales en círculos de superficies que varían entre 79 y 250 ha, mayoritariamente 106 ha. Los equipos más grandes pertenecen a San Bernardo, donde se manejan por mitades con cultivos con demandas de riego desfasadas para aumentar la disponibilidad de agua por hectárea en producción, generalmente maíz temprano (III decena de agosto y I decena de septiembre) y soja más tardía (noviembre). En cambio, en Paso de las Carretas algunos equipos son fijos pero muchos cambian de posición, por lo que hay equipos que riegan 1, 2 y hasta 3 posiciones por campaña. El riego de cada unidad de manejo se decide en base a la estimación de su balance hídrico y con un chequeo mensual del contenido de agua por gravimetría. La estrategia procura que los cultivos no sufran estrés hídrico, aplicando láminas de entre 15 y 30 mm, entre 3 y 39 veces durante el ciclo del cultivo. Tanto los lotes de secano como los de riego se recorren semanalmente para evitar daños importantes por malezas y plagas.

La oferta total de agua

La oferta total de agua se calculó como la suma del agua remanente del cultivo antecesor más las lluvias y riegos aplicados durante el ciclo hasta la madurez fisiológica del cultivo. El agua residual del cultivo antecesor, al 1° de abril, se estimó por medio del balance hídrico a partir de los datos de manejo del mismo. Luego, a la lluvia y el riego se los dividió en cinco etapas: desde el primero de abril a la siembra del maíz (barbecho); desde siembra a ocho hojas desplegadas (V8); desde V8 a floración (VT/R1); de VT/R1 hasta que los granos están completamente cuajados (R3) y; de R3 a la madurez fisiológica del cultivo (R6). Los límites entre los estados se determinaron a partir de los registros de manejo y en base al conocimiento de la fenología de los genotipos utilizados para las distintas fechas de siembra.

Indicadores Agroclimáticos

Se calcularon tres indicadores agroclimáticos alrededor de la floración (VT-R1) de cada lote: i) el cociente fototermal, ii) el déficit de presión de vapor y, iii) el número de días con temperaturas máximas superiores a 35°C. i) El cociente fototermal (Q) sintetiza algunos factores definitorios del rendimiento potencial y se calculó, para 30 días centrados en floración, como el cociente entre la radiación incidente media ($Mj.m^{-2}.d^{-1}$) y la temperatura media (°C), menos la temperatura base (8°C). ii) El Déficit de Presión de vapor (DPV),

diferencia entre la presión de vapor del aire saturado (situación en la cámara sub-estomática) y la presión de vapor del aire, es uno de los principales modificadores de la eficiencia de agua transpirada. Para su cálculo se utilizó la temperatura máxima y la mínima, y la humedad relativa media siguiendo el procedimiento de Allen et al. (1998), ponderando por 0,70 y 0,30 el valor calculado para la temperatura máxima y mínima, respectivamente (Abbate et al., 2004). Se calculó el promedio de este DPV diario entre 30 días antes y 20 días después de la floración. iii) El número de días con temperaturas máximas superiores a los 35° C, en los 30 días centrados en floración, se utilizó como indicador del riesgo de reducción del rendimiento por daño debido a temperaturas muy altas (Maddonni, 2012).

En secano, también se calculó un indicador asociado a la oferta hídrica en floración. Se evaluó el rendimiento en grano logrado en función de lluvias próximas a floración (V8 a R3). Para evaluar el efecto de este indicador, se separó los lotes de acuerdo a la fecha de siembra (temprana o tardía, para antes o después del 15 de noviembre), y el contenido hídrico del perfil a V8. Separándose una condición de perfil “pobre” de una “buena”, cuando la suma del agua residual al 1° de abril y el 70% (como estimador de eficiencia de captación) del total acumulado de lluvias entre el 1° de abril hasta V8, superaba los 200 mm, considerados suficientes para una buena recarga en los dos primeros metros del perfil, según los datos medios de retención (Tabla 1).

Análisis de Frontera

Para describir la productividad del agua ofrecida se utilizó un método de regresión cuantil y se separó distintas situaciones de lote. Se ordenaron todos los casos desde la menor a la mayor oferta total de agua. Luego, se calculó la “media móvil” cada 21 casos (centrados en el undécimo) de la oferta total de agua y del percentil 95 de los rendimientos logrados (se expresan siempre corregidos a humedad comercial, 14.5%). En base al aumento, o no, de los rendimientos máximos obtenidos, se estableció un umbral de oferta total de agua a partir de la cual no se registraron aumentos, es decir la oferta mínima que permite alcanzar el “Techo de rendimiento”. Los lotes con oferta menor se hallan en la zona de respuesta. Aquellos con oferta mayor, que en todos los casos fueron lotes bajo riego, se denominan en el trabajo, y solo a los efectos del análisis de los datos, lotes con “Sobre Riego (SR)”. Para los lotes en la zona de respuesta se realizó una regresión lineal entre la media móvil de la

oferta total de agua y el percentil 95 de rendimiento, estableciendo así la “Frontera de máxima productividad”. De igual forma, pero con el percentil 5 de rendimiento, se calculó la “Frontera del Piso de productividad”, debajo de la cual se considera al lote un “Fracaso” (P) por causas infrecuentes. También se estableció una regresión a través del percentil 80 de rendimiento para separar los casos con mayor productividad del agua ofrecida, lotes techo (T), de los que logran una productividad media (M) sin caer debajo del piso. Las mismas categorías, Techo, Medios y Fracazos, se establecieron para los lotes “SR” en base a los percentiles 80 y 5 de sus rendimientos. Por último, dentro de la zona de respuesta se separó lotes en “Secano” y bajo “Riego”.

A partir de esta separación de lotes se realizó un análisis para detectar las posibles causas de las brechas de rendimiento en la zona de respuesta a la oferta total de agua para lotes en secano y con riego, y en la zona donde ya no hay respuesta para los lotes “SR”. Se evaluó las diferencias en el manejo entre los lotes “T”, y los lotes “M”. Se comparó la distribución, mediante estadística descriptiva con curvas de probabilidad acumulada, promedios y desvíos, de distintas variables climáticas, edáficas y de manejo para cada población.

Resultados

Los rendimientos fluctuaron entre 0 y 13000 kg.ha⁻¹, con un promedio de 6200 kg.ha⁻¹ ± 2900. La oferta total de agua fue de entre 400 y 1390 mm, con un promedio de 800 mm ± 260. El agua que deja el cultivo antecesor contribuyó en promedio con 105 mm ± 46, un 13 % del promedio de oferta total, y las precipitaciones en el barbecho entre el 1 de abril y la siembra en seco promediaron 130 mm ± 40, mientras que en riego fue de 90 mm ± 50. Las precipitaciones del resto del ciclo fueron de 374 mm ± 109 en seco y 361 mm ± 75 en riego. El riego desde el primero de abril a madurez fisiológica fue de 452 mm ± 151 mm, siendo 23 mm ± 20 el riego de pre-siembra (Tabla 2).

Tabla 2: Distribución de la oferta de agua (mm) para los 179 lotes, 92 en seco y 87 bajo riego. Agua remanente al 1 de abril (antecesor), lluvias entre esa fecha y la siembra (FS), y desde la siembra a madurez fisiológica (R6), riegos totales (desde el primero de abril a madurez fisiológica) y solo en pre-siembra.

Variable	n	Media	DE	Min	Max
Antecesor	179	105	46	13	190
Lluvias abr a FS para Secano	92	130	40	50	257
Lluvias abr a FS para Riego	87	90	50	14	253
Lluvias FS a R6 para Secano	92	374	109	204	625
Lluvias FS a R6 para Riego	87	361	75	143	509
Riego abr - R6	87	452	151	91	740
Riego Pre-siembra	87	23	20	0	117

Fronteras

Al ordenar los lotes de menor a mayor oferta total de agua, el rendimiento más alto para el percentil 95, 11925 kg.ha⁻¹, se obtuvo en los 21 lotes con ofertas inmediatamente debajo de 1030 mm. Debajo de ese umbral empírico hubo 135 lotes, 82 en seco y 53 bajo riego, en los que se observó un aumento consistente de los rendimientos máximos (percentil 95) con el aumento de la oferta (Figura 3). A partir de 1030 mm de oferta se ubicaron 44 lotes regados, y no hubo aumentos de los rendimientos máximos (en adelante lotes “SR”). El percentil 80 de esos lotes, 10505 kg/ha, destaca 9 lotes de alto rinde (T), y el percentil 5,

4445 kg.ha⁻¹, a tres lotes de muy bajo rinde (P). Dentro de la zona de respuesta a la oferta total de agua (< a 1030 mm) la regresión ajustada al percentil 95 del rendimiento, estimación de la frontera de máxima productividad, tuvo una pendiente de 12.7 kg de maíz por mm de agua y una origen a la abscisa (intercepción del eje X, oferta, cuando el rendimiento predicho, eje Y, es 0) de 60 mm. La regresión ajustada al percentil 80, utilizado para separar los lotes cercanos a la frontera (T), tuvo una pendiente de 12.1 kg de maíz por mm, con una intercepción a abscisas de 125 mm y fue superada por 35 lotes. La regresión sobre el percentil 5 tuvo una pendiente de 9.1 kg de maíz por mm y origen a la abscisa de 375 mm, separando 8 casos muy alejados de la frontera (P).

Los lotes de secano tuvieron una oferta de entre 407 y 855 mm, con un promedio de 4250 ± 2161 Kg/ha, 19 lotes se ubicaron en la población techo, 67 en la medio y 6 en la fracaso. Los lotes bajo riego que no superaron una oferta de 1030 mm, tuvieron en promedio una oferta de 898 mm, con un promedio 8032 ± 2109 kg/ha, 16 lotes se ubicaron en la población techo, 24 en la medio y 3 en la fracaso (tabla 3). Todos los lotes de más de 1030 mm de oferta fueron lotes regados, alcanzado una oferta máxima de 1390 mm, y tuvieron un rendimiento medio de 8406 ± 2213.

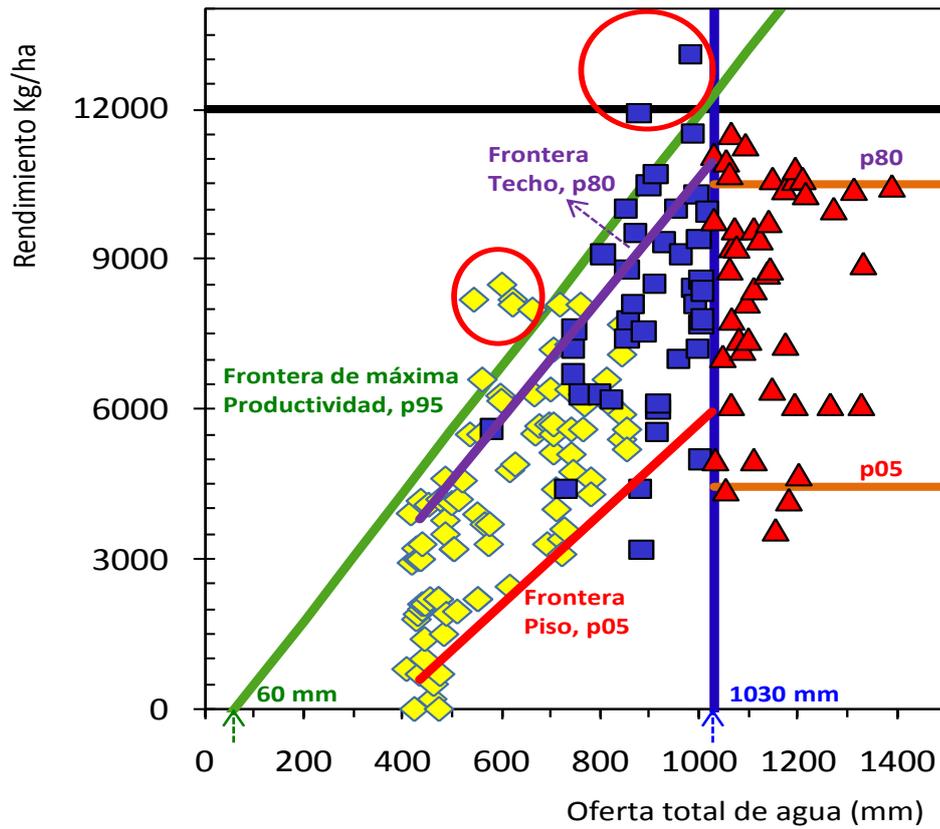


Figura 3: Relación entre la oferta total de agua (suma del remanente del cultivo anterior más las lluvias y los riegos hasta la madurez fisiológica en cada lote), en mm, y el rendimiento, en kg/ha, para los 179 lotes analizados. Con 1030 mm de oferta se logra alcanzar un rendimiento, 12000 kg/ha, que no es superado con ofertas mayores. Se identifican lotes en seco (rombos amarillos), y lotes bajo riego, por debajo o por sobre esa oferta total (cuadrados azules y triángulos rojos, respectivamente). Debajo del umbral de oferta se ajustó una frontera de máxima productividad en base al percentil 95 de los rendimientos (pendiente 12.7 kg/mm, ordenada a abscisas de 60 mm). Se separan lotes con rendimientos extremadamente bajos y raros delimitando una frontera “piso” en base al percentil 5 de los rendimientos. Los lotes con rendimientos “cercaños” a la frontera de máxima producción se separan mediante una frontera “techo” ajustada al percentil 80 de los rendimientos (ver texto para mayor detalle). Los círculos rojos solo resaltan dos conjuntos de lotes con productividades del agua superiores a la frontera ajustada a los datos.

Tabla 3: Número de lotes asignado a las distintas condiciones de oferta y categorías de rendimiento logrado (ver Figura 3 y texto para más detalles).

Zona	Umbral de oferta	Condición	Categorías	n
Respuesta	< 1030 mm	Secano	Techo	19
			Medio	67
			Fracaso	6
		Riego	Techo	16
			Medio	24
			Fracaso	3
No respuesta	> 1030 mm	Sobre Riego	Techo	9
			Medio	32
			Fracaso	3

Brechas de productividad

Fecha de siembra

Las siembras en secano (12 de noviembre \pm 23 días) fueron más tardías que las de riego (16 de octubre \pm 26 días), y estas también fueron un poco más tardías que las de “SR” (28 de septiembre \pm 21 días, Figura 4). La siembra demorada, entre mediados de noviembre y principios de diciembre, aumentó la frecuencia de lotes con alta productividad del agua ofrecida en secano y bajo riego con oferta acotada. Mientras que casi la mitad de los lotes T en secano se sembró entre el 16 de noviembre y el 5 de diciembre, más de la mitad de los lotes M se sembró entre el 11 de octubre y esa fecha (Tabla 4). Bajo riego, las pocas siembras posteriores al 15 de noviembre fueron una mayor proporción de los lotes T, que de los lotes M, y un 58% de los lotes M se sembró entre el 5 de octubre y esa fecha (Tabla 4). Los lotes posteriores al 5 de diciembre tuvieron frecuentemente baja productividad, y también muy bajo rinde, en secano y bajo riego. En “SR” las diferencias entre lotes que se acercan y los que se alejan de la frontera solo se observan en fechas tempranas. Los lotes sembrados antes del 10 de septiembre constituyen un tercio de los lotes “T” y solo un decimo de los lotes “M”. (Figura 4).

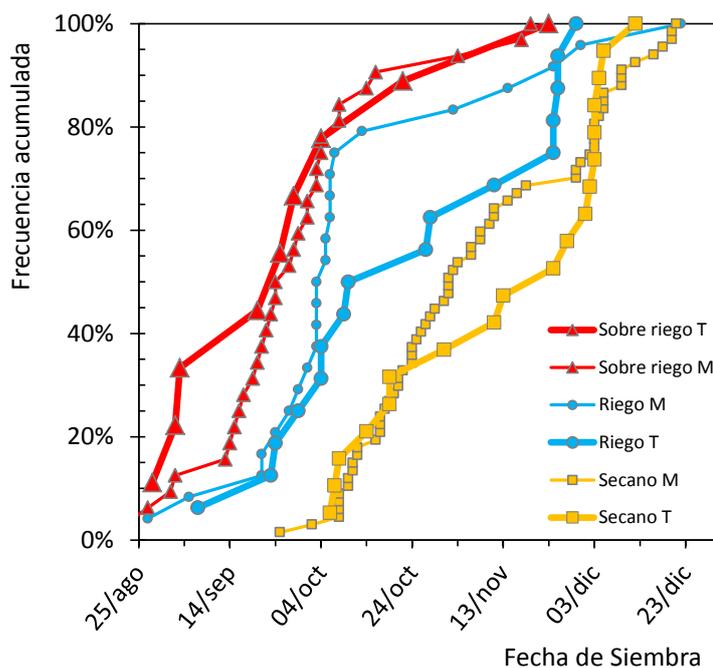


Figura 4: Frecuencias acumuladas para las fechas de siembra observadas en las situaciones de Secano (cuadrados amarillos), Riego (círculos celestes) y Sobre riego (triángulos Rojos) en el conjunto de lotes pertenecientes al Techo (símbolos grandes y líneas gruesas) y Medio (símbolos pequeños y líneas finas) de productividad del agua.

Tabla 4: Frecuencia relativa en distintas fechas de siembra, de lotes cercanos (Techo) y más alejados (Medio) de la frontera en secano y bajo riego (con oferta menor a 1030 mm).

Clase	Fechas de siembra								
	n	Secano				Riego (<1030 mm)			
		<11 oct	11 oct 15 nov	16 nov 5 dic	>5 dic	N	<5 oct	5 oct 15 nov	>15 nov ^a
Techo	19	16%	32%	47%	5%	16	25%	44%	31%
Medio	67	12%	54%	21%	13%	24	29%	58%	13%

^a solo un lote posterior al 1 dic. era clase Medio.

Densidad de plantas logradas

La densidad de plantas logradas fue levemente mayor en los lotes sobre regados ($75000 \text{ pl. ha}^{-1} \pm 3900$) que en los regados ($72700 \text{ pl. ha}^{-1} \pm 8300$) y, en ambas, mucho mayor que en secano ($56600 \text{ pl. ha}^{-1} \pm 3000$). Mientras que en secano y riego las densidades de siembra de lotes cercanos o lejanos a la frontera fue similar (Figura 5, líneas amarillas y celestes respectivamente), en sobre riego (Figura 5, líneas rojas), la diferencia entre el promedio de la población que se acerca (“T”) y el que se aleja (“M”) de la frontera fue levemente mayor a favor de los lotes de mayor productividad (2000 plantas más logradas). Todas las diferencias en plantas logradas se debieron a cambios en la decisión de siembra, dado que no se observaron diferencias en los porcentajes de logros (datos no mostrados).

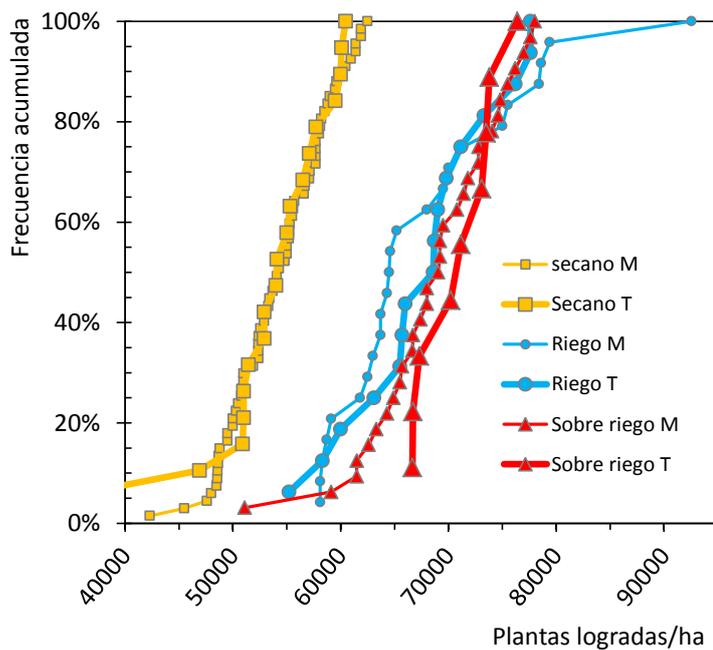


Figura 5: Frecuencias acumuladas para la densidad de plantas logradas en situaciones de Secano (cuadrados amarillos), Riego (círculos celestes) y Sobre riego (triángulos rojos) en el conjunto de lotes pertenecientes al Techo (símbolos grandes y líneas gruesas) y Medio (símbolos chicos y líneas finas) de productividad del agua.

Cociente fototermal, temperaturas extremas y déficit de presión de vapor

El cociente fototermal (Q), calculado 15 días antes y 15 días después de floración, fue similar para planteos de riego y secano ($1,49$ y $1,46 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, respectivamente) (Figura 6 a), aun cuando las fechas de siembra fueron más tardías en secano. Ese resultado se debe a que para floraciones entre principios de enero y principios de febrero las condiciones de radiación y temperatura no son muy diferentes en San Luis (Figura 2). Solo se exploran cocientes fototermales un poco más altos ($1,54 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$), aquellos lotes sembrados en septiembre en el campo del oeste, San Bernardo, que posibilitan floraciones de diciembre (todos ellos están dentro de la categoría sobre riego) (Figura 6 a). Sin embargo, en las tres situaciones de oferta hídrica, los lotes con mejor productividad tuvieron cocientes fototermales un poco más bajos (Figura 6 a).

En secano, sembrados más tarde, y en Sobre Riego, con siembras más tempranas, hubo una menor exposición durante el período crítico a las muy altas temperaturas, temperaturas máximas superiores a 35°C , que bajo riego (Figura 6 b). En secano y Sobre Riego los lotes con más de una semana de exposición a altas temperaturas se ubicaron lejos de la frontera. En cambio, bajo riego los lotes con muy baja exposición a alta temperatura se ubicaron lejos de la frontera, no habiendo diferencias en los más expuestos.

El déficit de presión de vapor (DPV), calculado 30 días antes y 20 días después de la floración, fue menor en secano, siembras más tardías, que bajo riego. Sin embargo, no hubo diferencias en este indicador entre los lotes cercanos y lejanos de la frontera bajo las tres situaciones de oferta hídrica (Figura, 6 c).

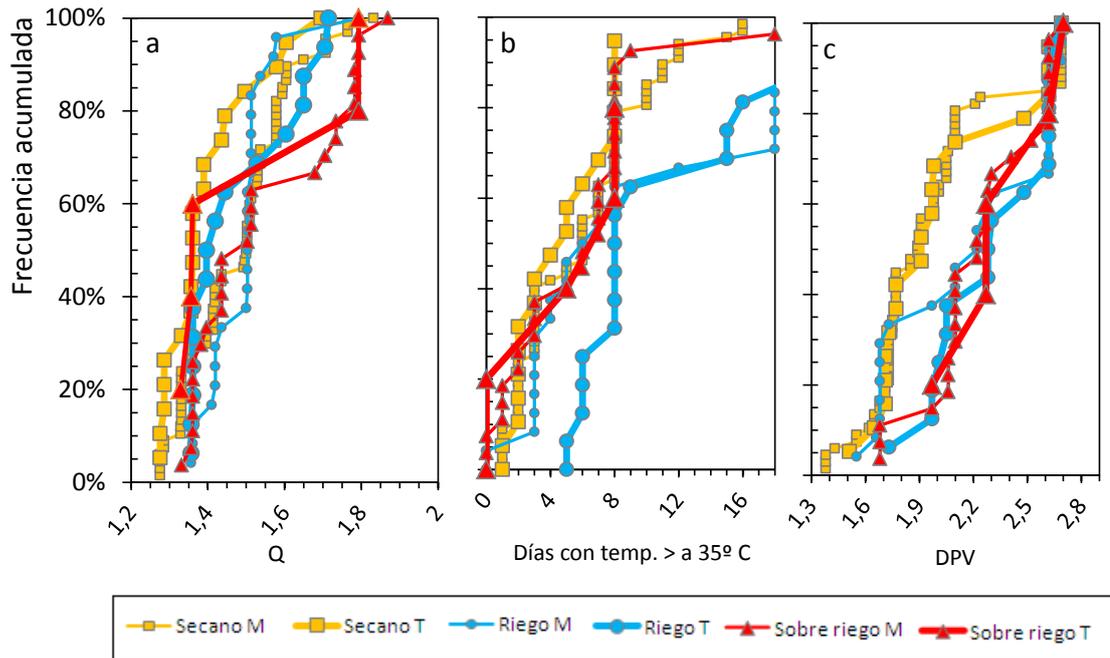


Figura 6: Frecuencia acumulada de: a) el cociente fototermal “Q”, b) el numero de días con temperaturas máximas mayores a 35°C y, c) el déficit de presión de vapor medio diario “DPV”, para la ventana crítica de los cultivos en Secano (cuadrados amarillos), Riego (círculos celestes) y Sobre riego (triángulos Rojos) en el conjunto de lotes pertenecientes al Techo (símbolos grandes y líneas gruesas) y Medio (símbolos pequeños y líneas finas) de productividad del agua.

Distribución del agua en lotes en secano

La oferta total de agua para los lotes en secano cercanos y lejanos a la frontera fue similar, 598 ± 100 mm y 610 ± 146 mm respectivamente. Sin embargo, la distribución de las lluvias fue mejor en aquellos lotes próximos a la frontera de productividad (Figura 7). Tanto los lotes que se acercaron a la frontera, “T”, como los que se alejaron, “M”, iniciaron el periodo de recarga del perfil (1 abril) con la misma oferta de agua residual del cultivo antecesor. Los casos “T” recibieron más agua previo a V8 que los casos “M” (307 mm y 280 mm, respectivamente), la misma oferta en el periodo crítico (V8 y R3, 127 mm y 135

mm respectivamente) y 30 mm menos en la etapa de llenado de granos (R3 a R6, 72 mm y 102 mm respectivamente).

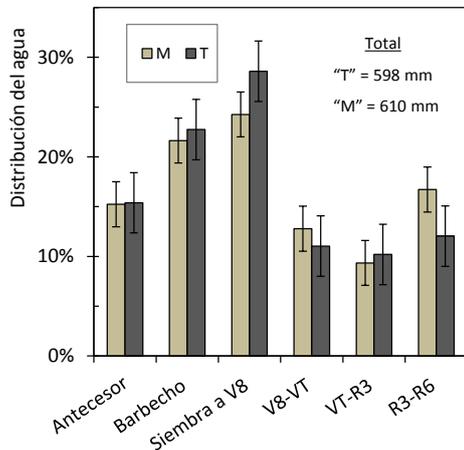


Figura 7: Contribución relativa a la oferta total de agua del remanente del cultivo antecesor y las precipitaciones a lo largo del ciclo del cultivo para lotes de secano que pertenecen al Medio (columnas claras) y al Techo (columnas oscuras) de productividad del agua. La longitud de las barras de

Las lluvias en el período crítico, entre V8 y R3, tuvieron una asociación positiva con el rendimiento en secano (Figura 8). En siembras tempranas y con una pobre recarga inicial la ocurrencia de al menos 150 mm de lluvia en la ventana crítica fue esencial para no tener alta frecuencia de lotes con rendimientos menores a 2000 kg.ha⁻¹ (Figura 8 a). En siembras tempranas pero con “buena recarga”, más de 200 mm (Figura 8 b), la frecuencia de rendimientos menores a 2000 kg.ha⁻¹ con menos de 150 mm fue mucho menor que en siembras tempranas con “pobre recarga” (Figura 8 a). En siembras tardías, que siempre alcanzaron “buena recarga”, los rendimientos nunca estuvieron por debajo de los 2000 kg.ha⁻¹ aunque la oferta alrededor de la floración fuese menor a 150 mm (Figura 8 c). Este umbral es similar al que surge de un análisis realizado para la región pampeana (Calviño et al. 2003), que muestra que con 155 mm en la ventana crítica (- 30 + 20 días respecto a floración) se alcanza en el 85 % del rendimiento máximo.

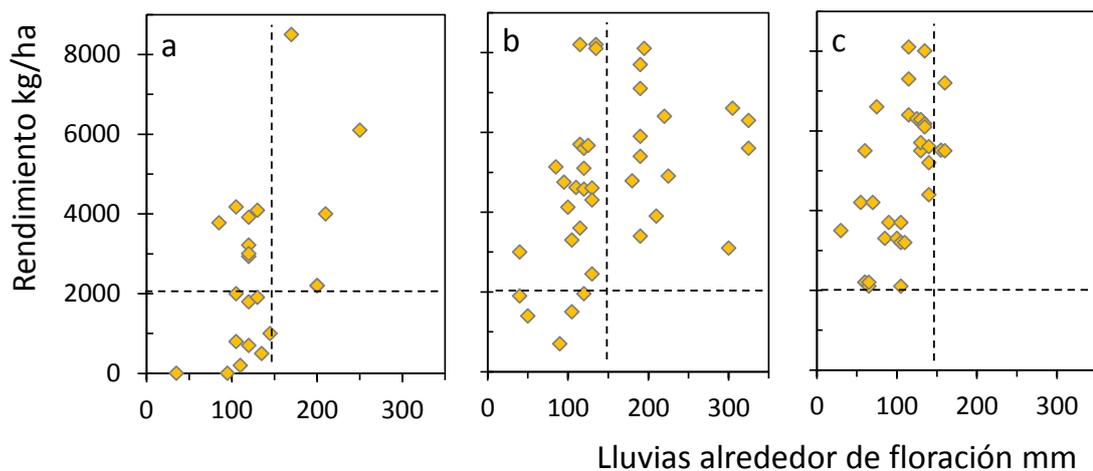


Figura 8: Rendimiento en función de la lluvia alrededor de la floración para siembras tempranas (antes del 15/11, promedio 22/10) con una pobre (a) o buena (b) recarga inicial del perfil y, siembras tardías (desde el 15/11, promedio 6/12) (c). Se consideró con buena recarga inicial a aquellos lotes que sumaron más de 200 mm entre el agua útil residual del cultivo antecesor al 1° d abril y las lluvias desde esa fecha hasta el estado V8. Las líneas punteadas corresponden a lluvias de 150 mm y rendimientos de 2000 kg.ha⁻¹.

Distribución del agua bajo Riego y Sobre riego

La oferta total de agua para los lotes regados, sin incluir los de Sobre Riego, fue similar para los lotes techo y los lotes medio, 875 mm \pm 114 y 911 mm \pm 89 respectivamente. La distribución de agua de lluvia y de riego también fue bastante similar (Figuras 9 a y b). La única diferencia apreciable es que los lotes alejados de la frontera recibieron algo menos de lluvia en el barbecho, algo más de riego en el llenado y que entre V8 y VT la oferta de los lotes cercanos a la frontera estuvo mayormente compuesta por riego, en vez de lluvias.

De igual forma la oferta total de agua para los lotes sobre regados, con una oferta mayor a 1030 mm, fue similar para los que superaron el percentil 80 de rindes y los que estuvieron entre el percentil 80 y el 5, 1117 mm \pm 70 y 1149 mm \pm 96 respectivamente. Respecto a los lotes regados, los lotes sobre regados (24 casos para PDC y 17 casos para SB) recibieron unos 40 mm más de lluvias, distribuidos en forma similar, y recibieron además 180 mm más de riego, creciendo en forma marcada el riego entre siembra y V8 (Figura 9). Entre lotes de la población sobre regada no se observan diferencias en la distribución del agua entre los lotes que estuvieron en el techo y en la porción media de los rindes (Figura 9 c y d).

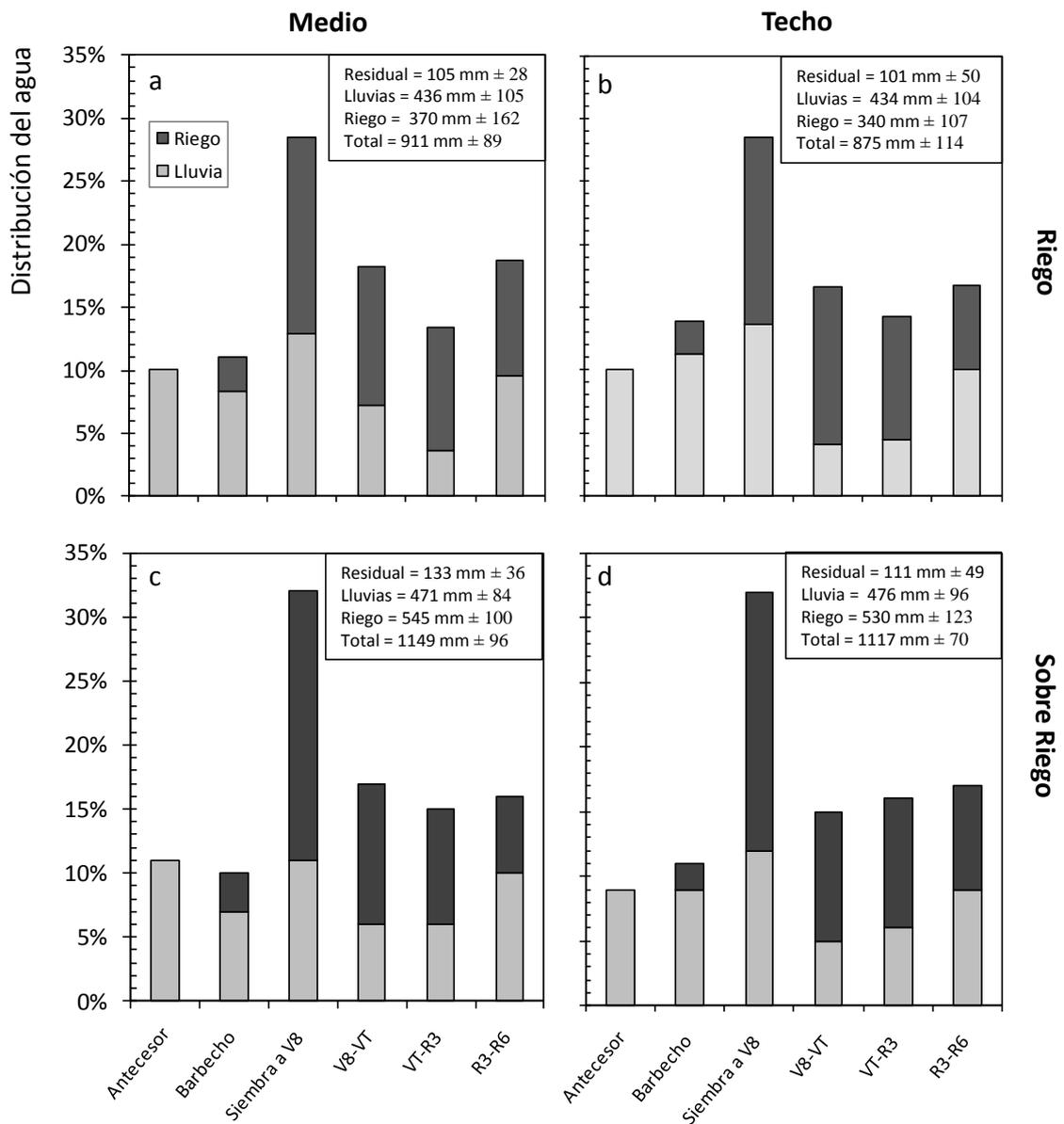


Figura 9: Contribución relativa a la oferta total de agua del remanente del antecesor y las precipitaciones y riegos a lo largo del ciclo del cultivo para lotes bajo riego (arriba) y sobre regados (abajo) que pertenecen al Medio(a y c, izquierda) y al Techo (b y d, derecha) de productividad del agua. En recuadro, dentro de cada panel, se presentan los promedios y desvíos del agua residual, lluvias, riego y del total de la oferta de ambos grupos de lotes (expresados en mm).

Estado hídrico del suelo bajo riego

La evaluación rutinaria del suelo por gravimetría muestra que los lotes con alta oferta de agua, “Sobre Regados”, comenzaron el ciclo con un contenido hídrico similar al de los

lotes “regados”. Alrededor de floración un tercio de los lotes sobre regados tuvieron más del 70% de agua en el perfil mientras que en lotes de riego, esa recarga fue menor al 20 %, coincidiendo con la diferencia de aporte de agua entre siembra y V8 (Figura 9). Un 40% de los lotes sobre regados finalizaron el ciclo con más del 70% de recarga, y solo un 20% bajo riego (Figura 10). Los lotes de ambos grupos que se ubicaron cercanos a la frontera, tuvieron mayor contenido de agua en el perfil en la determinación más temprana (Figura 10 a y b). Alrededor de floración los lotes regados que estuvieron próximos a la frontera tuvieron un 5 % de agua útil menos (Figura 10 c), por eso, y de acuerdo al esquema de manejo del campo, también recibieron más riego en esa etapa (Figura 9 a y b). Los lotes regados de alta productividad también finalizaron el ciclo con algo más de agua (4%), hubo pocos casos con menos del 40% de agua en el perfil (Figura 9 e). En los Sobre Regados los lotes de alta productividad tuvieron algo más de agua en floración (12%) (Figura 10 d) y ninguno de ellos terminó con menos del 40% de agua (Figura 10 f).

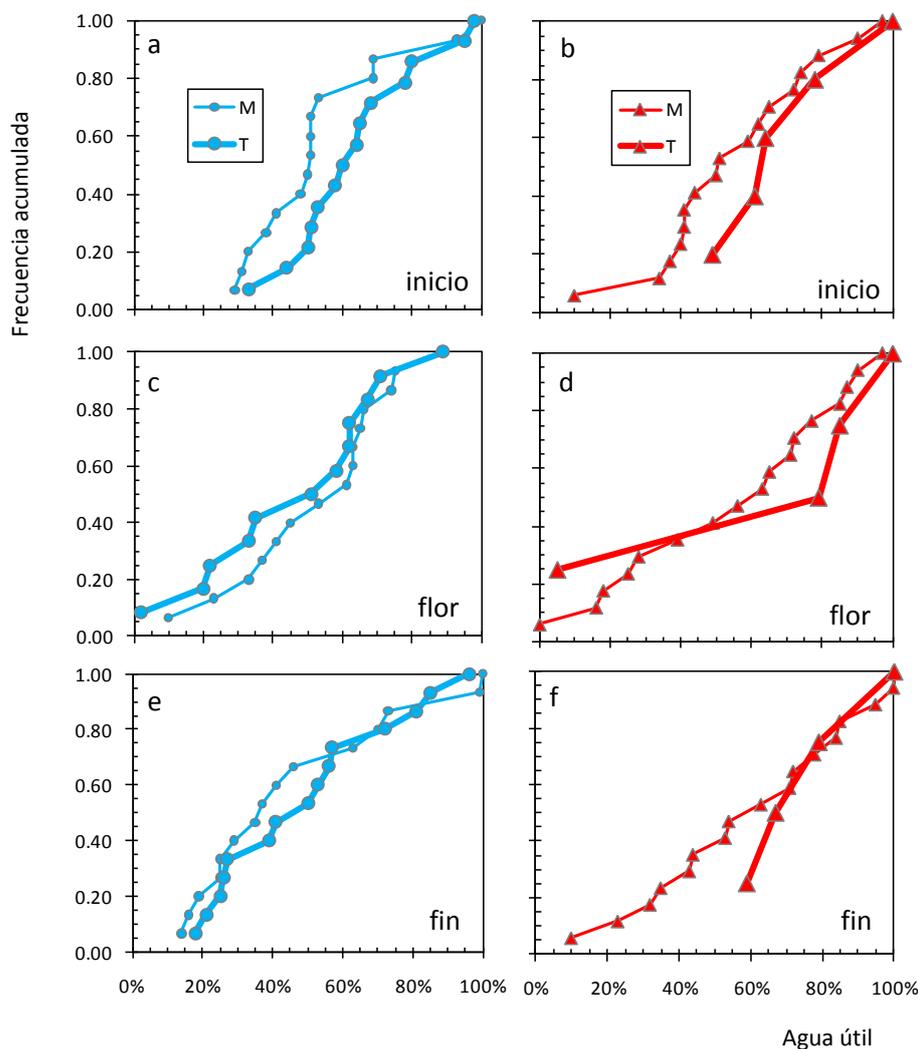


Figura10: Frecuencia acumulada de los contenidos de agua útil estimados por gravimetría en el inicio del ciclo (inicio, a y b) alrededor de la floración (flor, c y d) y en madurez fisiológica (fin, e y f) para la población “riego” (a, c y e) y sobre riego (b, d y f) para los lotes cercanos (T, líneas gruesas) y lejanos a la frontera (M, líneas finas).

Disponibilidad tecnológica en riego

El mayor número de posiciones que riega un equipo y una posición más relegada para el manejo del maíz en la campaña no fue determinante de una reducción de la productividad del agua ofrecida. Más aún, en la segunda posición de dos o de tres posiciones que riega un equipo, en la que hay una subordinación a la decisión de dejar de regar la primer posición, fueron más frecuentes los casos de alta productividad que de baja productividad. Por el contrario, cuando el maíz fue la primera posición la frecuencia de casos de baja productividad fue mayor (Figura 12). Mientras que los maíces de primera posición del equipo de riego son de siembras tempranas, los de segunda y tercer posición corresponden a siembras tardías.

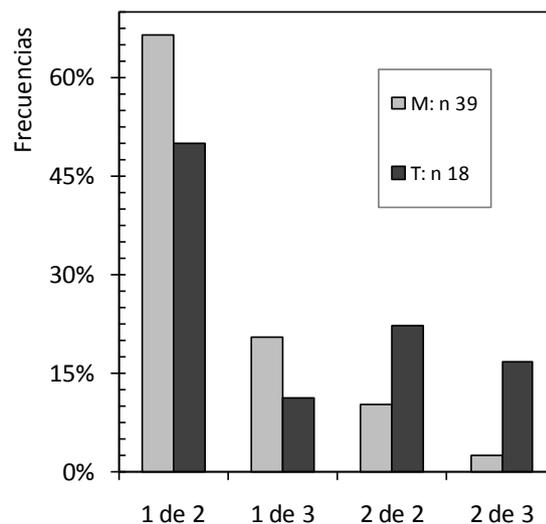


Figura 11: Disponibilidad tecnológica de riego. Sobre eje X se encuentra el número de posiciones que riega un equipo y la posición que se encuentra regando.

Respuesta a la fertilización nitrogenada

El 70 % de los lotes tuvo, en los primeros 60 cm del suelo, entre 25 y 75 kg N-NO³.ha⁻¹ a la siembra y no hubo ninguna diferencia entre los lotes en secano con los de riego, ni entre los lotes que luego obtuvieron buena o baja productividad del agua (Figura 13 a). En cambio, el 80 % de los casos bajo riego fueron fertilizados con más de 50 kg de N.ha⁻¹, con un promedio de 106 ± 51 kg.ha⁻¹, mientras que el 80% de los lotes en secano recibió menos

que esa dosis, con un promedio de $30 \pm 21 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, (Figura 13 b). Como consecuencia el nitrógeno disponible, la suma del N de nitratos en el suelo a la siembra más el agregado en los fertilizantes fue muy distinto en riego y secano (Figura 13 c). Bajo los tres escenarios, los lotes que obtuvieron mayor productividad del agua fueron los de mayor disponibilidad de nitrógeno (Figura 13 c, Tabla 4). En secano la diferencia es pequeña pero consistente, en riego y sobre riego fue de mayor magnitud y estuvo asociada a la mayor fertilización en esos lotes (Figura 13 b). Sin embargo, en sobre riego también se observa que una proporción de lotes que partieron de una oferta muy alta de nitrógeno, no se ubicó entre los lotes de mayor productividad del agua (Figura 13 a).

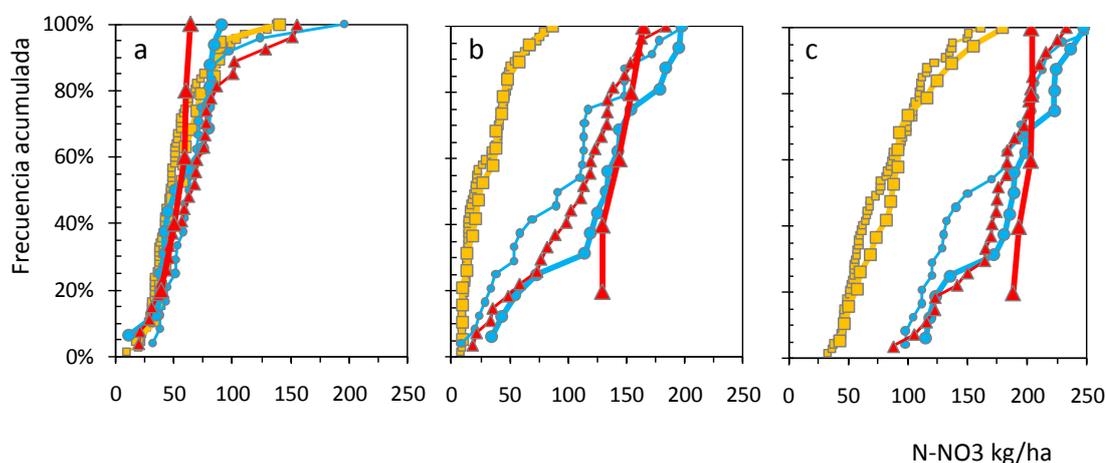


Figura 12: Frecuencia acumulada de: (a) Nitrógeno del suelo disponible a la siembra; (b) nitrógeno disponible del fertilizante y (c) nitrógeno disponible total (suelo + fertilizante), de los cultivos en Secano (Cuadrados amarillos), Riego (Círculos celestes) y Sobre riego (triángulos Rojos) en el conjunto de lotes pertenecientes al Techo (símbolos grandes y líneas gruesas) y Medio (símbolos chicos y líneas finas) de productividad del agua.

Tabla 5: Medidas estadísticas resumen para la variable “N disponible” (N suelo, “s” + N fertilizante, “f”), según las clases de mayor productividad (T) y menor productividad (M) del agua ofrecida en los distintos escenarios: secano, riego y sobre riego.

Escenario	Productividad	Variable	n	Media	D.E.	EE
Secano	M	N s + f	67	82	32	4
Secano	T	N s + f	19	92	37	8
Riego	M	N s + f	24	163	48	10
Riego	T	N s + f	16	186	42	10
Sobre riego	M	N s + f	27	173	37	7
Sobre riego	T	N s + f	5	196	5	2

Discusión

La producción de maíz en el centro de San Luis aumentó junto con el aumento de la oferta de agua hasta 1030 mm, alcanzando un techo de rendimiento de maíz cercano a 12 tn.ha^{-1} . Bajo ese umbral de oferta, el ajuste de la frontera de máxima productividad (French & Schultz 1984) indica que los mejores lotes combinan en promedio una eficiencia máxima de uso del agua transpirada para producir maíz de 12.7 kg.mm^{-1} con un mínimo no transpirado de agua de apenas 60 mm. En secano, con un rango de oferta desde 407 a 855 mm y un promedio de 597 mm, solo el 20% de los lotes tuvieron una elevada productividad, quedando cerca de la frontera. Bajo riego, para un rango de oferta desde 580 a los 1030 mm, con un promedio de 898 mm de los cuales 360 mm fueron regados, un 37% de los lotes fueron altamente productivos. Sin embargo, con ofertas mayores, logradas con más riego, no se registraron aumentos del rendimiento máximo y todos los lotes quedaron lejos de la proyección de frontera. El uso de fechas de siembra más tardías y de mayores niveles de fertilización nitrogenada son los componentes de manejo que más claramente acercaron los lotes de maíz en secano y bajo riego a esa frontera de máxima productividad del agua ofrecida. En secano, los lotes que lograron alta productividad recibieron una menor porción de la oferta hídrica tarde en el ciclo. Bajo riego (hasta una oferta de 1030 mm), los lotes de mayor productividad tuvieron una mayor proporción de la oferta en etapas críticas en forma de riego, en vez de lluvias, y se regaron menos el llenado tardío.

Establecer una frontera de productividad del agua ofrecida aporta puntos de referencia que pueden ser usados por agrónomos e investigadores a establecer metas de producción realistas para un entorno específico de riego y secano (Grassini et al., 2011). La productividad máxima del agua transpirada estimada para el centro de San Luis, $12,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ de grano, es inferior a los valores reportados para maíz en Nebraska-EEUU, $27,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (Grassini et al., 2009b y 2011), Balcarce-Argentina, $21.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (Monzón et al., 2012) y Catrilo-Argentina, $18,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (Faraldo et al., 2011). En Nebraska (Grassini et. al., 2009b y 2011) se usó una metodología similar sobre casos en riego y secano simulados con el modelo Hybrid-Maize, con buen comportamiento para simular lotes reales sin limitación por nutrientes ni pérdidas por adversidades. Las estimaciones en Balcarce y Catrilo surgen del cociente entre el rendimiento y la

evapotranspiración de cultivos en secano, simulados con rastrojos en 33 campañas con Cropsyst, que mostró una buena capacidad de explicar los rendimientos observados, en el primero (Monzón et al., 2012), y medidos en ensayos de franjas a campo en cinco campañas en el segundo (Faraldo et al., 2011, el valor máximo se estimó descartando dos años con baja productividad). En estos dos casos los valores serían menores a la eficiencia de uso del agua transpirada, porque incluyen pérdidas de agua que la ordenada a abscisas permite estimar tanto en San Luis como Nebraska. La pérdida estimada en Nebraska, 100 mm (Grassini et al 2009b), casi duplica a los 60 estimados en San Luis, que, siendo aún menor al agua remanente al fin del ciclo de los cultivos (105 ± 45 mm para el conjunto de lotes), parecen subestimados. Si las pérdidas fueran mayores, se reduce la transpiración y aumenta la eficiencia con que se transforma en grano en la frontera de productividad. Un pequeño conjunto de lotes que se ubica muy por sobre la frontera trazada (ver figura 3), también respaldan la posibilidad de una productividad mayor. Una comparación más correcta debe corregir las diferencias entre localidades en el déficit de presión de vapor (DPV), que en la medida que aumenta reduce la relación entre la ganancia de carbono y la pérdida de agua (Dardanelli et al., 2003). En Catriló y Nebraska, los valores de DPV del día son menores que los de San Luis, y son aún mucho menores en Balcarce (Tabla 5). Al corregir por las diferencias en DPV, las diferencias de San Luis con Balcarce y Catriló se hacen mínimas. En Nebraska en cambio, la productividad del agua transpirada sigue superando la obtenida en este trabajo y también apoya la idea de que una mejor es posible. Por el amplio rango de oferta de agua explorado, la frontera definida podría utilizarse como una meta a superar no solo en el centro de San Luis, sino también en una amplia zona de producción de maíz en el oeste y sur de Córdoba, que se asemeja en varios componentes de la oferta ambiental y del tipo de planteos de producción.

Tabla 6: Productividad del agua transpirada (San Luis y Nebraska) o evapotranspirada (Balcarce y Catriló) en el ciclo del cultivo de maíz para producir grano (Prod. $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$), déficit de presión de vapor durante el día (DPV día, kPa, valores medios para las fechas de floración en cada localidad, ver materiales y métodos para más detalles) y productividad del agua corregida por el DPV día (Prod_c ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{kPa}$)). Para las cinco localidades se presentan los valores máximos de productividad, que se podrían usar como frontera a alcanzar, y los valores medios de los casos estudiados.

Localidad	Autor	Publicación	DPV día kPa	Prod. ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$)		Prod _c ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{kPa}$)	
				Máxima	Media	Máxima	Media
Nebraska	Grassini	2009-2011	1.6	27.7	19.3	43.5	30.3
Catriló	Faraldo	2011	1.7	18.6	15.3	31.6	26.0
Sur Bs As	Monzón	2012	1.0	21.0	19.0	21.0	19.0
San Luis	este trabajo		2.1	12.7	9.4	26.7	19.7

El uso de fechas de siembras más tardías en maíz fue una de las claves de manejo para aumentar la productividad del agua en secano y bajo riego. La fecha de siembra modifica las restricciones que el ambiente impone a la producción de maíz en Argentina (Maddonni, 2012). Excepto en el campo más al oeste y cálido, donde bajo riego se exploran siembras más tempranas, y podrían explorarse más tardías, las siembras están restringidas hasta octubre por heladas tardías, y desde principios de diciembre, por heladas tempranas. Por eso las floraciones ocurren desde los primeros días de enero hasta los primeros de febrero, sin que en promedio existan diferencias en el cociente fototermal para 30 días centrados en floración, la cantidad de días con muy altas temperaturas y, el déficit de presión de vapor, que entonces no fueron determinantes de las diferencias en productividad del agua en San Luis. Sin embargo, en secano las siembras más tempranas no pudieron usar eficientemente las lluvias que normalmente caen sobre el final del ciclo del cultivo. Además, con esas siembras un tercio de los lotes tenían mala recarga del perfil al inicio del cultivo, patrón común a muchas localidades de Argentina (Maddonni, 2012), quedando más expuestos a la variabilidad de las lluvias alrededor de floración (Calviño et al., 2003). Las diferencias en distribución de la oferta tiene efectos en la productividad del agua (Grassini et al., 2009 a) y las siembras tardías aseguraron una buena recarga inicial, más lluvias antes de floración y menos sobre el final del ciclo.

El aumento de la fertilización nitrogenada fue la otra variable de manejo clave para aumentar la productividad del agua. Una adecuada nutrición nitrogenada reduce la brecha

entre la frontera de productividad del agua en trigo y en girasol (French y Schultz 1984, Grassini et al., 2009b). La respuesta del cultivo de maíz a la fertilización con nitrógeno en condiciones de deficiencia suele ser muy grande (Echeverría y Sainz Rosas, 2006) y es necesario adecuar la fertilización a las necesidades que demanda el cultivo según el ambiente que este explora (Salvagiotti et al., 2000). Los resultados del presente trabajo muestran que la oferta de nitrógeno en los lotes que tuvieron alta productividad del agua fue mayor. La diferencia fue consistente en secano y en riego pero más acentuada en riego, donde las dosis de fertilización fueron mucho mayores. Posiblemente esta diferencia explique, en parte, la mayor proporción de lotes con alta productividad del agua bajo riego que en secano. Una forma de definir la dosis de nitrógeno es utilizar un modelo de balance (Echeverría y Sainz Rosas, 2006). El presente trabajo permitiría ajustar la demanda del cultivo de acuerdo al rendimiento esperable calculado a partir de la frontera de productividad trazada y la variabilidad esperable en la oferta de agua. Sin embargo, satisfacer la demanda de nitrógeno en un ambiente con fuerte variabilidad de oferta hídrica expone a los productores a un elevado riesgo y ayuda a entender por qué los productores no maximizan la productividad del agua (Sadras y Rodríguez, 2010). Por eso mejorar la productividad del agua ajustando la fertilización en riego sería un camino más seguro que en secano, aunque en siembras tardías, la diferencia sería menor.

Una estrategia adecuada de riego es crítica para que regar en el semiárido argentino sea una tecnología rentable, que use el agua con eficiencia, y a la vez no genere problemas ambientales. La estrategia de riego que se implementa en los campos estudiados persigue maximizar el beneficio económico satisfaciendo la demanda del cultivo, pero sin regar en exceso. Es la estrategia más difundida mundialmente y para la cual el correcto cálculo de los requerimientos calibrando localmente la metodología de FAO (Allen et al. 1998) es un componente central del plan de riego. Sin embargo, a diferencia de las zonas áridas, la variabilidad del aporte de lluvias en las semiáridas genera por un lado un ahorro de agua, pero por otro, un problema para ajustar el riego al déficit que experimentará el cultivo que, a diferencia de las zonas más húmedas, en pocos días puede llegar a generar una elevada pérdida de rendimiento. Esa dificultad explica porque algunos de los lotes evaluados recibieron más agua de la que después usaron con eficiencia. Sin embargo, merced a un manejo eficiente, utilizando dos y hasta tres posiciones de los equipos el riego, la inversión en fertilizantes y otras tecnologías resultó más segura que en secano y, hasta los 1030 mm

de oferta, aumentó la proporción de lotes con alta productividad del agua. En los últimos años crece en el mundo la implementación de estrategias que procuran aumentar aún más la eficiencia el uso del agua, conocidas como riego deficitario, y que solo evitan los déficit en las etapas que con más impacto en el rendimiento (Connor et al. 2011). Para los planteos de maíz de Nebraska una buena condición de humedad en el perfil del suelo al inicio del ciclo y un riego centrado en el periodo crítico del cultivo aumenta la productividad del agua (Payero et al., 2009). Por la variabilidad de las lluvias, el riego deficitario se implementó en algunos de los lotes evaluados dado que, al procurar no regar demás en el llenado, más de la mitad llega a madurez con menos del 50% de recarga en el perfil. Sin embargo, mientras que los lotes con más productividad del agua recibieron en promedio menos riego en el llenado, entre los lotes con menos productividad estaban también los que terminaron con menos agua en el perfil, poniendo de manifiesto el delicado compromiso que se enfrenta en la región y la necesidad de desarrollar localmente estrategias de riego para un uso más eficiente del agua.

El exceso de riego, además de generar una menor productividad del agua y mayores costos, puede generar en el largo plazo problemas ambientales. Como consecuencia de reemplazar la vegetación natural por agricultura en zonas semiáridas aumenta el drenaje profundo que arrastra sales y hace subir la napa freática, provocando en un caso extremo como el australiano la pérdida de millones de hectáreas agrícolas (Scanlon et al. 2007). En algunos sitios de San Luis se ha observado este proceso con la particularidad de que ha generado nuevos ríos en forma repentina y daños a la infraestructura (Contreras et al. 2012). Un 20% de los lotes con riego y un 40% de los sobre regados quedó con más del 70% de recarga al final del ciclo, que si bien podría ser usado en el próximo cultivo, aumenta las probabilidades de perder agua en profundidad. El uso de estrategias donde, por seguridad de producción se riegue en exceso, podría acentuar este proceso. La expansión del riego en el semiárido del centro de Argentina requiere de un fuerte apoyo para elegir las mejores tecnologías de manejo y crear estrategias más eficientes. En este trabajo se identificaron algunas de las tecnologías que podrían tener un alto impacto.

Conclusiones

El rendimiento del maíz en el centro del cordón semiárido argentino aumenta con la oferta de agua pero hay muchos lotes con baja productividad de esa oferta y casos con riego donde la oferta excede la que se puede transformar con eficiencia en mayores rindes. Este trabajo brinda elementos para acotar la cantidad de agua agregada y para establecer estrategias que maximicen la productividad del agua ofrecida. La utilización de siembras tardías, al mejorar la recarga inicial, reducir la demanda en el período crítico y mejorar la distribución de las lluvias en el ciclo, permitió una mayor productividad del agua en riego y en secano. El aumento de la fertilización nitrogenada fue otra de las claves para lograr una mejor conversión del agua en rendimiento.

Regar, con una oferta máxima acotada, aumentó la proporción de lotes cercanos a la frontera y fue posible lograr altas productividades del agua en ambientes donde no se lograron en secano. Bajo riego, donde por seguridad en la inversión se utilizan dosis mayores de nitrógeno, su contribución a reducir la brecha fue más importante. Los lotes regados próximos a la frontera tuvieron un mayor aporte de agua antes de la floración y poco riego sobre el fin del llenado de granos. Sin embargo, también se halló que los que llegaron a madurez con muy poca agua fueron menos productivos. En regiones semiáridas, donde la escasa y variable oferta de lluvias aumenta la variabilidad de rendimiento en secano y dificulta el logro de una estrategia eficiente de riego, es imprescindible el desarrollo local de tecnologías de manejo que enfrenten ese desafío. En este estudio hemos puesto en evidencia algunos caminos que llevan a la mejora de la productividad del agua pero aún falta mucho por aprender.

Bibliografía

- Abbate, P.E., J.L. Dardanelli, M.G. Cantarero, M. Maturano, R.J.M. Melchiori y E.E. Suero. 2004. Climatic and water availability effects on water-use efficiency in wheat. *Crop Science*, 44(2), 474-483.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, y M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration -Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300, 6541.
- Andrade, F. H. 2011. La tecnología y la producción agrícola. Ediciones INTA Centro regional Buenos Aires Sur, Balcarce.
- Bongiovanni, R., N. Barberis, y J.M. Simondi. 2011. Estudios sociales del riego en la agricultura argentina. Omar Miranda (Ed.), Ediciones INTA, pp. 303-318.
- Calviño, P.A., F.H. Andrade, V.O. Sadras. 2003. Maize yield as affected by water availability, soil depth and crop management. *Agron. J.* 95, 275–281.
- Calviño, P., y J. P. Monzón. 2009. Farming systems of Argentina: yield constraints and risk management. *Crop physiology. Applications for genetic improvement and agronomy.* Academic Press, Amsterdam, 55-70.
- Connor, D.J., R.S. Loomis y K.G. Cassman. 2011. *Crop Ecology. Productivity and Management in Agricultural Systems.* CUP, Cambridge, UK. 554 pgs.
- Contreras, S., C.S. Santoni y E.G. Jobbágy. 2012. Abrupt watercourse formation in a semiarid sedimentary landscape of central Argentina: the roles of forest clearing, rainfall variability and seismic activity. *Ecohydrology*, 6:794-805.
- Dardanelli, J.L., D.J. Collino, M.E. Otegui, y V.O. Sadras. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano, p. 375-440, In E. H. Satorre, et al., eds. *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo.* Editorial Facultad de Agronomía, UBA., Bs. As.
- Echeverría, H.E. y H. Sainz Rosas. 2006. Maíz. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos.* Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Faraldo, M. L., Vergara, G. T., Casagrande, G. A., Arnaiz, J. P., Mirasson, H., & Ferrero, C. (2011). Eficiencia en el uso del agua del agua y radiación en maíz, girasol y soja, en la región oriental de La Pampa, Argentina. *Agronomía Trop*, 61(1), 47-57.

- French, R. J., & Schultz, J. E. 1984 a. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean - type environment. I. The relation between yield, water use and climate. *Crop and Pasture Science*, 35(6), 743-764.
- French, R.J. y J.E. Schultz. 1984 b. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean type environment. II. Some limitations to efficiencies. *Aust. J. Agric. Res.* 35, 765-775.
- Grassini, P., A.J. Hall y J.L. Mercau. 2009a. Benchmarking sunflower water productivity in semiarid environments. *Field Crops Res.* 110, 251–262.
- Grassini, P., H. Yang, y K.G. Cassman. 2009b. Limits to maize productivity in Western Corn-Belt: a simulation analysis for fully irrigated and rainfed conditions. *Agricultural and forest meteorology*, 149(8), 1254-1265.
- Grassini, P., J. Thorburn, C. Burr, y K.G. Cassman. 2011b. High-yield irrigated maize in the Western US Corn Belt: I. On-farm yield, yield potential, and impact of agronomic practices. *Field crops research*, 120(1), 142-150.
- Grassini, P., H. Yang, S. Irmak, J. Thorburn, C. Burr, y K.G. Cassman. 2011a. High-yield irrigated maize in the Western US Corn Belt: II. Irrigation management and crop water productivity. *Field crops research*, 120(1), 133-141.
- Grassini, P., J.P. Monzón, F. Aramburu, F. Andrade, J.L. Mercau, E.G. Jobbágy, M.A. Taboada y A. Hall. 2013. Desarrollando un Atlas de Brechas de Rendimiento con relevancia local y global. En *Maíz en Siembra Directa*. Revista técnica de AAPRESID. 5-14.
- Maddoni, G.A. 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina - a probabilistic approach. *Theoretical and Applied Climatology*, 107(3-4), 325-345.
- Monzón, J.P., V.O. Sadras, y F.H. Andrade. 2012. Modelled yield and water use efficiency of maize in response to crop management and Southern Oscillation Index in a soil-climate transect in Argentina. *Field Crops Research*, 130, 8-18.
- Passioura, J. (2006). Increasing crop productivity when water is scarce - from breeding to field management. *Agricultural water management*, 80(1), 176-196.
- Payero, J.O., D.D. Tarkalson, S. Irmak, D. Davison, y J.L. Petersen. 2009. Effect of timing of a deficit-irrigation allocation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency and dry mass. *Agricultural water management*, 96(10), 1387-1397.

- Pengue, W. A. 2006. Agua virtual, agronegocio sojero y cuestiones económico ambientales futuras. En *Ambiente y Sociedad*.
- Sadras, V.O., y D. Rodríguez. 2010. Modelling the nitrogen-driven trade-off between nitrogen utilisation efficiency and water use efficiency of wheat in eastern Australia. *Field crops research*, 118(3), 297-305.
- Saénz, C.A., J.C. Colazo, y E.O. Montiel. 2011. Disponibilidad de recursos hídricos y potencial de riego de la provincia de San Luis. INTA EEA San Luis.
- Salvagiotti, F., H.M. Pedrol, y J. Castellarín. 2000. Utilización del método del balance de nitrógeno para la recomendación de la fertilización nitrogenada en maíz. *Informaciones agronómicas, Instituto de la potasa y el fósforo, Inpofos*, 38, 11-13.
- Scanlon B.R., I. Jolly I, M. Sophocleous y L. Zhang. 2007. Global impacts of conversion from natural to agricultural ecosystems on water resources: quantity versus quality. *Water Resources Research* 43: W03437. DOI:10.1029/2006WR005486
- Viglizzo, E.F. y E. Jobbágy. 2010. Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental. Buenos Aires: Ediciones INTA.
- Zwart, S. J., & Bastiaanssen, W. G. (2004). Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management*, 69(2), 115-133.