

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
DEPARTAMENTO DE AGRONOMÍA**



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

PROGRAMA BIOCENCIAS Y CIENCIAS AGROALIMENTARIAS

TESIS DOCTORAL

**Sistema de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina.
Brecha de rendimientos y productividad del agua en los cultivos de maíz
y algodón.**

AUTOR: GABRIEL AUGUSTO ANGELLA

DIRECTOR: ELÍAS FERERES CASTIEL

MARZO DE 2015

T TULO: *Sistema de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina.*
Brecha de rendimientos y productividad del agua en los cultivos de maíz y algodón.

AUTOR: *Gabriel Augusto Angella*

© Edita: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 2016
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

www.uco.es/publicaciones
publicaciones@uco.es



TÍTULO DE LA TESIS: Sistema de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina. Brecha de rendimientos y productividad del agua en los cultivos de maíz y algodón

DOCTORANDO: GABRIEL AUGUSTO ANGELA

INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS

(se hará mención a la evolución y desarrollo de la tesis, así como a trabajos y publicaciones derivados de la misma).

Esta tesis se fundamenta en más de seis años de trabajo experimental y de modelización realizado por el Ingeniero MSc Gabriel Angella, funcionario del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina. Este director visitó los experimentos en el año 2012 en la estación experimental del INTA de Santiago del Estero y comprobó la calidad de la experimentación llevada a cabo por G. Angella. La tesis tiene tres partes: la primera se centra en la calibración y validación del modelo de simulación de cultivos AquaCrop para maíz en las condiciones de Santiago del Estero. Para ello se realizaron tres grupos de experimentos entre 2007 y 2012, utilizándose unos para calibrar y otros para validar. Es la primera vez que el modelo se calibra con tanta riqueza de datos experimentales. Los resultados se enviaron a la revista Agronomy Journal (ASA, USA), que fue la que publicó en 2009 la primera versión del modelo y su calibración, artículos de los que es co-autor el director de esta tesis.

El segundo trabajo consiste en la calibración del modelo Aquacrop para el cultivo de algodón, utilizando experimentos realizados durante tres años (2010-2012). Los resultados han sido excelentes y serán enviados a la revista Field Crops Research (Elsevier), al tratarse de un sistema de producción muy novedoso y que el modelo ha simulado con mucha exactitud por primera vez.

El tercer trabajo aplica el modelo ya calibrado a mejorar la gestión del agua de una zona regable de Santiago del Estero, determinando la brecha de los rendimientos y la de la productividad del agua de riego. Igualmente se hacen recomendaciones para mejorar las prácticas de riego basadas en la nueva metodología desarrollada. En este caso, la síntesis de resultados obtenidos ha sido enviada como publicación a la revista Irrigation Science (Springer). Las tres revistas citadas se cuentan entre las más prestigiosas en los campos de la agronomía y el riego.

En resumen, se informa que la tesis presentada ha sido elaborada concienzudamente durante más de cinco años y que constituye un aporte original muy relevante a la agronomía del riego.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, 2 de marzo de 2015

Firma del director

Fdo. Elías Fereres Castiel

CONTENIDOS

Lista de figuras	I
Lista de tablas.....	V
Lista de símbolos y abreviaturas	VII
Summary	IX
Resumen.....	XII
Capítulo 1. Introducción.....	1
Capítulo 2. Calibración y validación del Modelo AquaCrop para el cultivo de maíz en las condiciones agroecológicas de Santiago del Estero, Argentina.....	16
Capítulo 3. Calibración y Validación del Modelo AquaCrop para el cultivo de algodón en las condiciones agroecológicas de Santiago del Estero, Argentina.....	52
Capítulo 4. Cuantificación de la brecha de rendimientos y de la productividad del agua en el distrito de riego San Martín.....	81
Capítulo 5. Conclusiones generales.....	125
Anexo	128

Lista de figuras

Figura 2.1. Variables climáticas (temperatura, lluvia y ETo) durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Experimentos RIAN 2007/2008 (calibración y validación).

Figura 2.2. Variables climáticas (temperatura, lluvia y ETo) durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Experimentos RIAN 2008/2009 (calibración) y CELM FS1 2009 (validación).

Figura 2.3. Variables climáticas (temperatura, lluvia y ETo) durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Experimento CELM FS2 2009 (validación).

Figura 2.4. Variables climáticas (temperatura, lluvia y ETo) durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Experimentos CELM FS1 2010, CELM RD1 y CELM RD3 2010 (validación).

Figura 2.5. Variables climáticas (temperatura, lluvia y ETo) durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Experimento CELM FS2 2010 (validación).

Figura 2.6. Variables climáticas (temperatura, lluvia y ETo) durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Experimentos CELM RD3 y CELM RD5 2012 (validación).

Figura 2.7. Campo Experimental “La María” del INTA EEA Santiago del Estero. Ubicación de las parcelas experimentales de maíz.

Figura 2.8a. Comparación entre biomasa observada y simulada en los experimentos de calibración.

Figura 2.8b. Comparación entre biomasa observada y simulada en los experimentos usados para la calibración. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1.

Figura 2.9a. Comparación entre valores observados y simulados de cubierta vegetal en los experimentos de calibración.

Figura 2.9b. Comparación entre valores observados y simulados de cubierta vegetal en los experimentos de calibración. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1.

Figura 2.10. Comparación entre ETa observada y simulada en los experimentos de calibración.

Figura 2.11a. Comparación entre rendimientos observados y simulados en los experimentos de calibración.

Figura 2.11b. Comparación entre rendimientos observados y simulados en los experimentos de calibración. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1. La recta de ajuste ha sido forzada al punto 0:0.

Figura 2.12. Comparación entre productividad del agua observada y simulada en los experimentos de calibración.

Figura 2.13a. Comparación entre biomasa observada y simulada en los experimentos de validación. Se incluye valores simulados de RIAN 2007/2008 FS2, RIAN 2007/2008 FS3 y CELM RD5 2012.

Figura 2.13b. Comparación entre biomasa observada y simulada en los experimentos de validación. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1.

Figura 2.14a. Comparación entre valores observados y simulados de cubierta vegetal en los experimentos de validación.

Figura 2.14b. Comparación entre valores observados y simulados de cubierta vegetal en los experimentos de validación. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1.

Figura 2.15. Comparación entre ETa observada y simulada en los experimentos de validación.

Figura 2.16a. Comparación entre rendimientos observados y simulados en los experimentos de validación.

Figura 2.16b. Comparación entre rendimientos observados y simulados en los experimentos de validación. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1. La recta de ajuste ha sido forzada al punto 0:0.

Figura 2.17. Comparación entre productividad del agua observada y simulada en los experimentos de validación.

Figura 2.18. Comparación entre biomasa observada y simulada por AquaCrop en distintos lugares del mundo.

Figura 2.19. Comparación entre rendimientos observados y simulados por AquaCrop en distintos lugares del mundo. La recta de ajuste ha sido forzada al punto 0:0.

Figura 2.20. Comparación entre biomasa observada y simulada por AquaCrop en distintos lugares del mundo (recta de ajuste, de Figura 2.20) y los datos de Santiago del Estero, Argentina.

Figura 2.21. Comparación entre rendimientos observados y simulados por AquaCrop en distintos lugares del mundo (la recta de ajuste ha sido forzada al punto 0:0, de Figura 2.21) y los datos de Santiago del Estero, Argentina.

Figura 3.1. Variables climáticas (temperatura, lluvia y ETo) durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Experimentos RDO 2010/2011 (calibración) y RD 2010/2011 (validación).

Figura 3.2. Variables climáticas (temperatura, lluvia y ETo) durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Experimentos RDO 2011/2012, ALG 2011/2012 T1 (calibración), RD 2011/2012 y ALG 2011/2012 (validación).

Figura 3.3. Variables climáticas (temperatura, lluvia y ETo) durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Experimentos ALG 2012/2013 T1 (calibración) y ALG 2012/2013 (validación).

Figura 3.4. Campo Experimental “La María” del INTA EEA Santiago del Estero. Ubicación de las parcelas experimentales de algodón.

Figura 3.5a. Biomasa observada y simulada en los experimentos de calibración.

Figura 3.5b. Comparación entre biomasa observada y simulada en los experimentos de calibración. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1.

Figura 3.6a. Valores observados y simulados de cubierta vegetal en los experimentos de calibración.

Figura 3.6b. Comparación entre valores observados y simulados de cubierta vegetal en los experimentos de calibración. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1.

Figura 3.7a. Rendimientos observados y simulados en los experimentos de calibración.

Figura 3.7b. Comparación entre rendimientos observados y simulados en los experimentos de calibración. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1. La recta de ajuste ha sido forzada al punto 0:0.

Figura 3.8a. Biomasa observada en los experimentos de validación. Se indican valores simulados para los tratamientos RD4 2010/2011 y ALG 2011/2012 T3 y el ajuste de la simulación incluyendo todos los datos.

Figura 3.8b. Comparación entre biomasa observada y simulada en los experimentos de validación. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1.

Figura 3.9a. Valores observados de cubierta vegetal en los experimentos de validación. Se indican valores simulados para los tratamientos RD1 2010/2011 y ALG 2012/2013 T3 y el ajuste de la simulación incluyendo todos los datos.

Figura 3.9b. Comparación entre valores observados y simulados de cubierta vegetal en los experimentos de validación. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1.

Figura 3.10a. ETa estacional observada y simulada en los experimentos de validación.

Figura 3.10b. Comparación entre valores observados y simulados de ETa en los experimentos de validación. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1.

Figura 3.11a. Rendimientos observados y simulados en los experimentos de validación.

Figura 3.11b. Comparación entre rendimientos observados y simulados en los experimentos de validación. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1. La recta de ajuste ha sido forzada al punto 0:0.

Figura 3.12a. Productividad del agua observada y simulada en los experimentos de validación.

Figura 3.12b. Comparación entre productividad del agua observada y simulada en los experimentos de validación. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1.

Figura 4.1. Ubicación del Distrito San Martín en el SRRD.

Figura 4.2. Superficie con aptitud agrícola en el Distrito de riego San Martín.

Figura 4.3. Red de canales del distrito San Martín, SRRD.

Figura 4.3. Pantalla principal de AquaGIS

Figura 4.4. Pantalla principal de AquaGIS

Figura 4.5. Selección de *outputs*.

Figura 4.6. Visor de AquaGIS

Figura 4.7. Esquema de simulaciones para maíz en un tipo de suelo.

Figura 4.8. Distribución espacial de los suelos seleccionados en el distrito de riego San Martín.

Figura 4.9. Predios en los que se hicieron las evaluaciones de riego.

Figura 4.10. Relación entre rendimiento y salinidad del extracto saturado del suelo para maíz y algodón.

Figura 4.11. Perfil de salinidad en un suelo bajo riego.

Figura 4.12. Probabilidad acumulada, lluvias para los períodos octubre-febrero (FS1) y diciembre-abril (FS2), serie 1988-2013.

Figura 4.13. Rendimientos de maíz para tres programaciones de riego y dos fechas de siembra. El error estándar (EE) se representa por segmentos verticales.

Figuras 4.14a y 4.14b. Brechas de rendimiento de maíz entre escenarios Y_p - Y_a e Y_{WL} - Y_a , respectivamente, para la fecha de siembra de diciembre.

Figura 4.15. IC de maíz para tres programaciones de riego y dos fechas de siembra.

Figura 4.16. Relación Tra/Trx de maíz para tres programaciones de riego y dos fechas de siembra.

Figura 4.17. Lluvia y requerimientos brutos de riego de maíz, período octubre-febrero, serie 1988-2013.

Figura 4.18. Lluvia y requerimientos brutos de riego en maíz, período diciembre-abril, serie 1988-2013.

Figura 4.19. Probabilidad acumulada, requerimientos brutos de riego de maíz para el período octubre-febrero y diciembre-abril (FS2), serie 1988-2013.

Figura 4.20. Requerimientos de riego y drenaje para tres programaciones de riego y dos fechas de siembra en el cultivo de maíz.

Figura 4.21. Índice de drenaje en el cultivo de maíz.

Figura 4.22. Productividad del agua en el cultivo de maíz. El error estándar (EE) se representa por segmentos verticales.

Figura 4.23. Productividad del agua de riego en el cultivo de maíz.

Figuras 4.24a y 4.24b. Brechas de productividad del agua en maíz entre escenarios Y_p - Y_a e Y_{WL} - Y_a , respectivamente, para la fecha de siembra de diciembre.

Figura 4.25. Temperaturas máximas medias y temperaturas máximas para el período 10 a 25 de diciembre (serie climática 1988-2013).

Figura 4.26. Temperaturas máximas medias y temperaturas máximas para el período 5 a 20 de febrero (serie climática 1988-2013).

Figura 4.27. Probabilidad acumulada, lluvias para los períodos octubre-marzo (FS1) y noviembre-abril (FS2), serie 1988-2013.

Figura 4.28. Rendimientos de algodón para tres programaciones de riego y dos fechas de siembra. El error estándar (EE) se representa por segmentos verticales.

Figuras 4.29a y 4.29b. Brechas de rendimiento de algodón entre escenarios Y_p - Y_a e Y_{WL} - Y_a , respectivamente, para la fecha de siembra de octubre.

Figura 4.30. IC en algodón para tres programaciones de riego y dos fechas de siembra.

Figura 4.31. Relación Tra/Trx en algodón para tres programaciones de riego y dos fechas de siembra.

Figura 4.32. Lluvia y requerimiento bruto de riego de algodón para el período octubre-marzo, serie 1988-2013.

Figura 4.33. Lluvia y requerimiento bruto de riego de algodón para el período noviembre-abril, serie 1988-2013.

Figura 4.34. Probabilidad acumulada, requerimientos brutos de riego de algodón para los períodos octubre-marzo y noviembre-abril, serie 1988-2013.

Figura 4.35. Requerimientos de riego y drenaje para tres programaciones de riego y dos fechas de siembra en el cultivo de algodón.

Figura 4.36. Índice de drenaje en el cultivo de algodón.

Figura 4.37. Productividad del agua en algodón. El error estándar (EE) se representa por segmentos verticales.

Figura 4.38. Productividad del agua de riego en algodón.

Figuras 4.39a y 4.39b. Brechas de productividad del agua en algodón, entre escenarios Y_p - Y_a e Y_{WL} - Y_a , respectivamente, para la fecha de siembra de octubre.

ANEXO

Figura 1. Ubicación de Argentina en Sudamérica.

Figura 2. Ubicación de Santiago del Estero en Argentina.

Figura 3. Precipitación media anual en Santiago del Estero, Argentina (mm).

Figura 4. Temperatura media en Santiago del Estero (°C).

Figura 5. ETo media anual en Santiago del Estero (mm).

Figura 6. Déficit hídrico medio anual en Santiago del Estero (mm).

Figura 7. Área de Riego del Río Dulce - Sistema Los Quiroga (en verde).

Figura 8. Distritos del Sistema de Riego del Río Dulce-Sistema Los Quiroga.

Figura 9. Rendimientos ($t \cdot ha^{-1}$) de maíz en el nivel de producción Y_a , fecha de siembra de octubre. Serie climática 1988-2013.

Figura 10. Rendimientos ($t \cdot ha^{-1}$) de maíz en el nivel de producción Y_a , fecha de siembra de diciembre. Serie climática 1988-2013.

Figura 11. Rendimientos ($t \cdot ha^{-1}$) de maíz en el nivel de producción Y_{WL} , fecha de siembra de octubre. Serie climática 1988-2013.

Figura 12. Rendimientos ($t \cdot ha^{-1}$) de maíz en el nivel de producción Y_{WL} , fecha de siembra de diciembre. Serie climática 1988-2013.

Figura 13. Rendimientos ($t \cdot ha^{-1}$) de maíz en el nivel de producción Y_p , fecha de siembra de octubre. Serie climática 1988-2013.

Figura 14. Rendimientos ($t \cdot ha^{-1}$) de maíz en el nivel de producción Y_p , fecha de siembra de diciembre. Serie climática 1988-2013.

Figura 15. Rendimientos ($t \cdot ha^{-1}$) de algodón en el nivel de producción Y_a , fecha de siembra de octubre en el distrito San Martín. Serie climática 1988-2013.

Figura 16. Rendimientos ($t \cdot ha^{-1}$) de algodón en el nivel de producción Y_a , fecha de siembra de noviembre en el distrito San Martín. Serie climática 1988-2013.

Figura 17. Rendimientos ($t \cdot ha^{-1}$) de algodón en el nivel de producción Y_{WL} , fecha de siembra de octubre en el distrito San Martín. Serie climática 1988-2013.

Figura 18. Rendimientos ($t \cdot ha^{-1}$) de algodón en el nivel de producción Y_{WL} , fecha de siembra de noviembre en el distrito San Martín. Serie climática 1988-2013.

Figura 19. Rendimientos ($t \cdot ha^{-1}$) de algodón en el nivel de producción Y_p , fecha de siembra de octubre en el distrito San Martín. Serie climática 1988-2013.

Figura 20. Rendimientos ($t \cdot ha^{-1}$) de algodón en el nivel de producción Y_p , fecha de siembra de noviembre en el distrito San Martín. Serie climática 1988-2013.

Lista de tablas

Tabla 1.1. Superficie bruta y hectáreas empadronadas por zona administrativa en el sistema de Riego del Río Dulce-Los Quiroga.

Tabla 1.2. Distribución de los derechos permanentes de riego.

Tabla 2.1. Propiedades del suelo en el Campo Experimental “La María”, INTA Santiago del Estero.

Tabla 2.2. Resumen del comportamiento de las variables climáticas durante los experimentos de maíz.

Tabla 2.3. Fecha de siembra y cosecha de los híbridos de maíz utilizados para la calibración del modelo AquaCrop.

Tabla 2.4. Valores de parámetros conservadores en maíz definidos por Hsiao et al (2009).

Tabla 2.5. Valores de parámetros no conservadores utilizados para cada híbrido. Proceso de calibración.

Tabla 2.6. Riegos aplicados en los experimentos de calibración.

Tabla 2.7. Fecha de siembra, fenología y riego de los experimentos de maíz utilizados para la validación del modelo AquaCrop.

Tabla 2.8. Biomasa observada ($\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$) en los experimentos usados para la calibración.

Tabla 2.9. Cubierta vegetal (CC%) en los experimentos usados para la calibración.

Tabla 2.10. Evapotranspiración estacional (ETa, mm) en los experimentos usados para la calibración.

Tabla 2.11. Rendimientos observados ($\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$) en los experimentos usados para la calibración.

Tabla 2.12. Productividad del agua ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$) en los experimentos usados para la calibración.

Tabla 2.13. Biomasa observada ($\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$) en los experimentos usados para la validación.

Tabla 2.14. Cubierta vegetal (%) en los experimentos usados para la validación.

Tabla 2.15. Evapotranspiración estacional (ETa, mm) en los experimentos usados para la validación.

Tabla 2.16. Rendimientos observados ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) en los experimentos usados para la validación.

Tabla 2.17. Productividad del agua ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$) en los experimentos usados para la validación.

Tabla 2.18. Estadísticos para la comparación entre valores observados y simulados de biomasa, cubierta vegetal y rendimientos (experimentos de calibración).

Tabla 2.19. Estadísticos para la comparación entre valores observados y simulados de: biomasa, cubierta vegetal, rendimientos y productividad del agua (experimentos de validación).

Tabla 2.20. Antecedentes de uso de AquaCrop en maíz, en distintas localidades.

Tabla 3.1. Resumen del comportamiento de las variables climáticas durante los experimentos de algodón.

Tabla 3.2. Fecha de siembra y cosecha de los ensayos de calibración del modelo AquaCrop.

Tabla 3.3. Valores de parámetros conservadores en algodón que se mantuvieron sin cambios.

Tabla 3.4. Datos de manejo agronómico utilizados para la calibración.

Tabla 3.5. Valores de parámetros conservadores que se cambiaron y su comparación con los originales.

Tabla 3.6a. Fecha de siembra, principales estados fenológicos e índice de cosecha de los tratamientos RD0 2010/2011 y RD0 2011/2012 utilizados para la calibración del modelo AquaCrop.

Tabla 3.6b. Fecha de siembra, principales estados fenológicos e índice de cosecha de los tratamientos ALG 2011/2012 T1 y ALG 2012/2013 T1 utilizados para la calibración del modelo AquaCrop.

Tabla 3.7. Riego en los experimentos de calibración.

Tabla 3.8. Índices de cosecha de los experimentos RD 2010/2011 y RD 2011/2012, utilizados para la validación del modelo AquaCrop.

Tabla 3.9. Índices de cosecha de los experimentos ALG 2011/2012 y ALG 2012/2013 utilizados para la validación del modelo AquaCrop.

Tabla 3.10. Riego en los experimentos de validación.

Tabla 3.11a. Biomasa observada ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) en RD0 2010/2011.

Tabla 3.11b. Biomasa observada ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) en ALG 2011/2012 T1 y ALG 2012/2013 T1.

Tabla 3.12a. Cubierta vegetal observada (CC%) en RD0 2010/2011.

Tabla 3.12b. Cubierta vegetal observada (CC%) en ALG 2011/2012 T1.

Tabla 3.12c. Cubierta vegetal observada (CC%) en ALG 2012/2013 T1.

- Tabla 3.13.** Evapotranspiración estacional observada (ETa, mm) en los tratamientos usados para la calibración.
- Tabla 3.14.** Rendimientos observados ($t \cdot ha^{-1}$) en los tratamientos usados para la calibración.
- Tabla 3.15.** Productividad del agua observada (WP, $kg \cdot ha^{-1} \cdot mm^{-1}$) en los tratamientos usados para la calibración. EXPLICAR LAS GRANDES DIFERENCIAS
- Tabla 3.16a.** Biomasa observada ($tn \cdot ha^{-1}$) en RD 2010/2011.
- Tabla 3.16b.** Biomasa observada ($tn \cdot ha^{-1}$) en ALG 2011/2012 y ALG 2012/2013.
- Tabla 3.17a.** Cubierta vegetal observada (%) en RD 2010/2011.
- Tabla 3.17b.** Cubierta vegetal observada (%) en ALG 2011/2012.
- Tabla 3.17c.** Cubierta vegetal observada (%) en ALG 2012/2013.
- Tabla 3.18.** Evapotranspiración estacional observada (ETa, mm) en los experimentos usados para la validación.
- Tabla 3.19.** Rendimientos ($t \cdot ha^{-1}$) de los experimentos usados para la validación.
- Tabla 3.20.** Productividad del agua observada (WP, $kg \cdot ha^{-1} \cdot mm^{-1}$) en los experimentos usados para la validación.
- Tabla 3.21.** Evapotranspiración estacional observada y simulada (ETa, mm) en los tratamientos usados para la calibración.
- Tabla 3.22.** Productividad del agua observada y simulada (WP, $kg \cdot ha^{-1} \cdot mm^{-1}$) en los tratamientos usados para la calibración.
- Tabla 3.23.** Estadísticos para la comparación entre valores observados y simulados de biomasa, cubierta vegetal y rendimientos (experimentos de calibración).
- Tabla 3.24.** Estadísticos para la comparación entre valores observados y simulados de: biomasa, cubierta vegetal, evapotranspiración, rendimientos y productividad del agua (experimentos de validación).
- Tabla 4.1.** Distribución del tamaño de parcelas y derechos de riego en el distrito San Martín (Prieto D. 2006).
- Tabla 4.2.** Distribución del tamaño de parcelas y derechos de riego en el distrito San Martín (Prieto D. 2006).
- Tabla 4.3.** Propiedades de la Serie Santa Rosa.
- Tabla 4.4.** Propiedades de la Serie Maquito.
- Tabla 4.5.** Propiedades de la Serie El Simbol.
- Tabla 4.6.** Superficie de cada tipo de suelo, IS y capacidad de riego.
- Tabla 4.7.** Serie climática 1988-2014. Estación Meteorológica La María, INTA Santiago del Estero. Valores promedio.
- Tabla 4.8.** Niveles de estrés por fertilidad del suelo para simular *Ya*.
- Tabla 4.9.** Aplicación de riego por escenarios para algodón y maíz.
- Tabla 4.10.** Principales de datos del riego en predios de productores.
- Tabla 4.11.** Definición de *outputs* analizados.
- Tabla 4.12.** Rendimientos, IC y Tra/Trx para el cultivo de maíz.
- Tabla 4.13.** Riego bruto, drenaje e índice de drenaje para el cultivo de maíz.
- Tabla 4.14.** Productividad del agua y del riego para el cultivo de maíz.
- Tabla 4.15.** Rendimientos, IC y Tra/Trx para el cultivo de algodón.
- Tabla 4.16.** Riego bruto, drenaje e índice de drenaje para el cultivo de algodón.
- Tabla 4.17.** Productividad del agua y del riego en algodón.

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolo/Abreviatura	Descripción
ADT	Agua disponible total (mm)
AyEE	Agua y Energía Eléctrica de la Nación
B	Biomasa (gr; kg; tn)
CC	Cubierta vegetal (%)
CDC	Canopy decline coeficient
CE	Conductividad eléctrica
CGC	Canopy growth coeficient
d	Índice de ajuste de Willmott
DAP	Fosfato diamónico
DDS	Días desde la siembra
DPR	Razón de percolación
dS.m ⁻¹	DeciSiemens por metro
E	Evaporación (mm)
Ea	Eficiencia de aplicación
EE	Error estándar
EEASE	Estación Experimental Agropecuaria Santiago del Estero
ETa	Evapotranspiración real del cultivo (mm)
ETo	Evapotranspiración de referencia (mm)
ETc	Evapotranspiración del cultivo (mm)
EUA	Estados Unidos de América
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
FC	Capacidad de campo
FS	Fecha de siembra
ha	Hectáreas
HI	Índice de cosecha
l	litros
IAF	Índice de área foliar
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
IWP	Productividad del agua de riego (kg.ha ⁻¹ .mm _{IW} ⁻¹)
K	Potasio
kg	Kilogramos
m	Metros
MAGyP	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca
MAE	Error absoluto medio
m ²	Metros cuadrados
m ³	Metros cúbicos
m ³ .s ⁻¹	Metros cúbicos por segundo

min	Minutos
n	número de pares de mediciones tomadas en diferentes fechas
N	Nitrógeno
NRMSE	Raíz del error cuadrático medio normalizado
p	Fracción de agotamiento de agua en el suelo
P	Fósforo
PMP	Punto de marchitamiento permanente
Pp	Lluvia (mm)
PRD	Proyecto del Río Dulce
PRODAR	Proyecto de Desarrollo Agroindustrial y Riego
PRETA	Permiso de riego eventual, temporario y anual
PROSAP	Programa de Servicios Agrícolas Provinciales
R	Riego (mm)
R ²	Coefficiente de determinación
RAW	Readily Available Water (Agua Fácilmente Disponible)
RMSE	Raíz del error cuadrático medio
s	Segundo
SRRD	Sistema de Riego del Río Dulce-Los Quiroga
Tap	Tiempo de aplicación de riego (horas)
TAW	Total Available Water (Agua Disponible Total)
T	Toneladas
Tmax	Temperatura máxima
Tmin	Temperatura mínima
Tr	Transpiración (mm)
WP	Productividad del agua (kg.ha ⁻¹ .mm ⁻¹)
Y	Rendimiento (Kg.ha ⁻¹ ; tn.ha ⁻¹)
ΔS	Variación de almacenaje de agua en el suelo (mm)

Summary

Seventy percent of the Planet Earth's surface is covered by water. However, only 2.5% is fresh water, the remaining 97.5% is salt water in oceans and seas. From 2.5% of freshwater, only 0.3% is available in rivers, lakes and reservoirs, 30% is located in underground aquifers and the rest is frozen in the poles and glaciers. It is clear that only a very small portion of the water of the Earth is currently available to meet the needs of mankind: drinking water, agriculture and industry. It is estimated that worldwide there are around 1,500 million hectares of farmland, of which 277 million are irrigated lands. Of the total freshwater delivered to different uses, irrigation is the main user of the planet: approximately 70% of the total freshwater is used to irrigate crops (Molden *et al* 2010; Kassam *et al* 2007).

It is estimated that by year 2050 the Earth will be inhabited by 9,000 million people, which will demand more and better food. It is important to know that such a scenario must be addressed with a similar amount of arable land and fresh water. The agricultural sector should be able to provide the necessary answers, for example by making more efficient use of water and increasing their productivity. The concepts of "efficiency" and "productivity" of the water have been widely studied by the scientific and academic community. Both have different approaches, according to the scale of study, its objectives and the actors involved, which determines the framework to use. To characterize the use of water in irrigation systems is required to understand the characteristics of the cultures involved, identify the factors that restrict the efficient use of water, determine the prevailing farmers' irrigation practices, and then be able to explore strategies of management within each particular technological, economic and social framework. One of the approaches to assess the water use and productivity in agriculture is based on the use of simulation models, whose main function is to estimate the production of crops according to climate, soil, and technological management. The model AquaCrop (Steduto *et al* 2009) focuses on the crops response to water availability.

In the Río Dulce Irrigation System (SRRD), located in the province of Santiago del Estero, Argentina, crop production is lower than attainable. The low irrigation frequency and standard farmer's practices expose crops to periods of water shortage, which have negative impact on yields, and also limit the efficient use of water.

This thesis is aimed to characterize the use of irrigation water in maize and cotton crops and to analyze irrigation strategies allowing increasing crops production and improving water use in the SRRD. For that purpose, the following specific objectives have been raised: to calibrate and validate the AquaCrop model for maize and cotton crops; to evaluate the yields and water productivity gaps in those crops, and quantify the benefits of changing the system of fixed shifts to one more flexible.

Calibration and validation of maize in the agro-ecological conditions of Santiago del Estero is dealt with in Chapter 2. To do this, experiments set at INTA between 2007 and 2012 were used. Their objectives were to determine the response of maize to various planting dates and deficit irrigation treatments. The model precisely simulated maize behavior. Statistical indicators gave a degree of adjustment that can be described as very good; by way of example, in yields, values were as follows: coefficient of determination (R^2)=0,985; Willmott index (d) =0,995; Mean absolute error (MAE)=0, 259; Root of the mean square error (RMSE)=0, 361 and average normalized quadratic error (NRMSE) root=3,6. To close this chapter, a meta-analysis of AquaCrop ability to simulate the behavior of the corn in a wide range of climate, soil, genetic materials and agronomic management conditions was made, analyzing the existing literature. It showed the good response of the model in twelve places. The good behavior of the model in Santiago del Estero, Argentina, having different climate characteristics to the place where the

crop parameters were defined (Davis, California, USA), strengthens the viability of AquaCrop to simulate the production of maize.

Calibration and validation of cotton is treated in Chapter 3. To this purpose, experiments set at INTA between 2007 and 2013 were used. Their objectives were to determine the cotton response to deficit irrigation treatments and to different soil water contents (without stress conditions). AquaCrop simulated very well the behavior of cotton. The values of the statistical indicators were: $R^2=0.940$; $d=0.974$; $MAE=0,317$; $RMSE=0,413$ and $NRMSE=10.1$. The varieties used in the experiments are very different to those used in original crop parameterization, so some conservative parameters were changed, among others: canopy growth coefficient, time to maximum canopy cover, time to flowering and harvest index. It should be noted that the maximum yields observed in experiments and appropriately simulated by AquaCrop, quite exceed yields on which is based the original calibration. Finally, it is necessary to highlight the great adaptation of the model to different agronomic conditions (distance between lines, plant density and intensive use of growth regulators) with respect to which were used for their original parameterization.

It is emphasized the simplicity of AquaCrop and its capacity of adaptation to different climates and agronomic management. The model can be used in several applications: yield estimation, analysis of production risks by impact of droughts, definition of irrigation strategies at farm level to improve water use and as a tool in assessing irrigation performance.

This thesis is the first approach to assess, at system level, yield and water productivity gaps in the Río Dulce Irrigation System (SRRD), located in Santiago del Estero, Argentina. This is done in chapter 4 and the specific objectives were: characterize variations in maize and cotton water use in the San Martín District (SRRD); determine the gaps in yield and water productivity in those crops; assess the benefits of changing the actual irrigation rotational system to a more flexible water delivery, and evaluate how irrigation scheduling impact on water use. To achieve these objectives, AquaGIS (Lorite *et al* 2013) was used. AquaGIS is an interface that overcomes the current limitations of AquaCROP when it is necessary to do many simulations over large areas and for a large number of years. The use of AguaGIS was complemented with field surveys and questionnaires, to adjust the information of the current productive situation. Various scenarios have been set, with the following factors: climate (series 1988-2013), soil (four), crop (maize and cotton), production levels (potential, water limited and actual), and planting date (two for each crop). The combination of variables resulted in 624 simulations per crop. Production levels were associated to irrigation strategies: potential production/on demand irrigation; water limited production/improved irrigation scheduling within the present rotational system; actual production/current farmers` irrigation management.

For maize, the gap between potential and actual yield is estimated at 5900 kg ha^{-1} and the gap between potential yield and achievable (limited by the irrigation rotational system) yield was estimated at 1100 kg ha^{-1} . Current water productivity (WP) is $17 \text{ kg ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$, considered low considering the potential of hybrids currently used. The WP in potential production is $25 \text{ kg ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ and in water limited production, $23 \text{ kg ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$. The current irrigation water productivity (IWP) is very low, $4.5 \text{ kg ha}^{-1}.\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$. The IWP in potential production is $27 \text{ kg ha}^{-1}.\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$ and in water limited production $16 \text{ kg ha}^{-1}.\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$. Simple changes in farmers` irrigation practices would lead to significant increases in maize WP and IWP, even within the constraints imposed by the present rotational irrigation system.

In cotton, the gap between potential and actual yield is estimated at 2000 kg ha^{-1} and between potential yield and achievable yield, 800 kg ha^{-1} . Current water productivity can be

considered acceptable ($6.7 \text{ kg ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$). The WP in potential production is $8.5 \text{ kg ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ and in water limited production, $7.6 \text{ kg ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$. Major differences occur on the irrigation water productivity. Current IWP is very low ($1.5 \text{ kg ha}^{-1} \cdot \text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$); the IWP in potential production is $7.2 \text{ kg ha}^{-1} \cdot \text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$ and in water limited production, $4.3 \text{ kg ha}^{-1} \cdot \text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$. Changes in irrigation strategy would produce significant increases in the IWP.

The actual water management leads to important irrigation excess both in maize and cotton, exceeding not only the crop water requirements, but also the leaching requirements. It is considered that irrigation management and the absence of fertilization, especially nitrogen, are the main factors determining the yield gaps in the SRRD.

This thesis demonstrates the usefulness of combining experiments, field surveys and simulation models to estimate the yield gap and characterize the water use under different agronomical management options. This strategy is particularly suitable when, as in the case of the SRRD, available basic information is not adequate enough.

References

- Kassam, A.; D. Molden; E. Fereres and J. Doorenbos. 2007. Water productivity: science and practice-introduction. *Irrig. Sci.* (2007) 25:185:188.
- Lorite, I.; M. García-Vila; M. Ruiz-Ramos; E. Fereres. 2013. AquaData and AquaGIS: Two computer utilities for temporal and spatial simulations of water-limited yield with AquaCrop. *Computers and Electronics in Agriculture* 96 (2013) 227–237.
- Molden, D.; T. Oweis; P. Steduto; P. Bindraban; M. Hanjra; J. Kijne. 2010. Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agricultural Water Management* 97 (2010) 528–535.
- Steduto, P.; D. Raes; T. Hsiao; E. Fereres; L. Heng; G. Izzi and J. Hoogeveen. 2009. AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions. *Options Méditerranéennes, Series A*, No. 80.285-292.

Resumen

La Tierra recibe, entre otros, el apelativo de "Planeta Azul" debido a que el 70% de su superficie está cubierta por agua. Sin embargo, sólo el 2.5% es agua dulce, el 97.5% restante son mares y océanos de agua salada. Del 2.5% de agua dulce, sólo el 0.3% está disponible en ríos, lagos y embalses, el 30% se encuentra en acuíferos subterráneos y el resto está congelada en los casquetes polares y glaciares. Resulta claro que sólo una muy pequeña porción del agua de la Tierra está actualmente disponible para cubrir las necesidades de la humanidad: agua potable, agricultura e industria. Se estima que en el mundo hay alrededor de 1,500 millones de hectáreas de tierras de cultivo, de las cuales 277 millones disponen de riego. Del total del agua dulce derivada para los distintos usos, el riego es el principal usuario del planeta, con aproximadamente el 70% del total se usa para el riego de los cultivos (Molden *et al.* 2010; Kassam *et al.* 2007; FAO 2012).

Se calcula que en el año 2050 el planeta Tierra estará habitado por 9,000 millones de seres humanos, que demandarán más y mejores alimentos. Se estima que los pilares permitirán hacer frente a tal desafío serán las técnicas agronómicas, la biotecnología y el manejo juicioso de los recursos naturales. Un aspecto clave a considerar es que la disponibilidad de tierras cultivables y agua será similar que en el siglo pasado. El sector agrícola deberá ser capaz de dar las respuestas necesarias, por ejemplo haciendo un uso más eficiente del agua e incrementando su productividad. Los conceptos de "uso eficiente" y "productividad" del agua han sido y son ampliamente estudiados por la comunidad científica y académica ligadas al uso del agua en la agricultura. Ambos tienen matices según la escala de estudio, sus objetivos y los actores involucrados, lo que determina el marco a utilizar. Para caracterizar el uso del agua en los sistemas de riego se requiere conocer las características de los cultivos involucrados, identificar los factores que restringen el uso eficiente del agua, determinar los hábitos predominantes de riego de los agricultores, para luego poder explorar estrategias de manejo en cada marco tecnológico, económico y social particular. Uno de los enfoques para evaluar el uso y la productividad del agua en la agricultura se basa en el uso de modelos de simulación, cuya función principal es estimar la producción de los cultivos en función del clima, el suelo y el manejo tecnológico. El modelo AquaCrop (Steduto *et al.* 2009) se centra en la respuesta de los cultivos a la disponibilidad de agua.

En el Sistema de Riego del Río Dulce-Los Quiroga, ubicado en la provincia de Santiago del Estero, Argentina, la producción de los cultivos es bastante menor que la que podría obtenerse. La baja frecuencia del turno de riego y las prácticas habituales de manejo exponen a los cultivos a períodos de déficit hídrico, que tienen impacto negativo en los rendimientos y, asimismo, limitan el uso eficiente del agua.

La presente tesis tiene como finalidad, para el Sistema de Riego del Río Dulce-Los Quiroga, Santiago del Estero, Argentina, caracterizar el uso del agua de riego en los cultivos de maíz y algodón y analizar estrategias de riego que permitan aumentar su producción, mejorando el uso del agua. Para ello, se plantearon los siguientes objetivos específicos: calibrar y validar el modelo de simulación AquaCrop para los cultivos de maíz y algodón, evaluar la brecha de rendimientos en esos dos cultivos a nivel de productor y cuantificar los beneficios productivos de cambiar el sistema de turno fijo a uno más flexible, que permita acoplar el riego con las necesidades de agua de los cultivos.

La calibración y validación del maíz para las condiciones agroecológicas de Santiago del Estero se aborda en el Capítulo 2. Para ello, se utilizaron experimentos realizados en INTA entre los años 2007 y 2012, que tuvieron como objetivos determinar la respuesta de híbridos de maíz a distintas fechas de siembra y a tratamientos de riego deficitario. El modelo simuló

con precisión el comportamiento del maíz. Los indicadores estadísticos dieron un grado de ajuste que puede calificarse muy bueno; a modo de ejemplo, para los rendimientos, los valores fueron los siguientes: Coeficiente de determinación (R^2)=0,985; Índice de Willmott (d)=0,995; Error absoluto medio (MAE)=0,259; Raíz del error cuadrático medio (RMSE)=0,361 y Raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE)=3,6. Para cerrar este capítulo de la tesis, se hizo un meta-análisis sobre la habilidad de AquaCrop para simular el comportamiento del maíz en un amplio rango de condiciones de clima, suelo, materiales genéticos y manejo agronómico, analizando la literatura existente. Se demostró la buena respuesta del modelo en doce lugares. El buen comportamiento del modelo en Santiago del Estero, Argentina, en un clima distinto a los antecedentes publicados y, sobre todo, con importantes diferencias respecto del lugar en donde se definieron los parámetros conservadores del cultivo (Davis, California, EUA) refuerza la viabilidad de AquaCrop para simular la producción del maíz en función del agua.

La calibración y validación del algodón se trata en el Capítulo 3. Para tal fin, se utilizaron experimentos realizados en INTA entre los años 2010 y 2013, que tuvieron como objetivos determinar la respuesta del algodón a tratamientos de riego deficitario y a contenidos variables de agua en el suelo, pero sin condiciones de estrés. AquaCrop simuló muy bien el comportamiento del algodón. Los valores de los estadísticos para el ajuste de rendimientos fueron: $R^2=0.940$; $d=0.974$; $MAE=0,317$; $RMSE=0,413$ y $NRMSE=10.1$. Las variedades utilizadas en los experimentos son muy diferentes a las que se usaron en parametrización original de algodón, por lo que se cambiaron algunos parámetros conservadores, entre otros: coeficiente de crecimiento de la cubierta vegetal, coeficiente de declinación de la cubierta vegetal, tiempo a máxima la cubierta vegetal, tiempo a floración e índice de cosecha. Debe destacarse que las máximas producciones observadas en los experimentos y apropiadamente simuladas por AquaCrop, exceden bastante los rendimientos más altos en los que se basó su calibración original. Finalmente, es necesario resaltar la gran adaptación del modelo a condiciones agronómicas muy diferentes (distancia entre líneas, densidad de plantas, uso de reguladores de crecimiento) respecto de las que se usaron para su parametrización original.

En general, es destacable la simplicidad del modelo AquaCrop y su capacidad de adaptación a diferentes climas y manejos agronómicos; se considera que su horizonte de utilización es amplio en aspectos tales como: estimación de rendimientos, análisis de riesgos productivos por impacto de sequías, definición de estrategias de riego a nivel de finca para mejorar el uso del agua y como apoyo en la evaluación del desempeño de sistemas de riego.

Esta tesis constituye el primer abordaje para estudiar, a escala de distrito, las brechas de rendimiento y de la productividad del agua de los cultivos de algodón y maíz en el Sistema de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina. Esto se trata en el capítulo 4, que tuvo como objetivos particulares: caracterizar las variaciones en el uso del agua en los cultivos del maíz y algodón en el Distrito San Martín del SRRD, determinar las brechas de rendimientos y de la productividad del agua de dichos cultivos, evaluar los beneficios productivos de cambiar el sistema de turno fijo a uno más flexible, y evaluar cómo distintas programaciones de riego impactan sobre el uso del agua a escala de distrito. Para concretar los objetivos se utilizó AquaGIS (Lorite et al 2013), una interfaz que permite salvar las actuales limitaciones de AquaCROP cuando es necesario hacer muchas simulaciones sobre áreas grandes y para una serie larga de años. El uso de AquaGIS se complementó con relevamientos de campo y encuestas, para ajustar la información de la situación productiva actual. Se plantearon escenarios en los que se combinaron los siguientes factores: datos climáticos diarios (serie de años 1988-2013), tipo de suelo (se seleccionaron cuatro), cultivo (maíz y algodón), niveles de producción (potencial, limitado por el agua y real) y fecha de siembra (se usaron dos para cada uno de los cultivos). De la combinación de variables surge que para cultivo se hicieron 624

simulaciones. Los niveles de producción estuvieron asociados a estrategias de riego: producción potencial/riego a la demanda, producción limitada por el agua/riego definido por el régimen de turnos del sistema y producción real/manejo actual de los agricultores.

Para el maíz, la brecha entre rendimiento potencial y real se estima en $5900 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ y la brecha entre rendimiento potencial y el alcanzable (limitado por el régimen de riego del distrito) se estimó en $1100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. La actual productividad del agua (WP) es de $17 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$, considerada baja para la potencialidad de los híbridos utilizados actualmente. La WP en la producción potencial es $25 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ y en la producción limitada por el agua, $23 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$. Por su parte, la actual productividad del agua de riego (IWP) es muy baja, $4.5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$. La IWP en la producción potencial es $27 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$ y en la producción limitada por el agua $16 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$. Sencillos cambios en el manejo del riego por parte de los productores permitirían lograr relevantes incrementos en la WP e IWP en maíz, aún dentro de las restricciones que impone el turno fijo de entrega de agua.

En el algodón, la brecha entre rendimiento potencial y real se estima en $2000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ y la brecha entre rendimiento potencial y el alcanzable (limitado por el régimen de riego del distrito), en $800 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. La actual productividad del agua puede considerarse aceptable ($6.7 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$). La WP en la producción potencial es $8.5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ y en la producción limitada por el agua, $7.6 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$. Mayores diferencias se producen en la productividad del agua de riego. La actual IWP es muy baja ($1.5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$); la IWP en la producción potencial es $7.2 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$ y en la producción limitada por el agua, $4.3 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$. Cambios en la estrategia de riego permitirían lograr importantes aumentos en la IWP.

Con el actual manejo del agua se producen sustanciales excesos de riego, tanto en maíz como en algodón, que superan no sólo los requerimientos de agua del cultivo, sino también las necesidades de lavado de sales. Se considera que el manejo del riego y la ausencia de fertilización, en especial abonado nitrogenado, son los principales factores que determinan las brechas de rendimientos en el SRRD.

El desarrollo de esta tesis demuestra la utilidad de combinar la experimentación, los relevamientos de campo de productores y los modelos de simulación para estimar la brecha de rendimiento y caracterizar el uso del agua ante diversas opciones de manejo agronómico. Esta estrategia resulta particularmente apta cuando, como en el caso del SRRD la disponibilidad de información básica no es lo suficientemente adecuada.

Bibliografía

- Kassam, A.; D. Molden; E. Fereres and J. Doorenbos. 2007. Water productivity: science and practice-introduction. *Irrig. Sci.* (2007) 25:185-188.
- Lorite, I.; M. García-Vila; M. Ruiz-Ramos; E. Fereres. 2013. AquaData and AquaGIS: Two computer utilities for temporal and spatial simulations of water-limited yield with AquaCrop. *Computers and Electronics in Agriculture* 96 (2013) 227–237.
- Molden, D.; T. Oweis; P. Steduto; P. Bindraban; M. Hanjra; J. Kijne. 2010. Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agricultural Water Management* 97 (2010) 528–535.
- Steduto, P.; D. Raes; T. Hsiao; E. Fereres; L. Heng; G. Izzi and J. Hoogeveen. 2009. AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions. *Options Méditerranéennes, Series A, No. 80*.285-292.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN



Capítulo 1

Introducción

1.1 Agricultura y uso del agua

La Tierra recibe, entre otros, el apelativo de "Planeta Azul" debido a que el 70% de su superficie está cubierta por agua. Sin embargo, sólo el 2.5% es agua dulce, el 97.5% restante son mares y océanos de agua salada. Del porcentaje de 2.5% de agua dulce, sólo el 0.3% está disponible en ríos, lagos y embalses, el 30% se encuentra en acuíferos subterráneos y el resto está congelada en los casquetes polares y glaciares. Resulta claro entonces que sólo una muy pequeña porción del agua de la Tierra está actualmente disponible para cubrir las necesidades de la humanidad: agua potable, agricultura e industria.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés), 2.600 millones de personas en el mundo no disponen de obras de tratamiento de aguas y 1.100 millones no tienen acceso a agua limpia. No menos importante, agua y seguridad alimentaria están estrechamente relacionados. Aproximadamente 800 millones de personas en el mundo todavía pasan hambre y la mayoría de ellos viven en regiones deficitarias de agua. La falta de acceso al agua es un factor limitante para aumentar la producción de alimentos. Se argumenta que la reserva mundial de agua renovable es constante y por tanto no puede ser incrementada; consecuentemente, los recursos hídricos per cápita disminuyen a medida que aumenta la población. Una gran parte del agua es malgastada en regadíos ineficientes, muchos con extracciones insostenibles de aguas subterráneas. Sin embargo, hay espacio para ser optimista si se tiene en cuenta que se puede hacer un mejor uso del agua aplicando tecnología ya disponible, pero que debe ser puesta al alcance de los usuarios y adoptada por ellos.

La FAO menciona que pueden darse dos tipos de escasez de agua (<http://www.fao.org/nr/water/art/2009/ppWater-scarcity.pdf>, accedido el 30/6/2014). La escasez física de agua ocurre cuando no hay agua suficiente para cubrir todas las demandas. Las regiones áridas son las que más frecuentemente están asociadas a la escasez física, pero hay una tendencia alarmante a la creación "artificial" de escasez física, debido a la sobreexplotación del recurso. Los síntomas de escasez física de agua incluyen degradación ambiental y ocurrencia de conflictos. La escasez económica de agua ocurre cuando hay ausencia de inversión en infraestructura o falta de capacidad de los recursos humanos para satisfacer la demanda de agua, aún en lugares donde el recurso abunda. Entre los síntomas de escasez física de agua se incluyen: desarrollo inadecuado de infraestructuras (la población tienen problemas para obtener agua suficiente para uso doméstico u otros propósitos); alta vulnerabilidad a fluctuaciones estacionales (inundaciones y sequías); inadecuada distribución de agua, aún cuando existen obras de infraestructura.

Los recursos hídricos se han convertido en centro de atención mundial de tomadores de decisión, científicos, académicos y planificadores. Su estudio abarca la provisión para uso humano, usos agrícolas e industriales, el tratamiento de agua para su reúso en distintos fines y otros. El papel del agua como recurso estratégico para el desarrollo de las naciones ha quedado demostrado al declarar las Naciones Unidas al período 2005-2015 como el "Decenio Internacional Agua, Fuente de Vida" (<http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/background.shtml>, accedido el 30/6/2014).

Se estima que en el mundo hay alrededor de 1,500 millones de hectáreas de tierras de cultivo, de las cuales 277 millones disponen de riego. Del total del agua dulce derivada para los distintos usos, el riego es el principal usuario del planeta, con aproximadamente el 70% del total (Molden *et al.* 2010; Kassam *et al.* 2007; FAO 2012). Este es un promedio ponderado, pero hay importantes variaciones por continentes o regiones: África 82%, Asia y el Pacífico 80%, Europa 31%, América Latina y el Caribe 75%, América del Norte 49%, Oriente Medio 85%. Hoy, cerca del 20% de las tierras cultivadas están bajo riego; se espera que en el año 2030 tal porcentaje se incremente. En la actualidad, 40% de la producción de alimentos proviene de tierras bajo riego; en el año 2030 esta será de cerca del 50%. Durante el período 1998–2030 se espera que el uso de agua en 93 países en desarrollo aumente en cerca del 14%, de los actuales $2,128 \text{ km}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ a $2,429 \text{ km}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ en el 2030 (FAO, ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/factsheet_wwf_spa.pdf, accedido el 28/6/2014).

Las cifras mencionadas son concluyentes: el sector agrícola mundial se enfrenta a un desafío similar al de la década de 1960: debe producir una segunda “revolución verde”. Pero esta nueva “revolución verde” tendrá matices importantes respecto de la de 50 años atrás. En aquel momento, la mejora genética de los cultivos (principalmente el trigo) y el uso de fertilizantes y agroquímicos ayudaron a aumentar la producción agrícola y a combatir el hambre a nivel mundial. Ahora, el desafío es aún mayor: se estima que en el año 2050 el planeta Tierra estará habitado por 9,000 millones de seres humanos, que demandarán más y mejores alimentos. No es del todo claro aún cómo afrontar este nuevo desafío, pero los pilares que sostendrán esta nueva revolución serán las técnicas agronómicas, la biotecnología y el manejo juicioso de los recursos naturales.

Un aspecto clave a considerar es que habrá que hacer frente a tal escenario con similar disponibilidad de tierras cultivables y agua que en el siglo pasado. A la demanda de alimentos y fibras se sumará la de los biocombustibles; la ciencia y la tecnología aplicadas al sector agrícola deberán brindar las respuestas necesarias. Hacer un uso más eficiente del agua e incrementar su productividad (“más kilogramos por gota”) serán objetivos centrales, ya que la agricultura es habitualmente “acusada” de hacer uso ineficiente de ese recurso vital y estratégico.

La concepción de que el agua se usa con baja eficiencia en el sector agrícola amerita un análisis cuidadoso. Es imprescindible definir con precisión el marco conceptual, los objetivos del estudio, las características del sistema de riego y los actores involucrados. Los factores en juego son muchos, abarcan aspectos de manejo agronómico, de tecnología de riego, sociales, económicos, institucionales y climáticos. Para encontrar respuestas a este panorama complejo se requieren enfoques innovadores, pero que a su vez permitan obtener soluciones prácticas y que estén rápidamente disponibles para los servicios de extensión y transferencia.

Los conceptos de “uso eficiente” y “productividad” del agua han sido y son ampliamente estudiados por la comunidad científica y académica ligadas al uso del agua en la agricultura. Ambos tienen matices según la escala de estudio, sus objetivos y los actores involucrados, lo que determina el marco a utilizar. Históricamente, los programas de modernización del riego han apuntado principalmente a las acciones “estructurales”; esto es, crear, reparar o renovar la infraestructura; menos énfasis se ha puesto en aspectos “no estructurales”, que son aquellos que apuntan a la gestión y manejo del agua a distintos niveles de un sistema. Las buenas o malas prácticas de riego tienen influencia determinante en los rendimientos de los cultivos y también en la sustentabilidad ambiental y social del medio rural.

La productividad agrícola del agua se puede describir de varias formas, de acuerdo a los objetivos de estudio, a la escala considerada y actores involucrados. Molden, D. *et al.* (2010) mencionan 4 escalas posibles:

- Planta, cultivo
- Predio o finca
- Sistema o red de riego
- Cuenca

Además de tener una clara caracterización de las escalas, se deben reconocer las relaciones entre ellas.

En general, la productividad agrícola del agua (WP) puede expresarse como producción agrícola (kilogramos, toneladas o ingreso monetario) por unidad de volumen de agua. Playán y Mateos (2006) proponen diversas opciones respecto a la “unidad de volumen de agua”, que ocupa el lugar del denominador: agua utilizada (la lluvia más el agua derivada con fines de riego); agua derivada; agua consumida (en forma beneficiosa o no beneficiosa); agua beneficiosamente consumida; requerimientos netos de riego. El uso de una u otra definición dependerá principalmente de las características del sistema de riego, de las particularidades hidrológicas de la cuenca, de la escala considerada y de los propósitos del estudio. Una definición de productividad del agua es:

$$WP = \text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1} \quad [1.1]$$

Donde

WP: productividad del agua

kg: kilogramos

ha: hectárea

mm: milímetros de agua evapotranspirada

También suele expresarse como:

$$WP = T \cdot \text{m}^{-3} \quad [1.2]$$

Donde

T: toneladas

m³: metros cúbicos

Las relaciones agua-rendimiento son, habitualmente, difíciles de predecir, al estar determinadas por factores específicos locales. Para evaluar las eficiencias de las prácticas de riego, optimizar su programación (cuándo y cuánto regar) o establecer estrategias de riego deficitario o complementario, se debe tener un adecuado conocimiento de las relaciones suelo-agua-planta-atmósfera y también de la relación entre disponibilidad de agua, producción de biomasa y rendimientos. Es posible desarrollar funciones agua-rendimiento de alcance local a través de experimentación a campo, que no siempre es posible realizar debido a la alta demanda de financiamiento, tiempo y mano de obra. Además, la experimentación específica tiene limitaciones cuando interesa conocer respuestas para una serie larga de años. Una buena estrategia sería plantear experimentos específicos y dirigidos en combinación con el uso de modelos de simulación de crecimiento de cultivos (Fereres y Stubber 1993; Fereres *et al* 1993; Farahani *et al* 2009).

Según García Vila *et al* (2008), el vínculo entre el estudio de la optimización del uso del agua a nivel de cultivo y el manejo del riego a nivel de distrito no es una tarea sencilla. Para abordar este desafío se requiere conocer las características de los cultivos involucrados, identificar los factores que restringen el uso eficiente del agua, determinar los hábitos predominantes de riego de los agricultores, para luego explorar la factibilidad de estrategias de manejo en el marco tecnológico, económico y social particular.

Hsiao *et al* (2007) proponen una aproximación cuantitativa para el análisis del uso agrícola del agua (eficiencia y productividad). Se describen varios pasos, asimilables a eslabones de una cadena, que pueden diferenciarse pero al mismo tiempo están interrelacionados: eficiencia de conducción y distribución (canales del sistema de riego), eficiencia en finca, de aplicación, de evapotranspiración, de transpiración, de asimilación, de elaboración de biomasa y de rendimiento. Cada uno de estos eslabones conforman la “cadena de eficiencia”, que devienen en la eficiencia total o global. La idea es que la eficiencia global resultante de un proceso secuencial es el producto de la eficiencia de cada componente individual. Los autores sostienen que, generalmente, es más efectivo lograr modestas mejoras en varios pasos que concentrar los esfuerzos en mejorar la situación en uno o dos pasos.

Pereira *et al* (2002) brindan aproximaciones conceptuales sobre desempeño de riego, usos beneficiosos, no beneficiosos y ahorros de agua en una amplia perspectiva, desde el predio hasta la cuenca, en línea con trabajos previos de Jensen (1993; 2007) y Burt *et al* (1997). Se analizan las gestiones del suministro y la demanda del agua de riego para hacer frente a situaciones de escasez o de variabilidad en su disponibilidad, con énfasis en climas áridos y semiáridos. La producción agrícola en climas semiáridos es probablemente la situación más desafiante cuando de armonizar demanda y oferta de agua se trata. Las sequías, que causan reducción de los aportes de las lluvias a los ríos y acuíferos, son inciertas en cuanto a frecuencia, duración e intensidad, generando incertidumbre entre los usuarios. Otras características de este tipo de climas son la alta radiación solar incidente, las elevadas temperaturas y la baja humedad ambiental. Existen diversas acciones de manejo agronómico para que los cultivos puedan prosperar en condiciones no demasiado propicias, tales como: la elección del cultivar, fecha de siembra, densidad de siembra, fertilización riego y adecuadas prácticas en general. Estas acciones tienen como objetivos: lograr que la mayor cantidad de agua disponible sea transpirada por el cultivo, alcanzar el mayor rendimiento por unidad de agua transpirada y alcanzar un balance estacional entre uso y suministro de agua (Loomis 1983).

Las gestiones del suministro y la demanda del agua incluyen medidas fundamentales y complementarias para su manejo integral. Décadas atrás, la atención se centró en el aspecto de la oferta, sobre todo lo relacionado a la infraestructura hídrica. A medida de que aumentaban los requerimientos de agua, se invertía en infraestructura, para incrementar la oferta. La gestión del suministro abarca distintas medidas, entre otras: incrementar la capacidad de almacenaje de agua en embalses, aumentar la eficiencia de conducción y distribución en los canales de riego, mejorar la operación y mantenimiento de los sistemas colectivos de riego, usar para riego aguas recuperadas de drenajes o desagües.

En la actualidad, se estima que las posibilidades de aumentar la oferta de agua de riego en la mayoría de los países son limitadas y la atención se centra en la gestión de la demanda y en la mejora de la productividad del agua. Para ello, la agricultura tiene tres opciones principales: reducir las pérdidas de agua, incrementar su productividad y relocalizar su uso. Los dos primeros aspectos incluyen aspectos agronómicos y tecnológicos, con énfasis del manejo a nivel predial. La mejora en las técnicas de riego se considera una herramienta fundamental para reducir la demanda de agua por parte de los agricultores y, paralelamente, controlar los impactos ambientales negativos asociados a los excesos de riego, tales como los procesos de salinización secundaria o excesivo lavado de fertilizantes.

Las siguientes medidas se consideran básicas para mejorar el uso eficiente del agua en sistemas agrícolas, desde el punto de vista de la gestión de la demanda:

- disminuir la evaporación del sistema suelo-cultivo;

- disminuir la evapotranspiración de malezas y vegetación natural que reciben excesos de agua de riego;
- limitar la percolación profunda hacia capas freáticas salinas;
- mejorar la uniformidad en la aplicación del riego;
- reducir las ineficiencias en todos los niveles del sistema de riego, que impactan negativamente en la distribución del agua, los costos de operación y su funcionamiento general.

Hasta qué punto la demanda de agua para sus diferentes usos es negociable, es un punto central para definir estrategias que hagan frente situaciones de escasez. Los requerimientos para agua potable, saneamiento e higiene son innegociables. En el sector agrícola, el volumen de agua necesario para producir alimentos y fibras es no negociable, pero puede considerarse que hay espacio para implementar medidas que reduzcan la demanda global de la agricultura (FAO, 2012).

Uno de los enfoques nuevos para evaluar el uso y la productividad del agua en la agricultura se basa en el uso de modelos de simulación. Los modelos son una representación simplificada de la realidad y su objetivo es simular el funcionamiento de un sistema determinado, utilizando un conjunto de ecuaciones. En el caso de los modelos agrícolas, su función principal es estimar la producción de los cultivos en función del clima, el suelo y el manejo tecnológico. Existen numerosos modelos de simulación, entre los que se puede mencionar a: CERES (Ritchie *et al* 1985); el sistema de soporte de decisiones DSSAT (Jones *et al* 2003); COTCROP (Brown *et al* 1985), OZCOT (Hearn 1984), GOSSYM (Baker *et al* 1983), APSIM (Wang E. *et al* 2002) y CropSyst (Washington State University 1996). Estos modelos dan buenas estimaciones de la producción en relación a la disponibilidad de agua, pero, en general, requieren información sobre parámetros que describen el comportamiento de los cultivos, que no es siempre sencillo obtener. Otros, como CROPWAT (Smith *et al* 1998), utilizan funciones empíricas para describir la relación agua-rendimiento.

AquaCrop (Steduto *et al* 2009) fue desarrollado por sus autores para la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés) y se centra en la respuesta de los cultivos a la disponibilidad de agua. AquaCrop basa la relación entre crecimiento de los cultivos y la disponibilidad de agua en el comportamiento conservador de la biomasa (B) producida por unidad de agua transpirada por el cultivo (Tr). La producción de biomasa y el rendimiento dependen de factores tales como evolución de la cobertura de la canopia, conductancia estomática, productividad del agua e índice de cosecha, entre otros. AquaCrop fue concebido buscando un equilibrio entre simplicidad, precisión y robustez (García Vila *et al* 2012). Ha sido aplicado en maíz (Hsiao *et al* 2009; Heng *et al* 2009; Mebane *et al* 2013, entre otros), algodón (Farahani *et al* 2009; García Vila *et al* 2009; Qiao 2012, entre otros) y otros cultivos.

1.2 Breve panorama del riego en la República Argentina

Como se mencionó (Capítulo 1, apartado 1.1), la FAO clasifica la disponibilidad de los recursos hídricos mundiales en cuatro categorías: áreas de escasez física de agua, áreas aproximándose a la escasez física de agua, áreas con escasez económica de agua y áreas sin escasez o con poca escasez de agua. La FAO incluye a todo el territorio de la República Argentina en esta última categoría, principalmente porque la relación entre recursos hídricos disponibles y población es una de las más favorables del mundo. Pero si nos adentramos en el estudio de la disponibilidad zonal las diferencias entre las regiones son muy marcadas. El 75% del territorio nacional tiene clima árido o semiárido y la escasez de agua puede clasificarse en física o económica según el territorio considerado.

La República Argentina se ubica entre los 22º y 56º de latitud sur y los 56º y 73º de longitud oeste. Tiene una superficie de 2,750,000 km² y una longitud de 3,300 km de norte a sur y de 1,385 km de oeste a este. Debido a la extensión de su territorio, presenta una variedad de climas que van desde el tropical en el norte hasta el árido frío en el sur. Si bien, desde el punto de vista de la producción agropecuaria, se reconoce a la Argentina por su Pampa Húmeda, entre el 70% y el 75% del territorio argentino es árido o semiárido. La región húmeda concentra el 82% de los recursos hídricos superficiales y las regiones áridas y semiáridas disponen del 18% restante (Prieto 2010). Provincias como Catamarca, La Rioja, San Luis, Salta, Jujuy, Río Negro, Santiago del Estero, Mendoza, San Juan, Chubut, entre otras, basan su producción agrícola en el riego total o complementario.

El complejo agroalimentario ampliado es un importante generador de recursos en la economía de la República Argentina, ya que representa aproximadamente el 38% del Producto Interior Bruto (PIB). El sector agropecuario primario (actividades agrícolas y pecuarias), por su parte, es responsable del 10% del PBI. El empleo generado por dicho sector es de más de cinco millones de puestos de trabajo, lo cual representa casi el 36% del total. El sector primario genera el 27.6% del empleo del sistema agroalimentario, la agroindustria alcanza el 28.1% y los servicios (transporte, comercialización, etc) representa el 44.3% restante (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, (MAGyP, 2010).

La superficie con riego en Argentina es de 1,810,000 hectáreas, que significa apenas entre el 4% y 5% de la superficie cultivada en el país. De las 333,000 explotaciones agropecuarias relevadas por el Censo Nacional Agropecuario 2002, alrededor de 80,000 tienen riego. De estas, el 92% tiene una superficie menor a 25 hectáreas y el 37% menos de 9 hectáreas. Es decir, se trata, en un gran porcentaje, de pequeños establecimientos (en muchos casos vinculados a la agricultura familiar) que tienen pocas oportunidades de incorporar tecnología avanzada de riego. El riego de frutales y vid representa el 32% del total, los cereales el 26%, las forrajeras el 17%, cultivos hortícolas 14% y los industriales el 12%. En los últimos años se ha incrementado el riego de cereales y oleaginosas, principalmente asociado a la aplicación de riego suplementario. La superficie bajo riego se incrementó el 34.5% entre los años 1988 y 2002, según los censos agropecuarios realizados. La importancia relativa de los cultivos ha ido cambiando; en la década de 1980 la superficie bajo riego de hortalizas era mayor que la de cereales, forrajeras y frutales.

El incremento de la superficie bajo riego tiene matices interesantes para analizar. La superficie bajo riego integral o total (normalmente asociada a sistemas colectivos) creció un 8.4%, mientras que la de riego complementario (asociado a establecimientos individuales de dimensiones importantes) lo hizo en un 100%. En el primer caso, son distritos de riego tradicionales, abastecidos por aguas superficiales y gestionados principalmente por el sector público; en el segundo, el abastecimiento de agua es sobre todo subterráneo y su desarrollo depende más de la iniciativa individual del productor con cierta capacidad de inversión en tecnología de riego (principalmente equipos de pivote central).

El agua para riego no está reconocida, en general, como un recurso de valor económico. Este es uno de los factores por los cuales no se ha desarrollado una política estratégica a nivel nacional o regional de desarrollo de la agricultura irrigada, salvo excepciones. Las consecuencias son múltiples: dificultades para fijar objetivamente el "precio" del agua, escasa toma de conciencia para cuidar el recurso y usarlo eficientemente, baja participación de los usuarios en el manejo y operación de los sistemas, entre otras. El precio del agua de riego (denominando normalmente canon) se fija habitualmente en base a hectárea.año⁻¹, dado el criterio de asociar la propiedad del agua a la de la tierra (MAGyP 2010). En la Argentina, las provincias son las "dueñas" de los recursos hídricos y responsables del

manejo del riego. No hay por lo tanto una visión o política nacional de desarrollo del riego; sin embargo, puede mencionarse al Servicio de Programas Agrícolas Provinciales (PROSAP), creado a fines del siglo pasado, con el objetivo general de apoyar a las provincias en la modernización y el fortalecimiento de las instituciones relacionadas a la producción agropecuaria. El PROSAP está actualmente bajo la órbita del MAGyP y su prioridad es el financiamiento de rehabilitación y modernización de infraestructura de riego, aunque actualmente también atiende la promoción de incorporación de tecnología a nivel predial y aspectos de modernización de la gestión, acciones enmarcadas en el Plan Estratégico Agroalimentario y Agroindustrial 2010-2020 (Prieto 2010).

1.3 El Sistema de Riego del Río Dulce-Los Quiroga, Provincia de Santiago del Estero

La provincia de Santiago del Estero está ubicada en el Noroeste de la República Argentina, entre las latitudes 25° 30' y 30° 30' Sur y las longitudes 65° y 62° Oeste, en la región denominada "Chaco Seco" o "Chaco Semiárido" (ver figuras 1 y 2 del Anexo 1). Su superficie es de 135,254 kilómetros cuadrados (km²). Dos ríos principales la atraviesan de noroeste a sudeste: el Río Dulce y el Río Salado. El clima es semiárido con un balance hidrológico negativo durante todo el año. Las precipitaciones medias varían desde 450 mm.año⁻¹ en el Oeste hasta 900 mm.año⁻¹ en el Este, y la evapotranspiración de referencia (ET_o) desde 1,250 mm.año⁻¹ hasta 1,550 mm.año⁻¹. Existe déficit hídrico en todos los meses del año y en todo el territorio provincial. La temperatura media anual es de 21.5 °C, con inviernos relativamente fríos (mínima absoluta -7°C) y veranos muy cálidos (máxima absoluta 47°C). Las figuras 4, 5, 6 y 7 del Anexo 1 describen la precipitación media anual, la temperatura media anual, la evapotranspiración de referencia media anual y el déficit hídrico medio anual de Santiago del Estero.

La estación de lluvias está concentrada entre los meses de octubre y marzo, y la estación seca entre abril y setiembre. La variabilidad de las precipitaciones es alta entre años y en un mismo año; las sequías y, sobre todo, los períodos temporarios de estrés hídrico, son frecuentes. Estos son períodos de sequía que pueden ser relativamente breves, pero afectan significativamente la producción cuando se producen durante los períodos críticos de los cultivos. En casi todo el territorio de la provincia, la posibilidad de acceso al agua tiene un gran impacto en la calidad de vida de la población y en la posibilidad de producir bienes agropecuarios.

El área de riego más importante de la provincia es el "Sistema de Riego del Río Dulce-Los Quiroga" (SRRD). Se ubica entre los 27°25' y 28°30' de Latitud Sur y entre los 64°20' y 63°45' de Longitud Oeste (ver figura 8 en Anexo 1). Comprende parte de los departamentos Capital, Loreto, Silípica Robles, Banda y San Martín. La población de los seis departamentos que en los cuales se extiende el área de riego es de alrededor de 500,000 habitantes, mientras que la población de toda la provincia asciende a 896,461 habitantes (Censo Nacional 2010). El número promedio de integrantes del núcleo familiar es de cinco personas, existiendo, por lo tanto, en la zona alrededor de 100,000 familias. Debido a la existencia de los centros demográficos más importantes de la provincia (ciudad Capital de Santiago del Estero y ciudad de La Banda), como así también otras ciudades menores (Loreto, Fernández, Clodomira), la población rural es un 30 % y la urbana un 70 %. Los departamentos en los que presta servicio el sistema de riego concentran cada vez mayor proporción de la población de la provincia: en 1969 era el 27 %, en 1980, el 43 % y en 2010, el 57%.

El área de influencia de los canales de riego es del orden de las 300,000 ha; sin embargo, en función del caudal disponible para Santiago del Estero a partir de un acuerdo interprovincial

(Tucumán-Santiago del Estero-Córdoba), la superficie máxima que podría ser regada es de alrededor de 110,000 ha.

La superficie regada por el Río Dulce es una llanura en forma de cono aluvial con suave inclinación desde el Oeste hacia el Este y Sudeste, con una pendiente general de alrededor del 1_{0/00} (uno por mil). Presenta pendientes localizadas que van desde un 7_{0/00} (siete por mil) a menos del 0.3_{0/00} (0.3 por mil). El clima, según la clasificación de Thornthwaite, corresponde al Tipo DB'4 da', semiárido, con nulo o pequeño exceso de agua, mesotermal, con precipitaciones concentradas en el período estival. Los suelos predominantes son de textura franco limosa, con una secuencia de horizontes A1-AC-C1-C2 y una capacidad de agua disponible total de alrededor de 160-170 mm.m⁻¹. (Angueira *et al* 2007). El agua del Río Dulce es de buena calidad, la conductividad eléctrica (CE) en general no sobrepasa los 0.6 dS.m⁻¹.

El riego ya era practicado en la provincia de Santiago del Estero por las poblaciones nativas anteriores a la conquista española. Cultivaban la tierra en las zonas bañadas por los desbordes del Río Dulce y, hacia el oeste, en las Sierras de Guasayán, haciendo uso de pequeñas vertientes. Estos casos son los antecedentes de regadíos más remotos que se conocen en el territorio que luego se constituyó en la República Argentina (Gallego 2012).

Luego de la fundación de la Ciudad de Santiago del Estero (conocida en Argentina como la "Madre de Ciudades", ya que fue el primer asentamiento fundado en el país por los conquistadores españoles), fue incrementándose paulatinamente el área irrigada, que llegó a contar en el año 1680 con un padrón de regantes, que se presume es el primer registro de ese tipo en la República Argentina.

Las primeras acequias se construyeron a partir de tomas directas desde el río. En 1878 se excavó el canal La Cuarteada, constituyendo la base del sistema colectivo de riego que se desarrollaría a partir de 1905, el cual distribuía el agua a tres canales secundarios: el Canal Norte, La Cuarteada y el Canal Sud. Este sistema público, que se denominó Sistema La Cuarteada (al cual se le agregó el Sistema San Martín en la margen derecha del río en 1913), coexistió durante muchos años con acequias particulares (Michaud, C. 1942).

Tanto las tomas particulares como las de los canales públicos eran permanentemente destruidas por las crecidas del Río Dulce y, por lo general, incapaces de derivar agua durante el período de estiaje, lo que circunscribía los riegos a la época de mayores aportes (primavero-estival). Este hecho, más el empuje productivo de la zona determinó la necesidad de obras hidráulicas de mayor envergadura, que dieran mayor garantía y continuidad al abastecimiento agua de riego. En 1950 se habilitaron el Dique Nivelador Los Quiroga y el Canal Matriz, y se modernizaron algunos de los canales públicos existentes.

El Sistema Los Quiroga continuaba sin embargo sin poder aprovechar la totalidad del caudal del río, ya que el dique construido no tenía capacidad de almacenamiento, sólo era un dique derivador. La etapa siguiente del desarrollo de la infraestructura del riego marcaba entonces la necesidad de construir un embalse regulador que permitiera transferir volúmenes de agua de los momentos de exceso a los de déficit. Esta etapa se concluyó en 1967 con la inauguración del Dique de Río Hondo, obra ubicada aguas arriba, con capacidad para regular el caudal anual del curso. Casi paralelamente a la etapa final del desarrollo de la infraestructura (construcción del Dique de Río Hondo) a nivel de área de riego se diseñó un ambicioso proyecto de desarrollo, el Proyecto del Río Dulce (PRD) que se implementaría conjuntamente por Agua y Energía Eléctrica y un organismo provincial creado *ad hoc*, la Corporación del Río Dulce (CRD).

El PRD contemplaba la remodelación general de los sistemas de distribución de agua, revestimiento de canales, construcción de la red de desagües y drenajes, modernización de la gestión y variadas acciones de asesoramiento comercial y productivo para los agricultores. Lamentablemente el PRD, que fue la última intervención estructurada del Estado en cuestiones de riego, se detuvo, por decisiones políticas, en la década de 1970 y tanto la modernización del riego como los demás programas quedaron inconclusos (Gallego 2012). Desde entonces, el manejo del riego quedó librado a las capacidades y fuerzas de los diferentes actores públicos (Gobierno Nacional, a través de AyEE, administradora del servicio hasta 1992; el Gobierno Provincial a través de la CRD y de la Unidad Ejecutora de Riego (UER) administradora del servicio desde 1992) y asociaciones de productores (Angueira *et al*, 2007).

En 2008 se puso en marcha una nueva iniciativa de modernización, que involucró al Gobierno Provincial y a Asociaciones de Productores: el Proyecto de Desarrollo Agroindustrial y Riego (PRODAR), con los objetivos de mejorar la infraestructura de distribución del agua, hacer un uso más eficiente del agua para riego, incrementar la producción y darle valor agregado, aumentar el nivel de vida de los agricultores minifundistas y proteger los recursos suelo y agua (PRODAR 2008). Sin embargo, también esta iniciativa quedó prácticamente truncada, agregando un nuevo eslabón a la cadena de iniciativas, que, por diversos motivos, no pudieron concretarse en acciones armónicas y sostenidas para avanzar hacia la modernización de la agricultura de riego.

El área concentra casi la totalidad de la producción agrícola bajo riego de la provincia y hasta la gran expansión de la agricultura de secano (a partir de la década de 1990) generó la mayor parte del valor bruto de la producción primaria santiagueña. El patrón de cultivos ha tenido variaciones a lo largo de los años. En la década de 1960, las hortalizas se agregan a los tradicionales cultivos de alfalfa, algodón maíz y cucurbitáceas; en las décadas de 1970 y 1980 se verifica una caída sostenida en la superficie implantada, que alcanza su mínimo en la campaña 1980/1981 con una superficie apenas superior a las 30,000 has. A partir de ese nivel, el área se recupera estabilizándose en la década de 1990 entre las 50,000 y 60,000 has, mientras que en las primeras campañas agrícolas de este siglo se produce un importante repunte de la superficie, acercándose a las 80,000 has (este valor es aproximado ya que las estadísticas de área sembrada se discontinuaron a partir de esos años). Actualmente, los cultivos de mayor importancia son la alfalfa, el algodón, el maíz y las hortalizas. La alfalfa es reconocida por su calidad y se comercializa principalmente como heno, tanto en el mercado local como en el nacional. El algodón se vende a desmotadoras locales para elaboración de fibras para hilados; el maíz es un insumo para la producción de carne bovina, avícola y porcina y su producción se destina al medio local y al nacional. Las hortalizas también tienen destino local y nacional, según la especie.

La variación de las superficies absolutas y relativas de los diferentes cultivos a lo largo de los años ha sido producto de numerosos factores: producción destinada mayormente al consumo interno; la marginalidad del área desde el punto de vista comercial; escasas ventajas comparativas respecto a otras zonas de producción del país, por productividad, localización, distancia a los mercados, incidencia en la oferta total, condiciones de ingresos a los mercados, contracción de la demanda nacional y la competencia de productos nacionales y extranjeros.

En la actualidad, el Sistema de Riego del Río Dulce-Los Quiroga (SRRD) está organizado en cinco zonas de administración (Figura 9, Anexo 1). Oficialmente, la frecuencia del turno de riego varía entre 25 y 30 días, el caudal entregado en cabecera de finca es de 300 litros por segundo ($l.s^{-1}$) y el tiempo de riego, de 50 minutos por hectárea ($min.ha^{-1}$). El volumen total entregado, 900 metros cúbicos por hectárea ($m^3.ha^{-1}$), corresponde a una lámina teórica neta de 90 mm. La flexibilidad de la entrega de agua es algo mayor fuera de los períodos críticos de los cultivos, donde el sistema se mueve a una distribución del tipo “demanda controlada”,

ajustando el momento y/o la duración de la entrega, en función de la demanda de los agricultores y las posibilidades operativas del sistema (Angueira *et al* 2007). Administrativamente el sistema se divide en cinco zonas, cuyas superficies brutas y con derechos de riego son las siguientes (tabla 1):

Tabla 1.1 Superficie bruta y hectáreas empadronadas por zona administrativa en el sistema de Riego del Río Dulce-Los Quiroga. (Fuente: Prieto 2006 y Angueira *et al* 2007)

Zona	Superficie bruta (ha)	Superficie con derecho de riego (ha)
I (Canales Norte y La Cuarteada)	43,775	19,340
II (Canal Sud)	70,028	46,333
III (Canales Suri Pozo, Fernández y Romano)	83,790	15,211
IV (Canal San Martín)	54,085	18,802
V (Canal Sec. Simbolar)	12,547	7,300
Total	264,225	106,986

Existen dos grandes tipos de derechos de riego: la concesión permanente y el Permiso de Riego Eventual, Temporario y Anual (PRETA). La existencia de esta última categoría permite redistribuir en forma temporal las concesiones permanentes que no están siendo utilizadas, a los efectos de aprovechar al máximo el caudal disponible con aquellos productores activos cuyo crecimiento se ve limitado por la falta de riego.

La distribución de los derechos permanentes de riego según el tamaño de las parcelas se muestra en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Distribución de los derechos permanentes de riego (Fuente: Prieto 2006)

Tamaño Parcela (ha)	Número de parcelas	% sobre el total	Superficie total por categoría (ha)	Superficie promedio por parcela (ha)
0 a 5	2,745	30.4	4,518	1.6
5 a 10	2,172	24.0	9,154	4.2
10 a 25	2,548	28.2	23,613	9.3
25 a 50	804	8.9	15,387	19.1
50 a 100	3,541	3.9	10,383	1.2
100 a 500	334	3.7	18,491	55.4
500 a 1000	43	0.5	2,853	66.3
>1000	35	0.4	4,496	128.5
Total	12,222	100	88,895	35.7

Hay un claro predominio del minifundio: casi el 83% de las parcelas están concentradas en el estrato de hasta 25 hectáreas. El manejo real del agua a nivel de predio presenta dos aspectos centrales a considerar. El primero se relaciona con la programación del riego y está condicionado por el sistema de turnos y los hábitos de los agricultores; el segundo tiene que ver con el manejo del riego. El método habitual es el riego por superficie, sobre unidades de riego con escasa o nula sistematización, que llevan a que el tiempo de riego varíe entre 2.5 y 3.0 horas.ha⁻¹ y, a su vez, a la aplicación de grandes láminas. La práctica corriente es dividir los lotes en franjas perpendiculares a la acequia de riego con caballones de 30 a 40 cm de alto, espaciados, según la pendiente transversal, entre 15 a 40 m. Por el alto caudal utilizado en el riego y los defectos de emparejamiento del terreno, es tradicional también la construcción de

caballones perpendiculares a los anteriores, que reciben el nombre de “trabas”. La función de las “trabas” es demorar el avance del agua hacia el pie y permitir aminorar los efectos de diferencias de nivel. Las áreas delimitadas por trabas y caballones reciben el nombre de “tablones”. El procedimiento consiste en llenar el primer tablón (el más cercano a la acequia de riego) hasta que la altura de agua casi sobrepase la altura de la primera “traba”, la que es cortada a pala para permitir el flujo del agua hacia el segundo tablón, donde se repite la operación y así se continúa hasta llegar al último de los tablones. Este manejo conduce a condiciones de sobre-irrigación.

La eficiencia de aplicación de este tipo de riego es variable, siendo promedio del orden del 40%. (Prieto *et al* 1994; Angella 1999; Angella y Prieto 2000a,b; Angella *et al* 2011; Angella y Salgado 2011; Angella *et al* 2013). A nivel de sistema, Prieto (2006) calculó un valor medio de 3.6 para el suministro relativo de riego (SRR), alcanzándose picos de 5 en algunos años. El SRR (Malano y Burton 2001) es un indicador de desempeño que expresa la relación entre el agua que se deriva para riego y los requerimientos de los cultivos.

Los riegos presurizados están actualmente poco difundidos, pero se espera que su uso se incremente en el mediano plazo. La superficie regada con pivote central es de 2,750 hectáreas y por goteo, de 900 a 1000.

Los procesos de salinización que afectan a parte del área no son producidos directamente por el contenido de sales del agua de riego, sino que son resultado de salinización secundaria (Prieto *et al* 2008). Se conoce con este nombre al proceso de revenimiento salino que se produce a partir de una capa freática poco profunda, que al ascender por los excesos de riego, arrastra las sales almacenadas en partes profundas del perfil.

1.4 Definición del problema

En el Sistema de Riego del Río Dulce-Los Quiroga, ubicado en la provincia de Santiago del Estero, Argentina, la producción de los cultivos es bastante menor que la que podría obtenerse. A modo de ejemplos, el rendimiento promedio del algodón varía entre 2,5 y 3,0 t.ha⁻¹, pero pueden alcanzarse 5,0 tn.ha⁻¹. El rendimiento promedio del maíz varía entre 6,5-7,0 t.ha⁻¹, aunque sería posible obtener cosechas de 12,0 tn.ha⁻¹ (Romaní *et al* 2010a).

La baja frecuencia del turno y las prácticas habituales de riego exponen a los cultivos mencionados a períodos de déficit hídrico, que tienen impacto negativo en los rendimientos y, asimismo, limitan el uso eficiente del agua.

1.5 Finalidad y objetivos

La presente tesis tiene como finalidad, para el Sistema de Riego del Río Dulce-Los Quiroga, Santiago del Estero, Argentina:

- Caracterizar el uso del agua de riego en los cultivos de maíz y algodón y analizar estrategias de riego que permitan aumentar su producción, mejorando el uso del agua.

Para ello se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Calibrar y validar el modelo de simulación AquaCrop para los cultivos de maíz y algodón, mediante experimentos de campo.
- Evaluar, mediante AquaCrop, la brecha de rendimientos en esos dos cultivos a nivel de productor.
- Cuantificar los beneficios productivos de cambiar el sistema de turno fijo a uno más flexible, que permita acoplar el riego con las necesidades de agua de los cultivos.

Bibliografía

- Angella, G. 1999. *Study of Irrigation Performance in Representative Farms of the Río Dulce Project (PRD), Santiago del Estero, Argentina*. Master of Science Thesis, Wageningen Agricultural University, Irrigation and Water Engineering Group. Wageningen, Holanda.
- Angella, G. y D. Prieto. 2000a. Eficiencia de Riego en el Área de Riego del Río Dulce. Memorias del XVIII Congreso Nacional del Agua, ISBN 987-99083-4-1 (libro y CD ROM). Las Termas de Río Hondo, Santiago del Estero, Argentina, 12 al 16 de junio del 2000.
- Angella, G. y D. Prieto. 2000b. Efecto del Riego Sobre la Capa Freática. Memorias del XVIII Congreso Nacional del Agua ISBN 987-99083-4-1 (libro y CD ROM). Las Termas de Río Hondo, Santiago del Estero, Argentina, 12 al 16 de junio del 2000.
- Angella, G.; D. Prieto; R. Salgado; J. Salvatierra; C. Wintten; A. Lozano Coronel; C. Sarria y R. Ybarra. La evaluación del desempeño de los sistemas de riego como una herramienta para la mejora de su gestión. XXIII Congreso Nacional del Agua. ISSN 1853-7685. Resistencia, Chaco, Argentina. 22 al 25 de junio de 2011.
- Angella, G.; D. Prieto; R. Salgado. 2011. Riego, eficiencias, pérdidas y reales posibilidades de mejorar el uso agrícola del agua. XXIII Congreso Nacional del Agua. Resistencia, Chaco, Argentina. ISSN 1853-7685. 22 al 25 de junio de 2011.
- Angella, G. y R. Salgado. 2013. Uso real y “teórico” del agua y su impacto en el funcionamiento de un distrito de riego. XXIV Congreso Nacional del Agua. San Juan, Argentina. ISSN N°: 1853-7685. 14 al 18 de octubre de 2013.
- Angueira C.; D. Prieto; J. López; G. Barraza. 2007. *Sistema de Información Geográfica de Santiago del Estero*. SigSE V. 2.0.CD. ISBN 987-521-170-2.
- Angueira, C. y E. Zamora. 2007. Carta de suelos. Oeste del Área de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina. Ed. INTA. ISSN 1850 4086. Serie informes técnicos EEASE N°40.
- Baker, D.N.; J.N. Larnbert and J.M. McKinion. 1983. GOSSYM: A simulator of cotton growth and yield. Tech. Bull. 1089. South Carolina Agric. Exp. Stn., Clemson.
- Brown, L.G.; J.W. Jones; J.D. Hesketh; J.D. Hartsog; F.D. Whisler and F.S. Harris. 1985. COTCROP: Computer simulation of growth and yield. Information Bull. No. 69. Agric. Forest. Exp. Stn., Mississippi State, MS.
- Burt, C. M.; A. Clemmens; T. Strelkoff; K. Solomon; R. Bliesner; L. Hardy; T. Howell; D. Eisenhauer. 1997. Irrigation Performance Measures: Efficiency and Uniformity. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 123, N° 6, November/December, pp. 423-442.
- FAO. 2012. *Coping with water scarcity. An action framework for agriculture and food security*. FAO Water Reports 38. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- Farahani, H. J.; Izzi, G. and Oweis, T. 2009. Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. Agronomy Journal Volume 101, Issue 3. 2009.
- Fereres, E. y C. Stubber. 1993. *Improving Water Quality and Use-Discussion*. In: *International Crop Science I*. D. R. Buxton; R. Shibles; R. A. Forsberg; B. L. Blad; K. H. Asay; G. M. Paulsen; and R. F. Wilson (Eds). Crop Science Society of America Inc., Madison, Wisconsin. USA.
- Fereres, E.; F. Orgaz; F. Vallalobos. 1993. *Water Use Efficiency in Sustainable Agricultural Systems*. In: *International Crop Science I*. D. R. Buxton; R. Shibles; R. A. Forsberg; B. L. Blad; K. H. Asay; G. M. Paulsen; and R. F. Wilson (Eds). Crop Science Society of America Inc., Madison, Wisconsin. USA.
- Gallego, A. 2012. *Santiago del Estero y el Agua. Crónica de una relación controvertida*. Primera Edición-Santiago del Estero. Ed. Lucrecia. 198 p. ISBN 978-987-1880-07-2.

- García-Vila, M.; I. Lorite; M. Soriano; E. Fereres. 2008. Management trends and responses to water scarcity in an irrigation scheme of Southern Spain. *Agricultural Water Management* 95 (2008) 458-468.
- García-Vila, M.; E. Fereres, L. Mateos, F. Orgaz and P. Steduto. 2009. Deficit Irrigation Optimization of Cotton with AquaCrop. *Agron. J.* 2009 101: 477-487.
- García Vila, M. y E. Fereres. 2012. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *Europ. J. Agronomy* 36 (2012) 21-31.
- Hearn, A.B. and G.A. Constable. 1984. Irrigation for crops in a sub-humid environment. VII Evaluation of irrigation strategies for cotton. *Irrig. Sci.* 5:75-94.
- Jensen, M. 1993. Impacts of irrigation and drainage on the environment. In: 5th N.D. Gulhati Lecture, The Hague, The Netherlands. French and English. 8 September 1993, 26 pp.
- Jensen, M. 2007. Beyond irrigation efficiency. *Irrig Sci* (2007) 25:233-245.
- Jones, J.; G. Hoogenboom; C.H. Porter; K.J. Boote; W.D. Batchelor; L.A. Hunt; P.W. Wilkens; U. Singh; A.J. Gijsman; J.T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. *Europ. J. Agronomy* 18 (2003) 235/265.
- Kassam, A.; D. Molden; E. Fereres and J. Doorenbos. 2007. Water productivity: science and practice-introduction. *Irrig. Sci.* (2007) 25:185:188.
- Loomis, R. 1983. Crop Manipulation for Efficient Use of Water: An Overview. In: Limitations to Efficient Water Use in Crop Production. Taylor, H.; W. Jordan; T. Sinclair (Eds). 345-371. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.
- Malano, H. y M. Burton. 2001. Guidelines for benchmarking performance in the irrigation and drainage sector. IPTRID Secretariat. FAO, Rome.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. 2010. *Hacia una estrategia para el manejo integrado del agua de riego en la Argentina*. ISBN 978-987-25476-3. Primera edición, Buenos Aires.
- Molden, D.; T. Oweis; P. Steduto; P. Bindraban; M. Hanjra; J. Kijne. 2010. Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agricultural Water Management* 97 (2010) 528-535.
- Pereira, L. S.; T. Oweis; A. Zain. 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management* 57 (2002) 175-260.
- Playán, E. y L. Mateos. 2006. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agricultural Water Management* 80 (2006) 100-116.
- Prieto, D.; R. Soppe y G. Angella. 1994a. Eficiencia de Uso del Agua de Riego en el Proyecto del Río Dulce, Santiago del Estero. Parte I: La Eficiencia Global del Proyecto". Primeras Jornadas Provinciales de Riego, p. 13-18; Santiago del Estero, Argentina, 7 y 8 de julio de 1994.
- Prieto, D.; G. Angella y J. van der Eijk. 1994b. Eficiencia de Uso del Agua en Proyecto del Río Dulce. Parte II: Eficiencia de Distribución en el Canal Terciario CT3. La Experiencia de la Participación de los Usuarios. Primeras Jornadas Provinciales de Riego, p. 19-22; Santiago del Estero, Argentina, 7 y 8 de julio de 1994.
- Prieto, D.; J. van der Eijk y G. Angella. 1994c. Eficiencia de Uso del Agua de Riego en el Proyecto del Río Dulce, Santiago del Estero. Parte III: Eficiencia y Uniformidad de Aplicación. Primeras Jornadas Provinciales de Riego, pg.23-30; Santiago del Estero, Argentina, 7 y 8 de julio de 1994.
- Prieto, D.; J. van der Eijk y G. Angella. 1994d. Eficiencia de Uso de Agua en el Proyecto del Río Dulce. Parte IV: Determinación de las Eficiencias Metas u Objetivos. Primeras Jornadas Provinciales de Riego, pg. 31-38; Santiago del Estero, Argentina, 7 y 8 de julio de 1994.
- Prieto, D.; G. Angella; C. Angueira. 2008. "Un Enfoque al Problema de la Salinidad en el Área de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero". En: La Salinización de los Suelos en la Argentina: su Impacto en la Producción Agropecuaria. Taleisnik, E.; K. Grunberg; G.

- Santa María (Ed.), pp. 93-104. EDUCC—Editorial de la Universidad Católica de Córdoba. ISBN 978-987-626-013-8.
- Prieto, D. 2006. *Modernization and the Evolution of Irrigation Practices in the Río Dulce Irrigation Project. Una Tarea de Todos*. Tesis Doctoral, Wageningen Agricultural University, Holanda).
- Prieto, D.; G. Angella; C. Angueira. 2008. Un Enfoque al Problema de la Salinidad en el Área de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero. En: *La Salinización de los Suelos en la Argentina: su Impacto en la Producción Agropecuaria*. Taleisnik, E.; K. Grunberg; G. Santa María (Ed.), pp. 93-104. EDUCC—Editorial de la Universidad Católica de Córdoba. ISBN 978-987-626-013-8.
- Prieto, D. 2010. *Situación del Riego en la Argentina*. En *El Riego en los Países del Cono Sur*. Pg. 15-29. ISBN 978-92-9248-269-5. IICA y PROCISUR. Montevideo, Uruguay.
- Qiao, X. 2012. Parameterization of FAO AquaCrop Model for Irrigated Cotton in the Humid Southeast USA. Thesis Presented to the Graduate School of Clemson University. MSc Thesis Biosystems Engineering. Clemson University.
- Ritchie, J.T., D.C. Godwin, and S. Otter-Nacke. 1985. CERES—Wheat. A simulation model of wheat growth and development. Texas A&M Univ. Press, College Station.
- Romanella, C. 1971. Planificación del Riego en el Área del Proyecto de Riego del Río Dulce. AyEE de la Nación.
- Smith, M.; D. Clarke and K. El-Askari. 1998. *CROPWAT. Cropwat for Windows. User guide*. FAO, Rome, Italy, 43 pg.
- T. C. Hsiao; P. Steduto y E. Fereres (2007). A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. *Irrigation Science* (2007) 25:209-231.
- Wang E.; Robertson M.J.; Hammer G.L.; Carberry P.S.; Holzworth D.; Meinke H.; Chapman S.C.; Hargreaves J.N.G.; Huth N.I. and McLean G. 2002. Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM. *European Journal of Agronomy* 18, 121–140.

CAPÍTULO 2
CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL
MODELO *AQUACROP* PARA EL
CULTIVO DE MAÍZ EN LAS
CONDICIONES AGROECOLÓGICAS
DE SANTIAGO DEL ESTERO,
ARGENTINA

Capítulo 2

Calibración y Validación del Modelo AquaCROP para el cultivo de maíz en las condiciones agroecológicas de Santiago del Estero, Argentina

Resumen

Un modelo es una representación simplificada de la realidad y su función es “simular” el funcionamiento de un sistema determinado. Los modelos de simulación de crecimiento de cultivos han tenido un gran desarrollo y difusión en los últimos veinticinco años, basados en el conocimiento creciente sobre las relaciones ecofisiológicas que gobiernan el crecimiento y desarrollo vegetal. Aunque no siempre se hace, antes de usar un modelo es necesario calibrarlo y validarlo para las condiciones ambientales y productivas de la región de interés. El modelo AquaCrop, de FAO, se centra en la respuesta de los cultivos a la disponibilidad hídrica. En este capítulo AquaCrop se calibró y validó para simular el cultivo de maíz en las condiciones agroecológicas y productivas del Área de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero, República Argentina, utilizando experimentos realizados en la EEA Santiago del Estero del INTA. Los experimentos se desarrollaron entre los años 2007 y 2012 y tuvieron como objetivos determinar la respuesta de híbridos de maíz a distintas fechas de siembra y a tratamientos de riego deficitario. Los experimentos usados para la calibración fueron sin estrés hídrico y los de validación, con y sin estrés. El modelo simuló adecuadamente el comportamiento de dos híbridos, cuatro fechas de siembra y condiciones de disponibilidad de agua adecuada, estrés hídrico leve y un evento de estrés hídrico intenso. Los indicadores estadísticos confirmaron un grado de ajuste que puede calificarse de bueno a muy bueno. Los valores para la validación fueron: biomasa ($\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$): $R^2=0,955$, índice de Willmott (d)= $0,987$ MAE= $1,235$, RMSE= $1,598$ y NRMSE= $12,7$; para rendimiento ($\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$): $R^2=0,985$, $d=0,995$, MAE= $0,259$, RMSE= $0,361$ y NRMSE= $3,6$; para cubierta vegetal (%): $R^2=0,889$, $d=0,938$, MAE= $0,875$, RMSE= $1,173$ y NRMSE= $1,27$. La desviación entre la ETa simulada y la observada fue en promedio del 3,5% (valor absoluto) y para la productividad del agua del 14,6%. En concordancia a otros antecedentes, el modelo simuló con menor precisión condiciones de estrés hídrico severo, especialmente para ET. Se resalta el hecho de haber mantenido los parámetros conservadores del cultivo prácticamente sin modificar, lo cual es una condición importante para el éxito de su aplicación, ya que reduce la respuesta principalmente a información sitio-específica. No menos importante, se destaca la simplicidad y entorno amigable del modelo. Además, se hizo una revisión del desempeño de AquaCrop en la simulación de crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz bajo un amplio rango de condiciones de clima, suelo, materiales genéticos y manejo agronómico, analizando la literatura existente. Se demostró la buena respuesta del modelo en doce lugares (R^2 0,933 y 0,946 para biomasa y rendimiento respectivamente). El buen comportamiento del modelo en Santiago del Estero, Argentina, en un clima distinto a los antecedentes publicados, refuerza la viabilidad de AquaCrop para simular la producción del maíz en función del agua.

2.1 Introducción

2.1.1 Modelos de simulación de cultivos

Los modelos son una representación simplificada de la realidad y su función es simular el funcionamiento de un sistema determinado, utilizando un conjunto de ecuaciones. En el caso de los modelos agrícolas, su función principal es estimar la producción de los cultivos en función del clima, el suelo y el manejo tecnológico. Los modelos de simulación de crecimiento de cultivos han tenido un gran desarrollo y amplia difusión en los últimos veinticinco años,

basados en conocimiento creciente sobre las relaciones ecofisiológicas que gobiernan el crecimiento y desarrollo vegetal.

Los modelos de simulación, al ser desarrollados en el ámbito académico, se usan principalmente en investigación (para ayudar a una mejor identificación de brechas en el conocimiento) y docencia. Mucho menor ha sido su aplicación en el análisis de problemas productivos del “mundo real”; en este sentido y considerando que la agricultura es una actividad eminentemente sujeta al riesgo, los modelos deberían ser también una herramienta importante en la transferencia de conocimientos, para ayudar a la toma de decisiones y reducir el grado de incertidumbre.

Existen en la actualidad numerosos modelos de simulación, que varían en su complejidad de uso, requerimiento de datos de entrada (*inputs*) y variedad de respuestas o salidas (*outputs*); entre ellos se pueden mencionar: CERES (Ritchie *et al* 1985), COTCROP (Brown *et al* 1985), OZCOT (Hearn 1984), GOSSYM (Baker *et al* 1983), el sistema de soporte de decisiones DSSAT (Jones, J. *et al* 2003), con sus distintos módulos, entre los que se encuentran CERES (maíz, trigo) y CROPGRO (soja, algodón, girasol); APSIM (Wang *et al* 2002), CropSyst (Washington State University, 1996), CROPWAT (Smith *et al* 1998), AquaCrop (Steduto *et al* 2009). Gowda *et al* (2013) hacen una revisión de los modelos de simulación de crecimiento de cultivos más difundidos. Desde siempre, una cuestión respecto de los modelos se refiere al equilibrio entre su precisión (ajuste entre lo observado y lo simulado), simplicidad (mayor o menor requerimientos de datos de ingreso) y robustez (cantidad de información generada o *output*). Si bien no siempre se hace, un paso previo a la aplicación de un modelo es el proceso de calibración y validación para las condiciones ambientales y productivas de la región de interés. Su desempeño se evalúa habitualmente mediante indicadores estadísticos.

2.1.2 El modelo Aquacrop y su utilización en el cultivo de maíz

AquaCrop (Steduto, P. *et al* 2009) es un modelo de simulación desarrollado para la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés) cuyo foco está puesto en la respuesta de los cultivos a la disponibilidad de agua. AquaCrop basa la relación entre crecimiento de los cultivos y el agua en el comportamiento conservador de la biomasa (B) producida por unidad de agua transpirada por el cultivo (Tr) (Steduto *et al* 2007). La producción de biomasa y el rendimiento dependen de factores tales como evolución de la cubierta vegetal, conductancia estomática, productividad del agua e índice de cosecha, entre otros. El modelo se fundamenta en principios fisiológicos y agronómicos que gobiernan el funcionamiento de un cultivo, pero a la vez, intenta evitar la simulación detallada de procesos que es habitual en modelos más sofisticados, basándose en cinco condiciones principales:

- la normalización de la transpiración del cultivo (Tr) con la evapotranspiración de referencia (ET_o);
- la separación de la evapotranspiración (ET) en evaporación del suelo (E) y transpiración del cultivo (Tr);
- la obtención de la biomasa como:

$$B = WP * \sum Tr \quad [2.1]$$

Donde: B: biomasa; WP: productividad del agua; $\sum Tr$: transpiración acumulada del cultivo.

- la expresión del rendimiento con la ecuación:

$$Y = B * HI$$

[2.2]

Donde: Y: rendimiento; HI: índice de cosecha.

- calculando el uso de agua por el cultivo, el crecimiento y la producción en paso diario en lugar de solamente calcular los valores finales de ET y Y.

El modelo permite analizar condiciones de estrés por temperatura, hacer análisis de sensibilidad en función de la fertilidad de suelo, la salinidad del agua de riego y la influencia de la capa freática. Los datos de entrada requeridos por AquaCrop son de clima (temperatura máxima y mínima, lluvia, ETo y concentración de CO₂), cultivo, suelo y de manejo agronómico, los cuales definen el ambiente en el cual el cultivo se desarrolla. Respecto de los cultivos, el modelo cuenta con parámetros que pueden separarse en dos grupos: los conservadores y los no conservadores. Los parámetros conservadores deben permanecer prácticamente constantes y son generalmente aplicables ante diferentes condiciones de manejo, clima y ubicación geográfica; los “no conservadores” dependen del cultivar y las condiciones de crecimiento y deben ser especificados por el usuario. Entre ellos se encuentra la longitud del ciclo de crecimiento y la fenología. Algunos parámetros pueden variar entre grupos de cultivares, tal como el índice de cosecha de referencia en el caso del maíz.

AquaCrop fue desarrollado buscando el equilibrio entre precisión, robustez y simplicidad (Steduto *et al* 2009; Steduto *et al* 2012) y su objetivo principal es simular la producción en función de la disponibilidad de agua. Sus aplicaciones son varias y abarcan diferentes escalas, desde la parcela agrícola hasta la cuenca. Entre otros aspectos, es útil para asistir en el proceso de *benchmarking* del desempeño de riego, en la programación del riego, definición de estrategias de manejo en situaciones de baja disponibilidad de agua, para estudiar los efectos de la variación climática sobre los cultivos, para el estudio de la brecha de rendimientos (Fereres *et al* 2012). Ha sido utilizado para simular el crecimiento, desarrollo y producción de varios cultivos, en diversas condiciones de clima, suelo, estrategias de riego y manejo tecnológico. Más detalles sobre las características del modelo pueden encontrarse en Steduto *et al* 2012.

La parametrización de AquaCrop para el cultivo de maíz fue realizada por Hsiao *et al* (2009). Hay referencias de su evaluación en climas áridos o semiáridos cálidos con estación seca en primavera-verano tales como California, EUA (Hsiao *et al* 2009), Córdoba, España (García-Vila y Fereres 2012), Zaragoza, España (Heng *et al* 2009) y sur de Italia (Katerji *et al* 2013). Kipkorir *et al* (2010) probaron el modelo en un área tropical sub-húmeda en Kenia; Shrestha *et al* (2013) en una región con lluvias monzónicas (2.000 mm.año⁻¹) en Nepal; Salemi *et al* (2011) en una región árida (130 mm.año⁻¹) de Irán. Flores Gallardo *et al* (2013) simularon el rendimiento de maíz en Sinaloa, México. Mebane *et al* (2013) validaron AquaCrop en condiciones de secano en Pennsylvania, Estados Unidos de América. Heng *et al* (2009), en el clima húmedo de Florida (Estados Unidos de América). Stricevic *et al* (2011) estudiaron la respuesta del modelo en un clima templado-frío en Serbia. Masanganise *et al* (2013) validaron AquaCrop en condiciones de secano en Zimbabwe.

Son escasos los antecedentes sobre evaluaciones en climas semiáridos cálidos con lluvias en primavera-verano (coincidentes con el ciclo de crecimiento del maíz) y aplicación de riego. Tales condiciones son características del Área de Riego del Río Dulce, provincia de Santiago del Estero, Argentina. Pueden citarse los trabajos de Abedinpour *et al* (2012) y el de Heng *et al* (2009), quienes evaluaron la respuesta del modelo en Nueva Delhi (India) y en Bushland (Texas, EUA), respectivamente, en condiciones climáticas semejantes y con riego. Sin embargo, respecto de Santiago del Estero, Bushland es considerablemente más ventoso, con

mayores tasas de evapotranspiración y menor humedad relativa. En Nueva Delhi, por su parte, la evapotranspiración es menor a la de Santiago del Estero.

En Argentina no se conocen informes sobre la evaluación de AquaCrop para simular el comportamiento del cultivo de maíz. En el Área de Riego del Río Dulce, el maíz es un insumo importante para la producción de carne bovina, avícola y porcina; su producción se destina tanto al medio local como nacional. Los rendimientos medios del maíz son de $6,0 \text{ tn}\cdot\text{ha}^{-1}$, pero se han alcanzado rendimientos de $10,0 \text{ tn}\cdot\text{ha}^{-1}$ en lotes de productores y de $12,0 \text{ tn}\cdot\text{ha}^{-1}$ en experimentos. (Romaní *et al* 2010a).

2.2 Objetivo

Calibrar y validar el modelo AquaCrop para el cultivo de maíz en las condiciones ambientales y productivas del Área de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero, República Argentina.

2.3 Materiales y métodos

2.3.1 Área de estudio

El estudio se realizó en el Sistema de Riego del Río Dulce-Los Quiroga, la cual se extiende entre los $27^{\circ}25'$ y $28^{\circ}30'$ de Latitud Sur y entre los $64^{\circ}20'$ y $63^{\circ}45'$ de Longitud Oeste. Comprende parte de los departamentos Capital, Loreto, Silípica Robles, Banda y San Martín. Las principales características del SRRD se describieron en el apartado 1.3 del Capítulo 1. Los suelos predominantes son de textura franco limosa, con una secuencia de horizontes A1-AC-C1-C2 y una capacidad de agua disponible total de alrededor de $160\text{-}170 \text{ mm}\cdot\text{m}^{-1}$. El agua del Río Dulce es de buena calidad, la conductividad eléctrica (CE) es $0,6 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ con leves variaciones espaciales.

2.3.2 Suelo y condiciones climáticas

El suelo en el que se realizaron los experimentos pertenece a la serie La María, la textura predominante es franco limosa, el perfil es profundo, con una capacidad de campo de 29% y un punto de marchitamiento permanente del 9%, ambos contenidos de agua expresados en porcentaje en volumen (Angueira *et al* 2007). Las principales características del perfil se presentan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Propiedades del suelo en el Campo Experimental “La María”, INTA Santiago del Estero.

Horizonte	A1	AC	C1ca	C2ca
Profundidad (cm)	0-20	20-52	52-87	+87
Arena (%)	24	28	31	34
Limo (%)	64	62	58	60
Arcilla (%)	12	10	11	6
Textura	Franco limosa	Franco limosa	Franco limosa	Franco limosa
Densidad aparente (gr.cc ⁻¹)	1.13	1.22	1.29	1.34
pH (pasta)	6.3	7.2	7.8	7.9
Materia orgánica (%)	2.4	1.1	0.5	1.2
N total (%)	0.13	0.11	0.09	0.09
P (ppm)	14	15	12	12
K (meq.100 gr ⁻¹)	2.1	1.2	1.5	1.8
CE (dS.m ⁻¹)	0.5	0.2	0.9	3.5
PMP (v/v)	10	7	7	5
FC (v/v)	29	25	24	22
ADT (v/v)	19	18	17	17
Saturación (v/v)	47	42	40	41

CE: conductividad eléctrica

PMP: punto de marchitamiento permanente

v/v: contenido de agua expresado como porcentaje en volumen

FC: capacidad de campo

ADT: agua útil o agua disponible total

Los datos meteorológicos diarios, necesarios para las simulaciones, se obtuvieron de la estación meteorológica automática Davis Vantage Pro[®], ubicada en el campo experimental. Los datos de ingreso para correr el modelo fueron: temperatura máxima y mínima, lluvia, ETo (calculada por el método de FAO Penman-Monteith, Allen *et al* 1998). El comportamiento de las variables climáticas durante los años de los experimentos se presenta en las figuras 2.1 a 2.6; en la tabla 2.2 se muestra un resumen de las mismas.

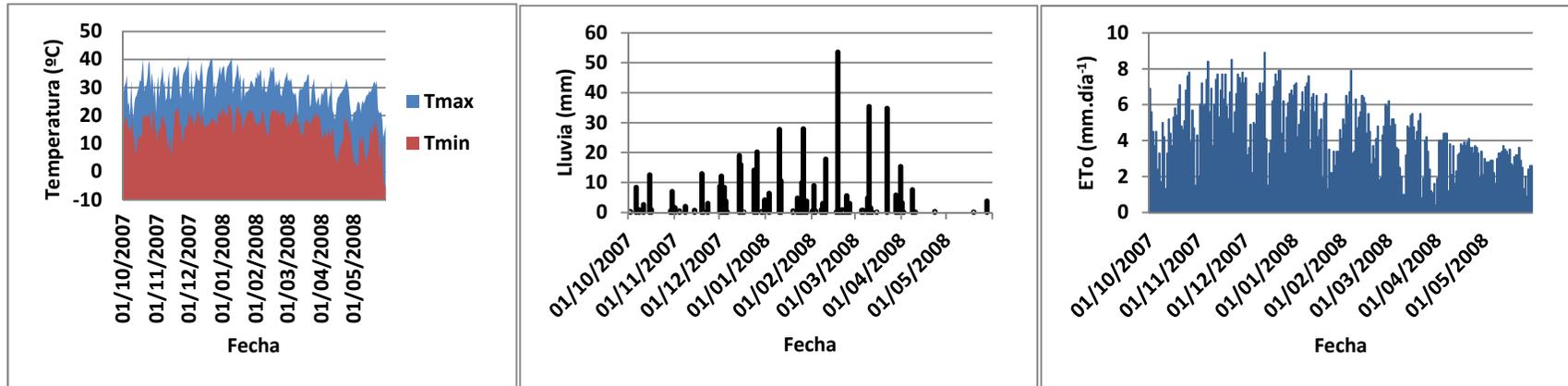


Figura 2.1. Variables climáticas (temperatura, lluvia y ETo) durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Experimentos RIAN 2007/2008 (calibración y validación).

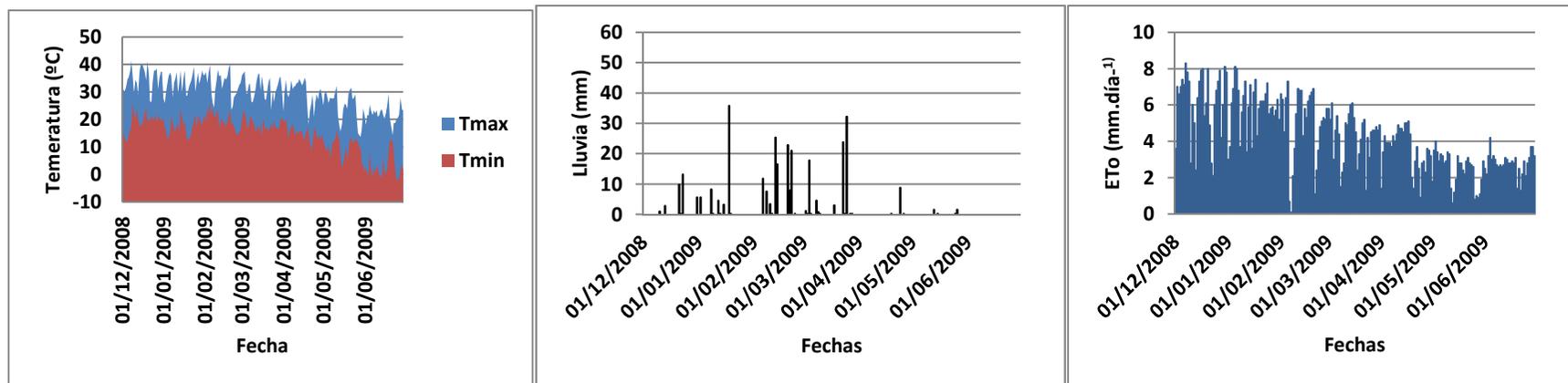


Figura 2.2. Variables climáticas (temperatura, lluvia y ETo) durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Experimentos RIAN 2008/2009 (calibración) y CELM FS1 2009 (validación).

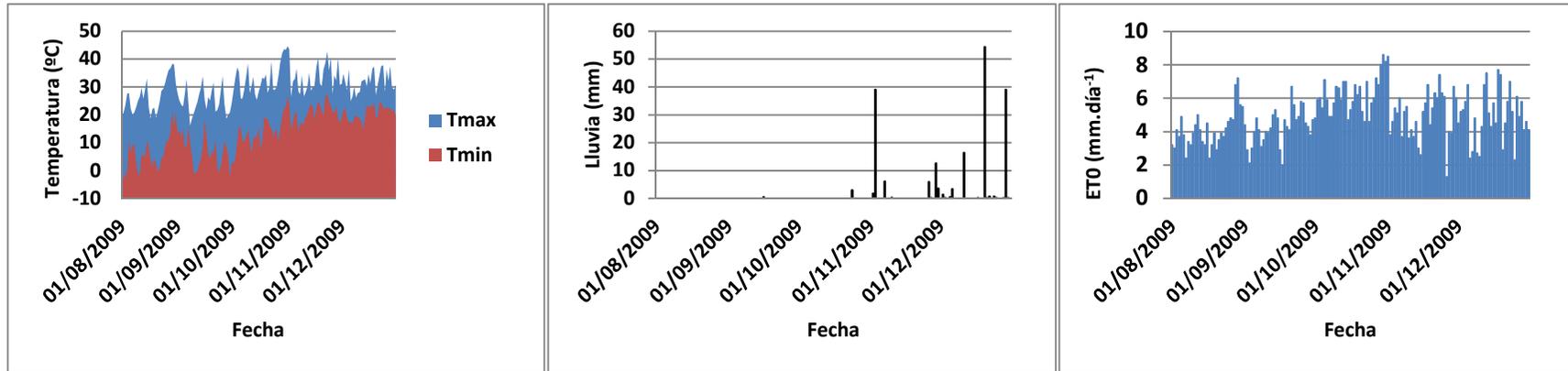


Figura 2.3. Variables climáticas (temperatura, lluvia y ETo) durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Experimento CELM FS2 2009 (validación).

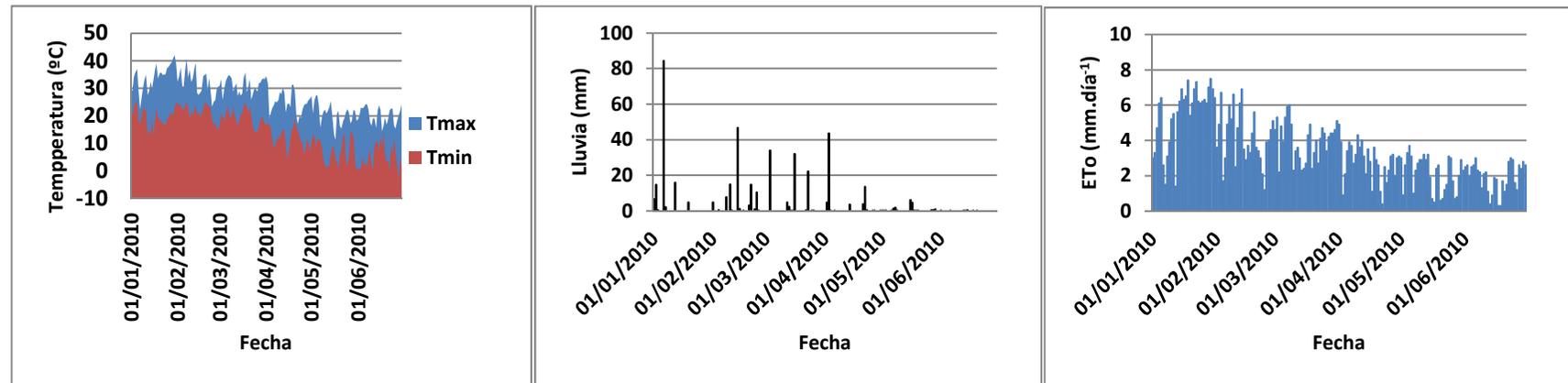


Figura 2.4. Variables climáticas (temperatura, lluvia y ETo) durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Experimentos CELM FS1 2010, CELM RD1 y CELM RD3 2010 (validación).

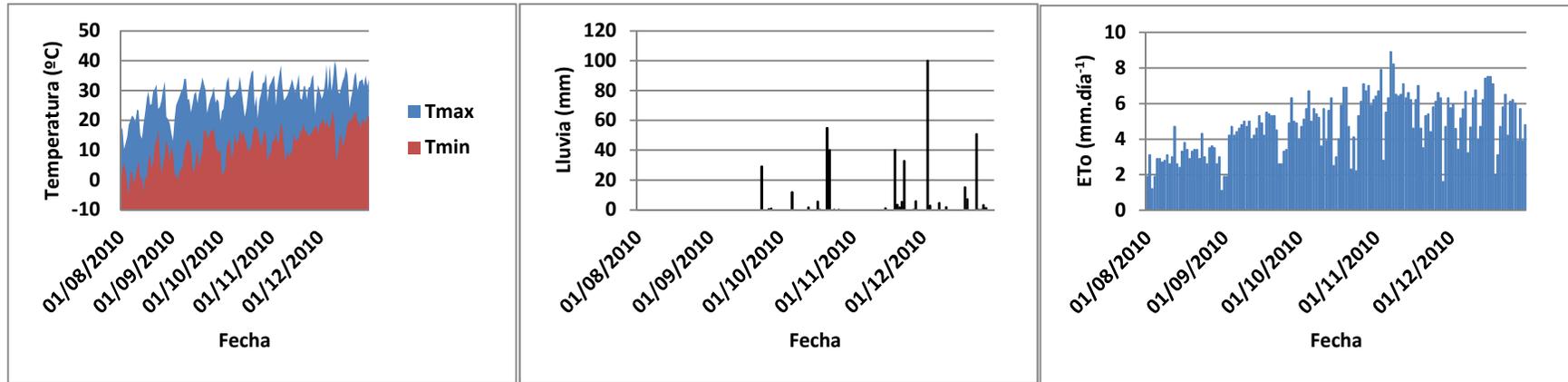


Figura 2.5. Variables climáticas (temperatura, lluvia y ETo) durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Experimento CELM FS2 2010 (validación).

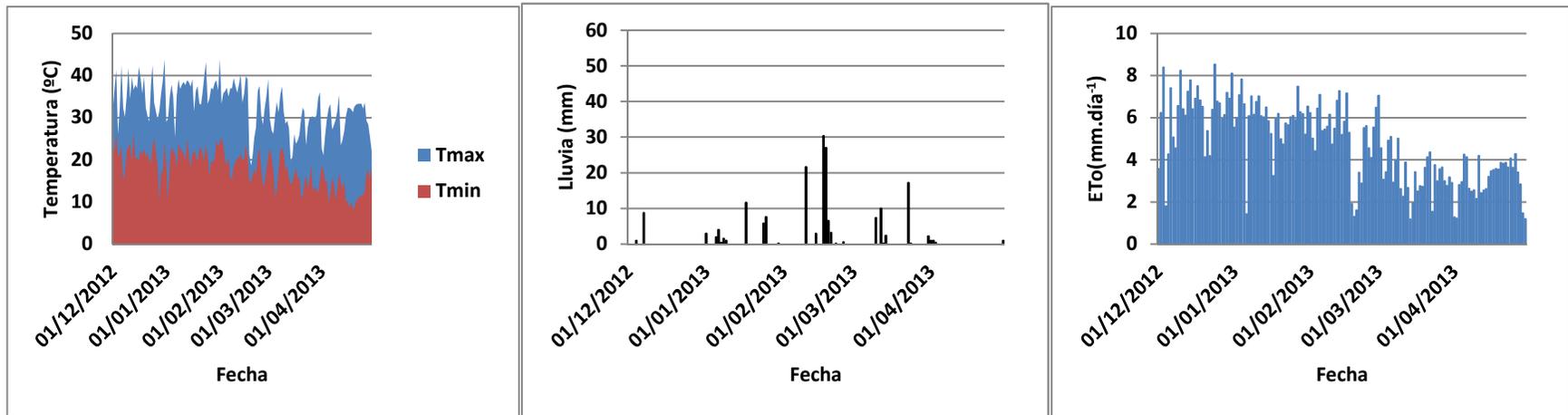


Figura 2.6. Variables climáticas (temperatura, lluvia y ETo) durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Experimentos CELM RD3 y CELM RD5 2012 (validación).

Tabla 2.2. Resumen del comportamiento de las variables climáticas durante los experimentos.

	Tmax. media (°C)	Tmin. Media (°C)	Tmax. abs. (°C)	Tmin. abs. (°C)	Lluvia (mm)	ETo media (mm.día ⁻¹)	ETo max. (mm.día ⁻¹)
RIAN 2007/2008	30.2	15.9	41.6	-5.4	482	4.5	8.9
RIAN 2008/2009 y CELM FS1 2009	29.8	14.5	41.4	-2.7	305	4.3	8.3
CELM FS2 2009	29.9	13.6	44.6	-3.1	191	4.9	8.6
CELM FS1 2010, CELM RD1 y CELM RD3 2010	27.1	14.1	42.0	-3.1	422	3.4	7.5
CELM FS2 2010	28.3	11.6	40.0	-4.9	424	4.7	8.9
CELM RD5 2012	31.5	16.5	43.8	1.7	188	4.3	8.5

Tmax. media: temperatura máxima media

Tmin. media: temperatura mínima media

Tmax. abs.: temperatura máxima absoluta

Tmin. abs.: temperatura mínima absoluta

ETo max.: ETo máxima

2.3.3 Características de los experimentos

Los experimentos para la calibración y validación de AquaCrop se realizaron en la Estación Experimental Agropecuaria Santiago del Estero, del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA-EEASE), ubicado en 28° 01' 30'' de latitud sur y 64° 14' 55'' de longitud oeste, a 169 metros sobre el nivel del mar (Figura 2.7).



Figura 2.7. Campo Experimental “La María” del INTA EEA Santiago del Estero. Ubicación de las parcelas experimentales de maíz (Imagen: Google Earth).

Experimentos de calibración

Los experimentos se identifican como RIAN 2007/2008 y RIAN 2008/2009 y el objetivo fue determinar la respuesta de híbridos de maíz sembrados en distintas fechas. Los híbridos utilizados fueron MASS 2B710 y MASS 636 de Dow Agrosiences). Se empleó un diseño estadístico en bloques aleatorizados con tres repeticiones. Cada parcela tuvo 4 metros (8 líneas) de ancho por 10 metros de largo. La distancia de siembra fue de 0.50 metros entre líneas y 0.25 metros entre plantas, lográndose una densidad de 80,000 plantas por hectárea (pl.ha^{-1}). Se aplicó 80 kg.ha^{-1} de fosfato diamónico (14.4 kg de N y 36.8 kg de P) a la siembra y 200 kg.ha^{-1} de urea (92 kg de N) entre los estadios fenológicos V7 y V8. Se utilizó riego por goteo (una línea de goteros por línea de cultivo), manteniendo el contenido hídrico por encima de un umbral, de forma tal de no someter al cultivo a estrés hídrico. Por encima de dicho umbral (fijado en el 70% del agua disponible total (ADT), correspondiente a un factor de agotamiento "p" de 0.30) se asume que la evapotranspiración real o actual del cultivo (ETa) es igual a la evapotranspiración potencial (ETo). Cuando el contenido hídrico del suelo cae por debajo del umbral, la transpiración se reduce por cierre estomático y entonces ETa es menor a ETo (Ritchie 1983); Allen *et al* 1998). Se registró fecha de aplicación y dotación de los riegos, para elaborar los archivos de riego necesarios para las simulaciones del modelo.

Las determinaciones fueron las siguientes:

En planta:

- observación de los eventos fenológicos más relevantes, emergencia, estados de hoja completamente expandida en V4, V6, V9 y VT; anthesis, floración femenina, madurez fisiológica;
- crecimiento de la parte aérea: determinación de materia seca en pre-floración, en inicio de floración femenina y en madurez fisiológica. Se escogieron 3 plantas por parcela (es decir, 9 plantas en total por tratamiento) en cada momento de muestreo, se cortaron y pesó cada una de ellas individualmente. Se llevaron a estufa (60°C) y se secaron hasta peso constante. Las tres plantas se promediaron para obtener la biomasa por parcela;
- área foliar en pre-floración, floración femenina y madurez fisiológica. Se escogieron 3 plantas por parcela (9 plantas en total por tratamiento) en cada momento de muestreo, se cortaron y se llevaron a laboratorio. Se determinó el área foliar mediante instrumento CID, modelo CI-203, pasándose todas las hojas de las plantas cortadas a través del sensor del instrumento. Las tres plantas se promediaron para obtener el área foliar por parcela;
- rendimiento y sus componentes. El área cosechada fue de 5 m^2 (dos líneas centrales de cada parcela por 5 metros de largo). Se contaron las plantas para conocer la densidad de cosecha, se contaron las mazorcas y se determinó el número de granos por espiga y número de granos por metro cuadrado. La humedad de grano al momento de cosecha varió entre el 13% y 14%.

En suelo:

humedad inicial, determinada por gravimetría, hasta una profundidad de dos metros, en cada parcela. El contenido de agua del perfil se determinó posteriormente en los mismos momentos de los muestreos en planta o semanalmente. Los intervalos de medición de humedad del suelo fueron: 0-15, 15-30, 30-45, 45-60, 60-75, 75-90, 90-105, 105-125, 125-145, 145-175 centímetros. Basado en las mediciones de agua en el suelo, el consumo de agua del cultivo (ETa) se determinó mediante balance hídrico simplificado (mediante cálculos parciales a lo largo del ciclo de crecimiento), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{ETa} = \text{R} + \text{Pp} \pm \Delta\text{S} \quad [2.3]$$

Donde: ETa: evapotranspiración real
R: riego
Pp: lluvia
 ΔS : variación de almacenaje de agua en el suelo

La escorrentía se considera despreciable (pendiente media del terreno de 0.20 %). La percolación profunda de agua también se estima que es de baja magnitud, suponiendo que es pequeña en relación a la magnitud de la ETc y dado que el balance hídrico se hizo con frecuencia semanal y la reposición de la cantidad de agua consumida se hizo cada dos o tres días. La densidad aparente se informa en la tabla 2.1. La validación de AquaCrop se hizo en tres grupos de experimentos, que se describen por separado a continuación.

Experimentos de validación A

Se identifican como RIAN 2007/2008 FS2 y RIAN 2007/2008 FS3; el objetivo fue determinar la respuesta de híbridos de maíz sembrados en distintas fechas. Las características fueron las mismas que las de los experimentos usados en la calibración.

Experimentos de validación B

Son los experimentos CELM RD1 2009, CELM RD3 2009 y CELM RD5 2012; el objetivo fue determinar la respuesta del maíz a distintos tratamientos de riego deficitario. El híbrido de maíz sembrado fue MASS 2B710 de Dow Agrosciences. Se plantearon cinco tratamientos: 100% de ETc, 75% ETc, 50% ETc, 25% ETc y secano. Se empleó un diseño estadístico en parcelas completamente aleatorizadas con cuatro repeticiones. Cada parcela tuvo 6 metros (12 líneas) de ancho por 10 metros de largo. La distancia de siembra fue de 0.50 metros entre líneas y 0.25 metros entre plantas, lográndose una densidad de 80,000 plantas por hectárea (pl. ha^{-1}). Se aplicó 80 kg. ha^{-1} de fosfato diamónico (14.4 kg de N y 36.8 kg de P) a la siembra y 200 kg. ha^{-1} de urea (92 kg de N) entre los estadios fenológicos V7 y V8. Se aplicó riego por goteo y se varió la lámina en función de tratamientos de riego deficitario. Se registró fecha de aplicación y dotación de los riegos, para elaborar los archivos de riego necesarios para las simulaciones del modelo.

Las determinaciones fueron las siguientes:

En planta:

- crecimiento de la parte aérea: determinación de materia seca en pre-floración y floración femenina. Se escogieron 3 plantas por parcela (es decir, 12 plantas en total por tratamiento) en cada momento de muestreo, pesándose cada una de ellas individualmente. Se llevaron a estufa (60°C) y se secaron hasta peso constante. Las tres plantas se promediaron para obtener la biomasa por parcela;
- área foliar en pre-floración y floración femenina. Se escogieron 3 plantas por parcela (12 plantas en total por tratamiento) en cada momento de muestreo, se cortaron y se llevaron a laboratorio, determinándose el área foliar de cada una mediante instrumento CID, modelo CI-203. Las tres plantas se promediaron para obtener el área foliar por parcela;
- rendimiento y sus componentes. El área cosechada fue de 5 m^2 (dos líneas centrales de cada parcela por 5 metros de largo). Se contaron las plantas para conocer la densidad de cosecha, las mazorcas y se determinó el número de granos por espiga y número de granos por metro cuadrado. La humedad de grano al momento de cosecha varió entre el 13% y 14%.

En suelo:

- humedad inicial, determinada por gravimetría, hasta una profundidad de tres metros en cada parcela. El contenido de agua del perfil se determinó posteriormente en diversas etapas del cultivo (prefloración, floración, post-floración y madurez fisiológica cuando fue posible, o en algunas de estas etapas). Los intervalos de medición de humedad del suelo fueron: 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100, 100-120, 120-140, 140-160, 160-180, 180-200, 200-230, 230-260, 260-300 centímetros. El cálculo del consumo de agua del cultivo (ETa) y la reposición de humedad a través del riego se hizo de igual forma que en los experimentos usados para la calibración.

Experimentos de validación C

Son los experimentos CELM FS1 2009, CELM FS2 2009, CELM FS1 2010 y CELM FS2 2010, cuyo objetivo fue observar la adaptación del híbrido MASS 636 de Dow Agrosiences a fechas de siembra extremas (agosto y diciembre). Se empleó un diseño estadístico en bloques aleatorizados con tres repeticiones. Cada parcela tuvo 4 metros de ancho (8 surcos) por 12 metros de largo. La distancia de siembra fue de 0.50 metros entre líneas y 0.25 metros entre plantas, lográndose una densidad de 80,000 plantas por hectárea (pl.ha^{-1}). Se fertilizó con 150 kg.ha^{-1} de fosfato diamónico (DAP) a la siembra y 800 kg.ha^{-1} de urea en los estadios fenológicos V2 (400 kg) y V12 (400 kg). Se aplicó riego por superficie manteniendo un contenido hídrico que no provocara estrés hídrico. No se registró fecha de aplicación ni lámina de riego.

Los registros y determinaciones fueron las siguientes:

En planta:

- observación de los eventos fenológicos más importantes (hojas totalmente desarrolladas, antesis y floración);
- crecimiento de la parte aérea: determinación de materia seca en floración y madurez fisiológica. Se escogieron 5 plantas por parcela (es decir, 15 plantas en total por tratamiento) en cada muestreo, pesándose cada una de ellas individualmente. Se llevaron a estufa (60°C) y se secaron hasta peso constante. Las cinco plantas se promediaron para obtener la biomasa por parcela;
- rendimiento y sus componentes: el área cosechada fue de 10 m^2 (2 líneas centrales de cada parcela por 10 m de largo). Se contaron las plantas para conocer la densidad al momento de cosecha, las mazorcas y se determinó el número de granos por espiga y número de grano por metro cuadrado. La humedad de grano al momento de cosecha varió entre el 13 y 14%.

2.4 Proceso de calibración

Para la calibración se utilizaron los experimentos RIAN 2007/2008 y RIAN 2008/2009. La tabla 2.3 presenta la fecha de siembra y de cosecha utilizados.

Tabla 2.3. Fecha de siembra y cosecha de los híbridos de maíz utilizados para la calibración del modelo AquaCrop.

Experimentos calibración	Híbrido	Fecha de Siembra	Fecha de cosecha
RIAN 2007/2008 FS1	MASS 636	17/10/2007	11/3/2008
RIAN 2007/2008 FS3	MASS 2B 710	18/12/2007	12/5/2008
RIAN 2008/2009 FS3	MASS 636	29/12/2008	9/6/2009
	MASS 2B 710	29/12/2008	2/6/2009

La calibración es un proceso de “sintonía fina”, en el que se ajustan ciertos parámetros del modelo para obtener una buena relación entre los valores observados y los simulados. El procedimiento se realizó siguiendo las recomendaciones de Hsiao, T. *et al* (2012). Se hicieron las primeras simulaciones y se compararon los resultados simulados con los valores observados, en términos de biomasa (B), cubierta vegetal (CC), evapotranspiración del cultivo (ETc), rendimiento (Y) y productividad del agua (WP). Se continuó con este procedimiento repetidamente, realizando pequeños ajustes, hasta que los resultados simulados ajustaron con los resultados experimentales a niveles aceptables.

Para hacer la calibración de la forma más eficiente posible, es deseable seguir ciertas “reglas”, tales como: conocer los principios básicos del modelo, su diagrama de flujo y proceso de cálculos; prestar atención a las salidas gráficas y numéricas, especialmente de *Production and Climate and Water Balance*, haciendo las simulaciones en formato *Time steps* para ver con mejor detalle del comportamiento de las variables; analizar cuidadosamente la precisión y confiabilidad de los datos observados y hacer ajustes racionales si fuera necesario. También, considerar que en ciertos casos de falta de ajuste entre datos observados y simulados, el problema puede estar originado en datos de campo de inadecuada calidad. Mayor detalle sobre estas recomendaciones se encuentra en Hsiao, T. *et al* (2012).

En consonancia con lo informado en numerosos artículos, en los cuales se calibró localmente el modelo sin modificar los parámetros conservadores definidos por Hsiao *et al* 2009 (tabla 2.4), se comenzó el proceso con el mismo enfoque. Sin embargo, posteriormente se introdujeron algunos cambios que permitieron mejorar la calibración. Los parámetros modificados fueron *canopy growth coefficient* (CGC) y *canopy decline coefficient* (CDC) a los fines de adaptarlos mejor a las características de los híbridos estudiados. Los cambios pueden considerarse leves, ya que los valores finalmente utilizados se mantuvieron dentro de las categorías de la parametrización original: *very fast expansion* para CGC y *slow decline* para CDC.

Tabla 2.4. Valores de parámetros conservadores en maíz definidos por Hsiao et al (2009).

Parámetro	Valor
Crecimiento y desarrollo del cultivo	
Temperatura base y superior (°C)	8-30
Tamaño de canopia al 90% de emergencia (cm ² .pl ⁻¹)	6.50
Coefficiente de crecimiento de canopia (CGC) (%.día ⁻¹)	16.3
Coefficiente de declinación de canopia (CDC) (%.día ⁻¹)	11.7
Producción de biomasa y formación de cosecha	
Productividad del agua normalizada por ETo y CO2 (gr.m ²⁻¹)	33.7
Transpiración del cultivo	
Declinación del coeficiente del cultivo como resultado del envejecimiento (%.día ⁻¹)	0.30
Estrés hídrico	
Umbral superior e inferior de agotamiento de agua en el suelo para expansión de la canopia (p) y forma de la curva de estrés	P upper=0.14 P lower=0.72 Shape factor=2.9
Umbral superior de agotamiento de agua en el suelo para cierre estomático y forma de la curva de estrés	P upper=0.69 Shape factor=6.0
Umbral superior de agotamiento de agua en el suelo para senescencia temprana y forma de la curva de estrés	P upper=0.69 Shape factor=2.7
Umbral superior de agotamiento de agua en el suelo para fallas en la polinización	P upper=0.8
Incremento positivo en el IC como resultado de estrés hídrico antes de floración	Ninguno
Coefficiente que describe el impacto positivo del crecimiento vegetativo restringido (durante la formación de cosecha) en el IC (%)	Small (10)
Incremento máximo permisible del IC (%)	15
Estrés térmico	
Temperatura mínima y máxima por debajo o encima de las cuales la polinización falla (°C)	10-40
Grados días mínimos requeridos para la máxima producción de biomasa (°C)	12

Los valores de CGC y CDC que se usaron fueron 17.9 %.día⁻¹ y 12.1 %.día⁻¹, respectivamente para ambos híbridos. Respecto de los parámetros no conservadores, se ajustaron en función de las características de los híbridos sembrados y del sistema de producción (días a floración, días a madurez fisiológica, distancia entre líneas, distancia entre plantas, densidad de siembra).

Los valores de los parámetros no conservadores de cultivo que se utilizaron se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Valores de parámetros no conservadores utilizados para cada híbrido. Proceso de calibración.

Parámetro	Valor	
	MASS 636	MASS 2B710
Cultivo		
Tiempo a floración (días)	64	62
Tiempo a inicio de senescencia de canopia (días)	109	103
Tiempo a madurez fisiológica (días)	139	132
Índice de cosecha	0.45	0.47
Manejo		
Distancia entre líneas (m)		0.50
Distancia entre plantas (m)		0.25
Densidad de plantas (pl.ha ⁻¹)		80,000
Tiempo a 90% de emergencia (días)		6
Máxima cubierta vegetal (%)	96	96

La concentración de CO₂ se mantuvo sin cambios, tomando como referencia el valor de 369.5 partes por millón (ppm), correspondiente a la concentración media medida en el observatorio de Mauna Loa en el año 2000.

Respecto a la fertilidad del suelo, el modelo se lanzó inicialmente en la categoría *Non limiting soil fertility*, pero la biomasa y rendimientos simulados fueron muy altos, del orden de 29-30 tn.ha⁻¹ y 14-15 tn.ha⁻¹ respectivamente. Se adoptaron entonces rangos correspondientes a la categoría *Near optimal soil fertility*, que fueron las condiciones que dieron los mejores ajustes. Esto se justifica por la relación entre las dosis aplicadas de fertilizantes y los requerimientos nutricionales del cultivo. En 8 de los 12 eventos se aplicó 200 kg.ha⁻¹ de urea (46% N) y 80 kg.ha⁻¹ de fosfato diamónico (DAP, 18% N y 46% P); esto es, 107 kg.ha⁻¹ de N y 37 kg.ha⁻¹ de P. Para obtener entre 10 y 12 tn.ha⁻¹ de grano, el requerimiento medio es de 220 a 264 kg.ha⁻¹ de N y 40 a 50 kg.ha⁻¹ de P (García, 2005). Por lo tanto, se estima que la dosis de N no permitió al cultivo de maíz expresar todo su potencial. Hay que considerar además que el contenido de N del suelo es muy bajo (tabla 1). En los otros cuatro eventos, se aplicó 800 kg.ha⁻¹ de urea (368 kg.ha⁻¹ de N) en dos dosis, la primera de ellas en estado V2 y la segunda en V5-V6. Es posible que la eficacia de la primera aplicación haya sido baja, ya que, según García, F. (2005) la absorción de N es escasa hasta el estadio fenológico V5-V6. Si, además, se tiene en cuenta las lluvias y los riegos entre esta primera dosis y prefloración (142, 51, 180 y 147 mm de lluvia para cada experimento, más riego aplicado en estadio V4), pudo haber un considerable lavado de N. Se estima que el P no resultó limitante en ningún experimento, de acuerdo a las dosis empleadas y el contenido natural en el suelo (tabla 2.1).

El archivo de suelo se elaboró en función de las características del mismo (tabla 2.1). El manejo del riego (método, fechas y lámina de agua aplicada en cada evento) se reflejó en los

correspondientes archivos para cada experimento, cuando esta información estuvo disponible. La cantidad de riego aplicado se muestra en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Riegos aplicados en los experimentos de calibración.

Experimento	Riego (mm)
RIAN 2007/2008 FS1	425
RIAN 2007/2008 FS3	410
RIAN 2008/2009 FS3	400

En los experimentos en que no se tomaron registros de riego (CELM FS1 2009, CELM FS2 2009, CELM FS1 2010 y CELM FS2 2010) se usó el modelo en la opción de riego *determination of net irrigation requirement*, de forma tal de simular un adecuado suministro de agua, sin estrés durante el ciclo. Para las condiciones iniciales de humedad del suelo, se generaron archivos para los experimentos que contaban con tal información; en caso contrario, se consideró el contenido inicial de humedad como de capacidad de campo, ya que antes de la siembra se realizó un riego de presembrado.

2.5 Proceso de validación

La validación se hizo con los parámetros del cultivo establecidos en la calibración, en formato (grados día), en términos de: biomasa, cubierta vegetal, evapotranspiración, rendimiento y productividad del agua. En la Tabla 2.7 se presenta información de los experimentos usados para la validación del modelo: RIAN 2007/2008 FS2, RIAN 2007/2008 FS3; CELM FS1 2009, CELM FS2 2009, CELM FS1 2010, CELM FS2 2010 (Romaní 2012, comunicación personal), CELM RD1 2009, CELM RD3 2009 y CELM RD5 2012. (Prieto 2012, comunicación personal). En todos los experimentos la densidad fue de 80,000 plantas por hectárea (pl. ha^{-1}).

Tabla 2.7. Fecha de siembra, fenología y riego de los experimentos de maíz utilizados para la validación del modelo AquaCrop.

Experimentos Validación	Híbrido	Fecha de Siembra	Floración (DDS)	Madurez fisiológica (DDS)	Riego (mm)
RIAN 2007/2008 FS2	MASS 2B 710	18/11/2007	61	131	n/d
RIAN 2007/2008 FS3	MASS 636	18/12/2007	64	139	410
CELM FS1 2009	MASS 636	15/01/2009	58	125	n/d
CELM FS2 2009	MASS 636	13/08/2009	85	138	n/d
CELM FS1 2010	MASS 636	13/01/2010	57	131	n/d
CELM FS2 2010	MASS 636	17/08/2010	84	144	n/d
CELM RD1 2010	MASS 2B 710	19/01/2010	62	132	40
CELM RD3 2010	MASS 2B 710	19/01/2010	62	132	20
CELM RD5 2012	MASS 2B 710	28/12/2012	65	138	45

FS: fecha de siembra

RD: riego deficitario

DDS: días desde la siembra

n/d: no disponible

2.6 Evaluación de la respuesta del modelo

El ajuste mediante indicadores estadísticos se hizo en términos de biomasa (B), cubierta vegetal (CC) y rendimiento (R), mientras que para evapotranspiración real del cultivo (ETa) y la productividad del agua (WP) se calculó la desviación entre valores observados y simulados. Ya que en los experimentos no se midió la evolución de la cobertura de la canopia sino del área foliar, se hizo una conversión según la ecuación 2.5.

$$CC = 1,005 \times [1 - \exp(-0,6 \text{ IAF})]^{1,2} \quad [2.4]$$

IAF: índice de área foliar

La ecuación [2.4] se tomó de Hsiao, T. C. *et al* (2009). Nielsen, D. *et al* (2012) presentan otra relación entre IAF y CC, pero la misma se obtuvo en experimentos con muy baja densidad de plantación (35,000 pl.ha⁻¹) en los cuales el IAF no superó el valor de 3. Por tal motivo, se consideró más apropiada la ecuación [2.4].

Se usaron los siguientes indicadores estadísticos: el coeficiente de determinación (R²), el índice de ajuste de Willmott, *d*, (Willmott 1982), el error absoluto medio (MAE), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y la raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE), citado por Steduto *et al*, 2012; García Vila *et al* 2009).

R^2 varía entre 0 y 1, con valores cercanos a 1 indicando buen ajuste. El estadístico “d” varía entre 0 y 1, con 0 indicando no ajuste y 1 perfecto ajuste. Valores de MAE cercanos a cero indican buen desempeño del modelo. RMSE varía entre 0 e infinito, valores cercanos a 0 indican buen desempeño. Tanto el MAE como el RMSE representan una medida general de la diferencia entre valores observados y simulados y toman la misma unidad de la variable considerada. NRMSE se expresa como porcentaje; el ajuste se considera excelente cuando es menor al 10%, bueno entre 10 y 20%, aceptable entre 20 y 30% y pobre cuando es mayor que 30%.

R^2 se calcula según la ecuación 2.6.

$$r^2 = \left[\frac{\sum (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum (O_i - \bar{O})^2 (S_i - \bar{S})^2}} \right]^2 \quad [2.5]$$

Donde S_i y O_i : valores simulados y observados, respectivamente

El estadístico “d” se calcula según la ecuación 2.7.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad [2.6]$$

Donde \bar{O} es la media aritmética de los n valores medidos.

El MAE se calcula como:

$$MAE = \sum_{i=1}^n |S_i - O_i| / n \quad [2.7]$$

Donde n : número de pares de observaciones.

El RMSE se calcula según la ecuación 2.9.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad [2.8]$$

NRMSE se calcula según la ecuación 2.10.

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum (S_i - O_i)^2}{n}} 100 \quad [2.9]$$

Los estadísticos se aplicaron a los datos recolectados en las campañas, es decir, n es el número de pares de mediciones tomadas en diferentes fechas.

2.7 Resultados de los experimentos

2.7.1 Experimentos usados para calibración

En esta sección se presentan los datos de los experimentos usados en la calibración de AquaCrop: biomasa (tabla 2.8), cubierta vegetal (tabla 2.9), evapotranspiración (tabla 2.10), rendimientos (tabla 2.11) y productividad del agua (tabla 2.12). En algunos experimentos no se midieron algunas variables.

Tabla 2.8. Biomasa observada ($t \cdot ha^{-1}$) en los experimentos usados para la calibración.

Experimento	Híbrido	Prefloración	Floración	Madurez Fisiológica
RIAN 2007/2008 FS1	MASS 636	4,560	11,756	23,191
RIAN 2007/2008 FS3	MASS 2B 710	3,956	13,964	22,707
RIAN 2008/2009 FS3	MASS 636	4,871	10,125	19,450
	MASS 2B 710	6,704	10,134	18,356

Tabla 2.9. Cubierta vegetal (CC%) en los experimentos usados para la calibración.

Experimento	Híbrido	Prefloración	Floración
RIAN 2007/2008 FS1	MASS 636	92	97
RIAN 2007/2008 FS3	MASS 2B 710 FS3	91	96
RIAN 2008/2009 FS3	MASS 636	94	97
	MASS 2B 710	92	96

Tabla 2.10. Evapotranspiración estacional (ETa, mm) en los experimentos usados para la calibración.

Año	Híbrido	ETa
RIAN 2007/2008 FS1	MASS 636	676
RIAN 2007/2008 FS3	MASS 2B 710	584

Tabla 2.11. Rendimientos observados ($t \cdot ha^{-1}$) en los experimentos usados para la calibración.

Año	Híbrido	Rendimiento
RIAN 2007/2008 FS1	MASS 636	10,000
RIAN 2007/2008 FS3	MASS 2B 710	11,715
RIAN 2008/2009 FS3	MASS 636	9,244
	MASS 2B 710	12,042

Tabla 2.12. Productividad del agua ($kg \cdot ha^{-1} \cdot mm^{-1}$) en los experimentos usados para la calibración.

Año	Híbrido	WP
RIAN 2007/2008 FS1	MASS 636	14,8
RIAN 2007/2008 FS3	MASS 2B 710	20,1

2.7.2 Experimentos usados para validación

En esta sección se presentan los datos de los experimentos usados en la validación de AquaCrop: biomasa (tabla 2.13), cubierta vegetal (tabla 2.14), evapotranspiración (tabla 2.15),

rendimientos (tabla 2.16) y productividad del agua (tabla 2.17). En algunos experimentos no se midieron algunas variables.

Tabla 2.13. Biomasa observada ($t \cdot ha^{-1}$) en los experimentos usados para la validación.

Experimento	Híbrido	Prefloración	Floración	Madurez fisiológica
CELM FS1 2009	MASS 636	n/d	9,524	21,863
CELM FS2 2009	MASS 636	n/d	10,143	21,755
CELM FS1 2010	MASS 636	n/d	9,140	20,108
CELM FS2 2010	MASS 636	n/d	12,054	23,188
CELM RD1 2009	MASS 2B710	4,553	8,040	n/d
CELM RD3 2009	MASS 2B710	3,847	8,254	n/d
RIAN 2007/2008 FS3	MASS 636	4,754	14,453	24,336
RIAN 2007/2008 FS2	MASS 2B710	5,297	10,727	26,742
CELM RD5 2012	MASS 2B710	6,715	7,168	11,058

Tabla 2.14. Cubierta vegetal (%) en los experimentos usados para la validación.

	Híbrido	Prefloración	Floración
CELM RD1 2009	MASS 2B710	90	94
CELM RD3 2009	MASS 2B710	90	93
RIAN 2007/2008 FS3	MASS 636	90	94
RIAN 2007/2008 FS2	MASS 2B710	91	95

Tabla 2.15. Evapotranspiración estacional (ETa, mm) en los experimentos usados para la validación.

Experimento	Híbrido	ETa
CELM RD1 2009	MASS 2B710	420
CELM RD3 2009	MASS 2B710	442
RIAN 2007/2008 FS2	MASS 2B710	571
CELM RD5 2012	MASS 2B710	330

Tabla 2.16. Rendimientos observados ($t \cdot ha^{-1}$) en los experimentos usados para la validación.

Experimento	Híbrido	Rendimiento
CELM FS1 2009	MASS 636	10,727
CELM FS2 2009	MASS 636	7,982
CELM FS1 2010	MASS 636	10,431
CELM FS2 2010	MASS 636	10,878
CELM RD1 2009	MASS 2B 710	8,776
CELM RD3 2009	MASS 2B 710	8,953
RIAN 2007/2008 FS3	MASS 636	10,672
RIAN 2007/2008 FS2	MASS 2B 710	11,423
CELM RD5 2012	MASS 2B 710	2,600

Tabla 2.17. Productividad del agua ($kg \cdot ha^{-1} \cdot mm^{-1}$) en los experimentos usados para la validación.

Año	Híbrido	WP
CELM RD1 2009	MASS 636	20,9
CELM RD3 2009	MASS 2B 710	20,3
RIAN 2007-2008 FS2	MASS 2B 710	20,0
CELM RD5 2012	MASS 2B 710	8,0

2.8 Resultados y discusión del comportamiento de AquaCrop

2.8.1 Calibración de AquaCrop

En esta sección se comparan los valores observados y simulados en los experimentos usados para la calibración de AquaCrop: biomasa (figuras 2.8a y 2.8b), cubierta vegetal (figuras 2.9a y 2.9b), evapotranspiración (figura 2.10), rendimientos (figura 2.11a y 2.11b) y productividad del agua (figura 2.12).

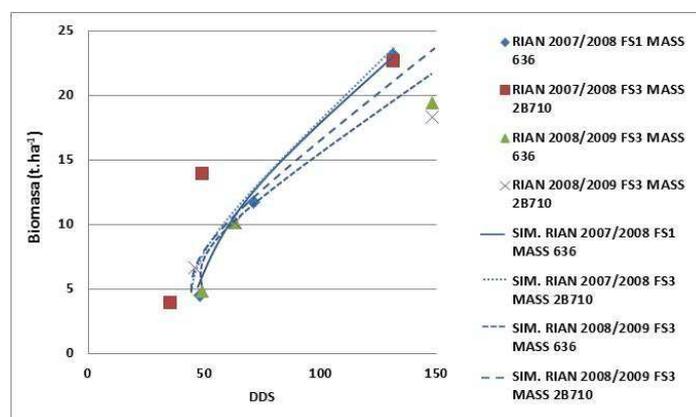


Figura 2.8a. Comparación entre biomasa observada y simulada en los experimentos de calibración.

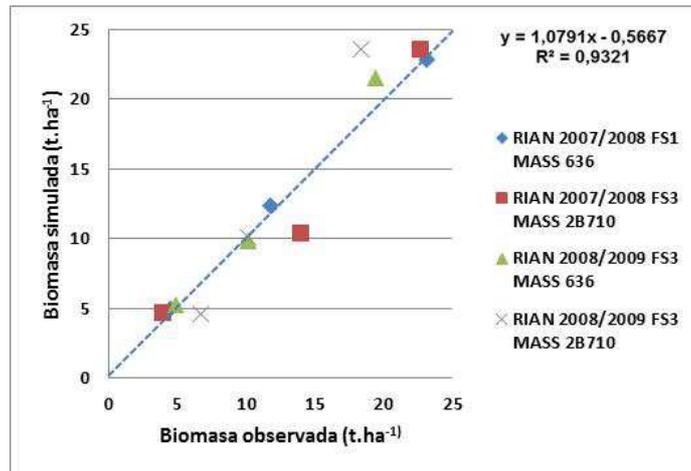


Figura 2.8b. Comparación entre biomasa observada y simulada en los experimentos usados para la calibración. Línea llna: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1.

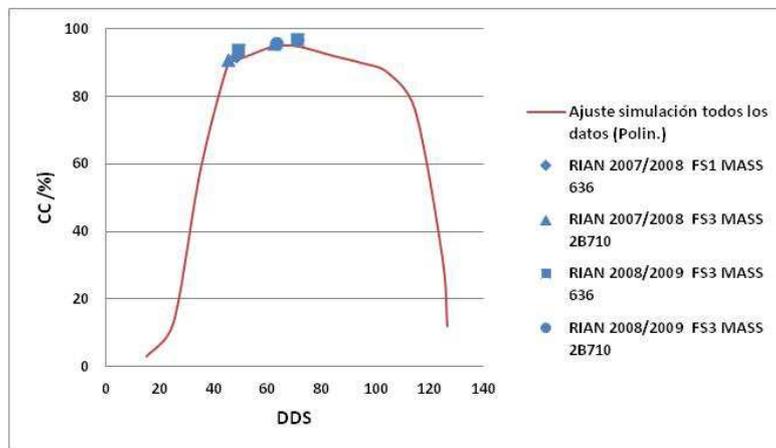


Figura 2.9a. Comparación entre valores observados y simulados de cubierta vegetal en los experimentos de calibración.

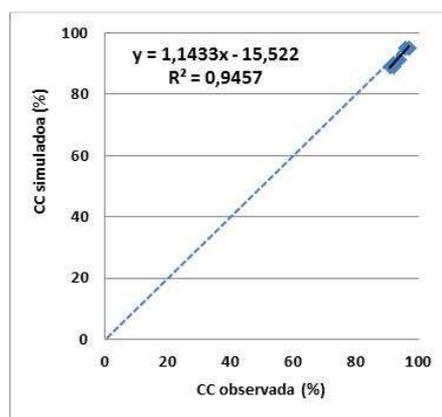


Figura 2.9b. Comparación entre valores observados y simulados de cubierta vegetal en los experimentos de calibración. Línea llna: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1.

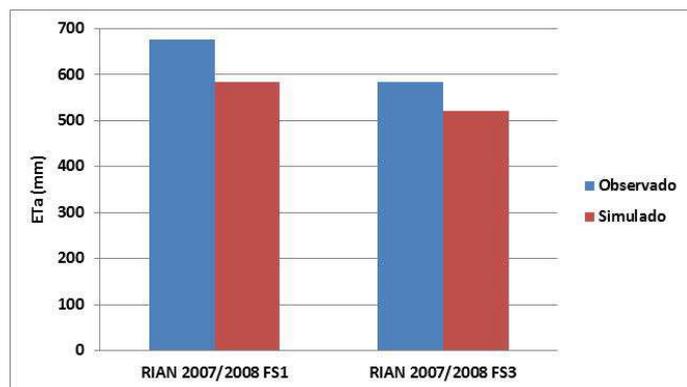


Figura 2.10. Comparación entre ETa observada y simulada en los experimentos de calibración.

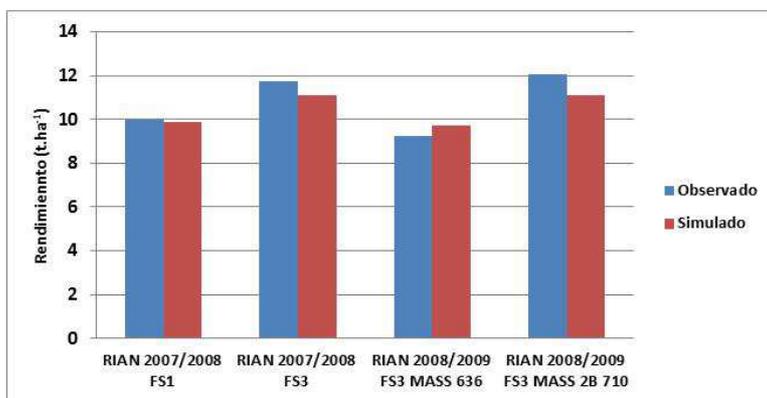


Figura 2.11a. Comparación entre rendimientos observados y simulados en los experimentos de calibración.

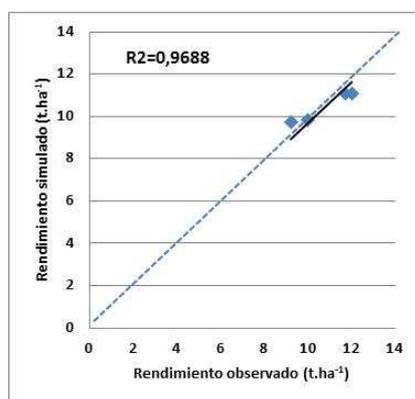


Figura 2.11b. Comparación entre rendimientos observados y simulados en los experimentos de calibración. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1. La recta de ajuste ha sido forzada al punto 0:0.

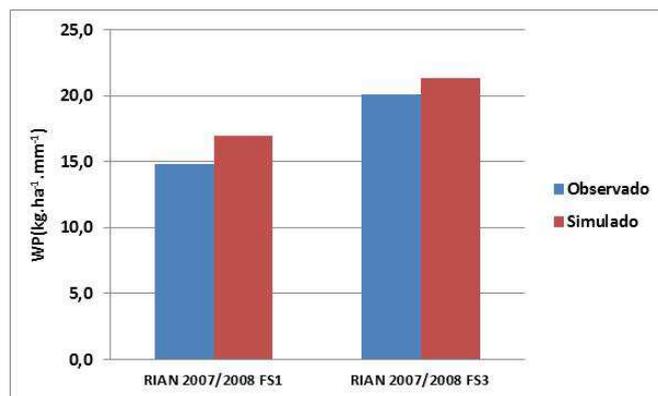


Figura 2.12. Comparación entre productividad del agua observada y simulada en los experimentos de calibración.

La tabla 2.18 muestra los indicadores estadísticos de ajuste para evolución de biomasa, cubierta vegetal y rendimiento. Para ETa y WP se calculó la desviación porcentual.

Tabla 2.18. Estadísticos para la comparación entre valores observados y simulados de biomasa, cubierta vegetal y rendimientos (experimentos de calibración).

Variable	n	R ²	Índice <i>d</i>	MAE	RMSE	NRMSE
Biomasa	12	0.932	0.979	1,409	2,073	16.6
Cubierta vegetal	8	0.945	0.842	2,0	2,121	2.25
Rendimiento	4	0.968	0.903	0,545	0,615	5.7

AquaCrop simuló adecuadamente la evolución de biomasa, según se desprende de la comparación visual (figura 2.10a) y del valor de los estadísticos (figura 2.10b y tabla 2.18): R² e índice *d* cercanos a 1 y MAE, RMSE y NRMSE bajos. Para la biomasa final la desviación promedio fue del 10.6%, siendo la menor diferencia para RIAN 2007/2008 FS1 (-1.1%) y la mayor para RIAN 2008/2009 FS3 MASS 2B710 (-28.8%). Esta última podría atribuirse en parte a cierto grado de error en los datos observados, ya que el muestreo de plantas se realizó a los 148 días desde la siembra, varios días después de madurez fisiológica, momento éste que se tomó como dato de salida de la simulación.

Si bien el ajuste fue aceptable (figura 2.11b y tabla 2.18), la CC simulada fue inferior a la observada (figura 2.11a); esto puede explicarse debido a que, como se indicó, la CC se calculó a partir de datos de AF, lo cual pudo generar algún grado de error. Lamentablemente en los experimentos no se midió CC en las etapas inicial y final del ciclo del cultivo, información que pudo haber ayudado para lograr un mejor ajuste de esta variable y un mejor análisis de los resultados. Otro factor que puede explicar esta diferencia es haber simulado con la opción de fertilidad *near optimal soil fertility*.

La ETa fue subestimada por AquaCrop en un 13.8% y 11.0% para cada experimento respectivamente. Es posible que la complicación de cuantificar con precisión el drenaje profundo haya sido una fuente de error en el cálculo de la ET, considerándose como parte de la ET una parte de agua que en realidad fue percolación, lo cual se tradujo en ET observadas mayores a las realmente ocurridas.

Para los rendimientos, la desviación promedio fue de -2.3% y los extremos variaron entre -7.7% y -1.4% (figura 2.13a). Los indicadores estadísticos (figura 2.13b y la tabla 2.18),

reflejan también buen ajuste de los rendimientos: R^2 e índice d cercanos a 1 y MAE, RMSE y NRMSE bajos.

La productividad del agua (WP) observada para el experimento RIAN 2007/2008 FS1 fue $14.8 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ y la simulada $16.9 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$, lo que significa una desviación del 14.4%. Para RIAN 2007/2008 FS3 la WP observada fue $20.1 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ y la simulada $21.3 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$, (desviación del 6.3%). La sobreestimación en la WP por AquaCrop puede atribuirse a la correspondiente subestimación de ETa que se mencionó.

2.8.2 Validación de AquaCrop

En esta sección se comparan los valores observados y simulados en los experimentos usados en la validación de AquaCrop: biomasa (figuras 2.13a y 2.13b), cubierta vegetal (figuras 2.14a y 2.14b), evapotranspiración (figura 2.15), rendimientos (figura 2.16a y 2.16b) y productividad del agua (figura 2.17).

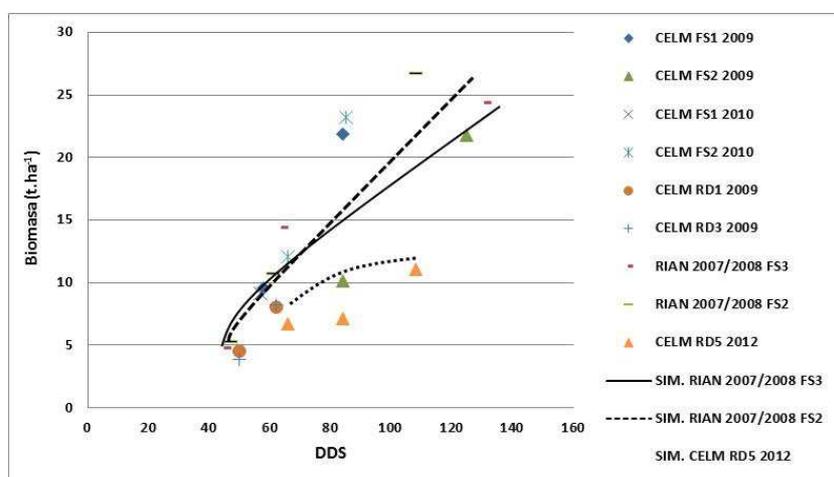


Figura 2.13a. Comparación entre biomasa observada y simulada en los experimentos de validación. Se incluye valores simulados de RIAN 2007/2008 FS2, RIAN 2007/2008 FS3 y CELM RD5 2012.

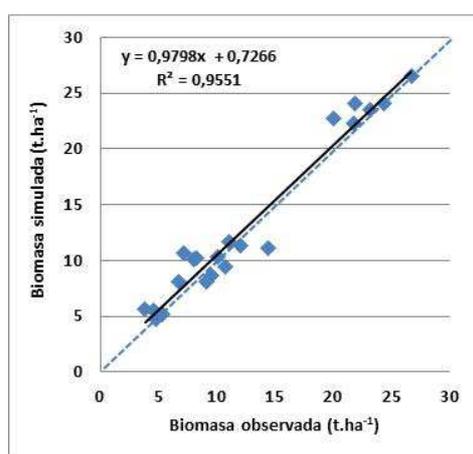


Figura 2.13b. Comparación entre biomasa observada y simulada en los experimentos de validación. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1.

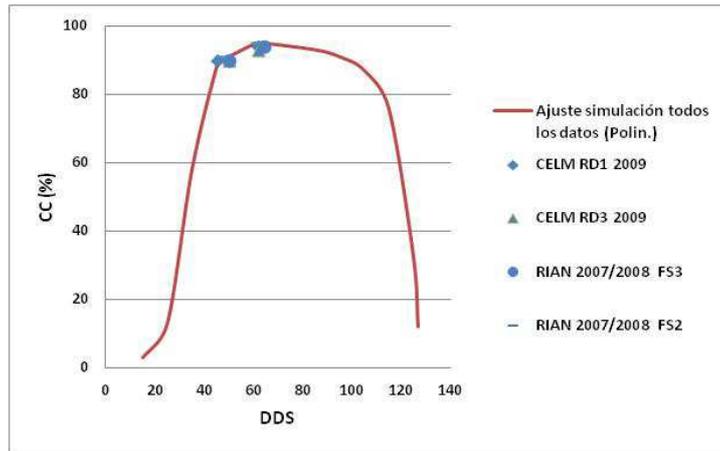


Figura 2.14a. Comparación entre valores observados y simulados de cubierta vegetal en los experimentos de validación.

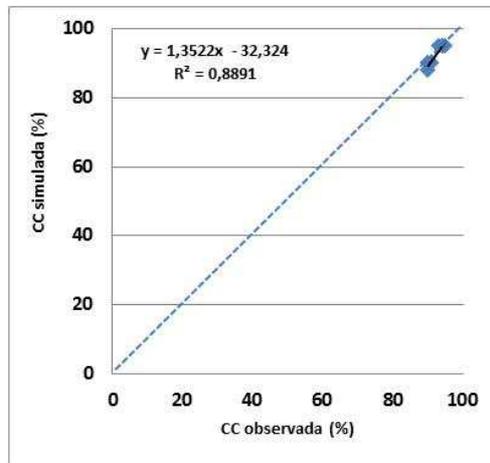


Figura 2.14b. Comparación entre valores observados y simulados de cubierta vegetal en los experimentos de validación. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1.

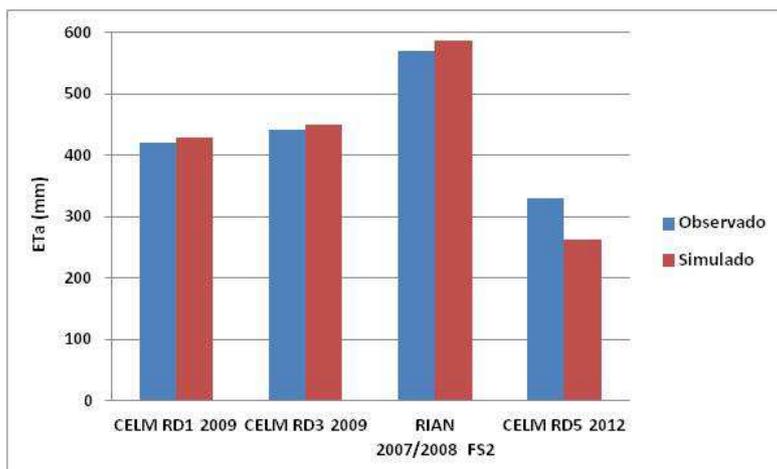


Figura 2.15. Comparación entre ETa observada y simulada en los experimentos de validación.

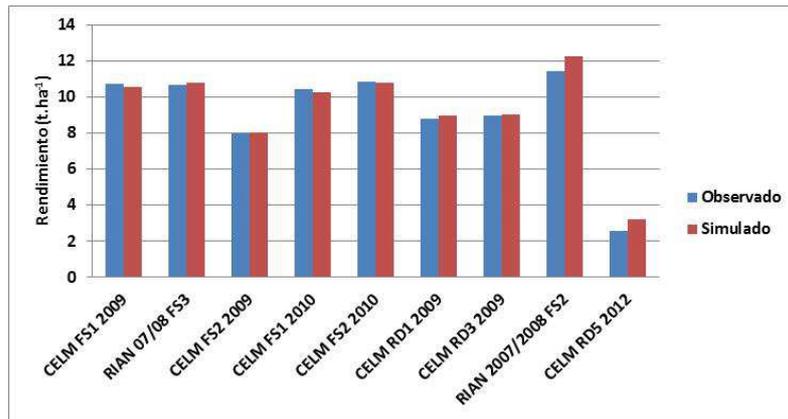


Figura 2.16a. Comparación entre rendimientos observados y simulados en los experimentos de validación.

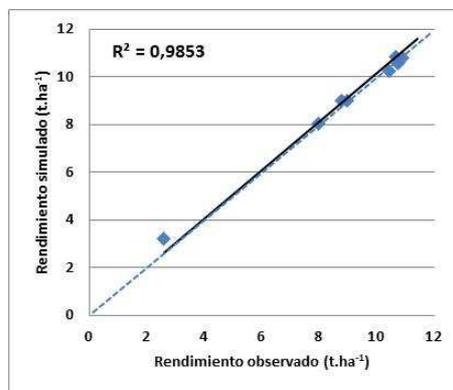


Figura 2.16b. Comparación entre rendimientos observados y simulados en los experimentos de validación. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1. La recta de ajuste ha sido forzada al punto 0:0.

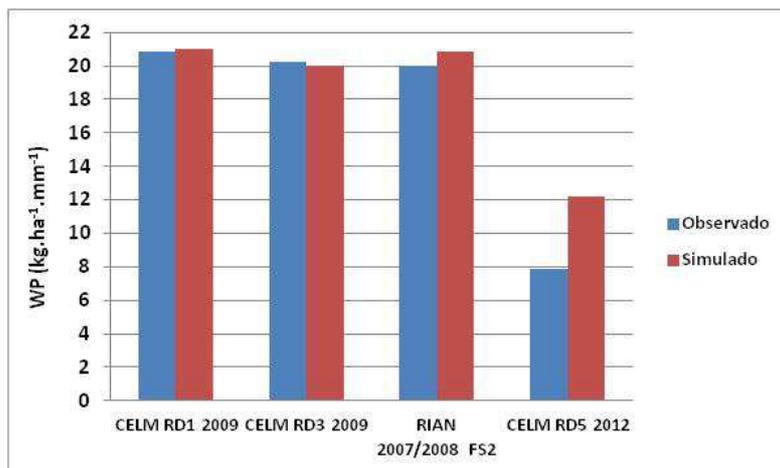


Figura 2.17. Comparación entre productividad del agua observada y simulada en los experimentos de validación.

La tabla 2.19 muestra los indicadores estadísticos de ajuste para biomasa, cubierta vegetal y rendimiento. Para ETa y WP se calculó la desviación porcentual.

Tabla 2.19. Estadísticos para la comparación entre valores observados y simulados de: biomasa, cubierta vegetal y rendimientos (experimentos de validación).

Variable	n	R ²	Índice <i>d</i>	MAE	RMSE	NRMSE
Biomasa	21	0.955	0.987	1,235	1,598	12.7
Cubierta vegetal	8	0.889	0.938	0,875	1,173	1.27
Rendimiento	8	0.985	0.995	0,259	0,361	3.6

AquaCrop simuló muy bien la evolución de biomasa, de acuerdo a la comparación visual (figura 2.15a) y el valor de los estadísticos (figura 2.15b y tabla 2.19): R² e índice *d* muy cercanos a 1 y MAE, RMSE y NRMSE bajos a muy bajos. Para la biomasa final (madurez fisiológica) la desviación promedio fue del 4.4%; la menor diferencia fue para RIAN 2007/2008 FS2 (-0.8%) y la mayor para CELM FS1 2010 (13.2%). El menor ajuste en la evolución de biomasa se observó en CELM RD5 2012 (figura 15a).

El ajuste de la CC fue aceptable (figuras 2.16a, 2.16b y tabla 2.19), con diferencias entre valores observados y simulados que no mostraron tendencias en cuanto a sub o sobreestimación, a diferencia de lo observado en la calibración.

La desviación entre la ETa simulada y la observada fue mínima, de 1.9%, 1.8% y 2.8 para CELM RD1 2009, CELM RD3 2009 y RIAN 2007/2008 FS2, respectivamente. A diferencia de la calibración, en estos experimentos la ET no fue subestimada por el modelo. En CELM RD5 2012 la ET simulada fue menor a la observada (-20.6%). La ET observada de este tratamiento podría haber sido sobreestimada debido a la dificultad de cuantificar con precisión la percolación, como se mencionó anteriormente, a lo que pudo haberse sumado el efecto de advección que se produce en pequeñas parcelas. Este efecto provoca que su ET sea superior respecto de las condiciones normales de cultivo, por efecto oasis, ropa tendida o “clothesline effect” (Pereira y Pires, 2011). La campaña 2012-2013 fue particularmente seca (188 mm durante el ciclo del cultivo) y muy cálida (31.5 °C de temperatura máxima media y 43.8 °C de máxima absoluta).

En rendimientos, los indicadores estadísticos (figura 2.18b y la tabla 2.19) indican un ajuste excelente: R² e índice *d* muy cercanos a 1 y MAE, RMSE y NRMSE muy bajos. La desviación promedio entre valores observados y simulados fue de 3.5% y los extremos variaron entre 0.7% y 23% (figura 2.18a). Es destacable que el modelo simuló muy bien rendimientos observados extremos de 2,6 y 11,423 tn.ha⁻¹. La mayor diferencia se dio en la situación de mayor estrés (CELM RD5 2012), lo que puede explicarse por lo discutido en el párrafo anterior (estrés hídrico), a lo cual se sumó las altas temperaturas registradas. Durante el ciclo del cultivo, en 65 días la temperatura superó los 35°C y en el periodo de 30 días centrado en floración, en 10 días la temperatura fue mayor a 35°C, lo cual incidió también en el bajo número de granos logrados (1,500 granos por metro cuadrado, muy inferior a otras campañas para igual híbrido y similar fecha de siembra, donde se obtuvieron entre 3,900 y 4,000 granos por metro cuadrado). El ajuste menos satisfactorio del modelo para condiciones de estrés severo se menciona también en Heng *et al* (2009) y en Hsiao *et al* (2009).

La WP también fue simulada en forma precisa por el modelo, salvo para CELM RD5 2012. La WP observada para el experimento CELM RD1 2009 fue 20.9 kg.ha⁻¹.mm⁻¹ y la simulada 21.0 kg.ha⁻¹.mm⁻¹, lo que significa una desviación del 0.5%. Para CELM RD3 2009 la WP observada fue 20.3 kg.ha⁻¹.mm⁻¹ y la simulada 20.0 kg.ha⁻¹.mm⁻¹, (desviación del -1,1%). Para RIAN 2007/2008 FS2 la WP observada fue 20.0 kg.ha⁻¹.mm⁻¹ y la simulada 20.9 kg.ha⁻¹.mm⁻¹, una desviación del 4.3%. Para CELM RD5 2012 (situación de mayor estrés) la diferencia fue del 55% (WP observada 8 kg.ha⁻¹.mm⁻¹ y WP simulada 12.2 kg.ha⁻¹.mm⁻¹). Esto se explica por los factores analizados previamente para rendimiento y ET. Conviene destacar que en todos los

casos, el estrés hídrico en maíz redujo la WP en relación a la observada en condiciones de buen suministro de agua, particularmente en el caso de estrés severo. El rango de valores observados de WP es amplio, mayor al dado por Doorenbos y Kassam 1979 (de 6 a 16 kg.ha⁻¹.mm⁻¹), aunque Zwart y Bastiaanssen (2004), en una revisión de productividad del agua en varios cultivos, citan un amplio rango de valores medios, que va de 6.5 a 29. kg.ha⁻¹.mm⁻¹.

2.9 Meta análisis del desempeño de AquaCrop en distintos ambientes y su relación con el comportamiento en Santiago del Estero, Argentina.

El maíz es, probablemente, el cultivo en el cual más se ha verificado AquaCrop. En esta sección se examina el comportamiento del modelo para simular el crecimiento, desarrollo y rendimiento del maíz en una amplia diversidad de climas, cultivares, tipos de suelo, condiciones de humedad del suelo y manejo agronómico, a partir de información obtenida de artículos publicados. Luego se compararon los ajustes obtenidos con los resultados de su aplicación en Argentina. Como antecedentes de este tipo de estudio, pueden consultarse los trabajos de Steduto *et al* (2011) y Vanuytrecht *et al* (2014), este último con una minuciosa observación de la sensibilidad del modelo.

La calibración original del modelo (Hsiao *et al* 2009) se realizó en el clima árido y seco de Davis, California (EUA), fijándose los parámetros conservadores en tales condiciones. Se revisó su uso en diversas condiciones, que se resumen en la tabla 2.20.

Tabla 2.20. Antecedentes de uso de AquaCrop en maíz, en distintas localidades.

Lugar	Clima	Lluvia (mm)	ETo (mm.dia ⁻¹)	Condiciones	Autor(es)
California, EUA	Semiárido mediterráneo, estación seca primavera-verano	470 (octubre-mayo)**	Media: 6.5-7; máxima: 9-10	Riego	Hsiao <i>et al</i> 2009
Zaragoza, España	Semiárido, estación seca primavera-verano	75*	4.0**	Riego	Heng <i>et al</i> 2009
Rutigliano, Italia	Semiárido, mediterráneo, estación seca primavera-verano	535**	s/d	Riego	Katerji <i>et al</i> 2013
Eldoret, Kenia	Tropical sub-húmedo	s/d	s/d	Secano	Kipkorir <i>et al</i> 2010
Nepal	Tropical-monzónico	2000**	4**	Secano	Shresth <i>et al</i> (2013)
Sinaloa, México	Árido, estación seca primavera-verano	340 (julio-octubre)**	4.2**	Riego	Flores Gallardo <i>et al</i> 2013
Pennsylvania, EUA	Húmedo	561*	4.3*	Secano	Mebane <i>et al</i> 2013
Gainesville, Florida, EUA	Húmedo	670	Media: 4.6	Riego y secano	Heng <i>et al</i> 2009
Serbia	Templado frío	614** 358***	5 [^]	Secano y riego	Stricevic <i>et al</i> 2011
Natural Region 2, Zimbabwe	s/d	s/d	s/d	Secano	Masanganise <i>et al</i> 2013
Nueva Delhi, India	Semiárido	600*	4.0*	Riego	Abedinpour <i>et al</i> 2012
Bushland, Texas, EUA	Semiárido, ventoso	343*	10 o más	Riego	Heng <i>et al</i> 2009

*Promedio en los años de los experimentos; **Promedio anual; *** Promedio anual en el ciclo del cultivo; [^]En los meses de máxima demanda; s/d: no se informa

Solamente Stricevic *et al* 2011 cambiaron ciertos parámetros conservadores del cultivo: *base temperature; initial canopy cover, canopy expansion, maximum canopy cover, basal crop coefficient k_{cb} , water productivity* y *harvest index reduction for inhibition stomata*.

En las figuras 2.18 y 2.19 se muestra el ajuste de AquaCrop para la simulación de biomasa y rendimiento para nueve y doce localidades, respectivamente.

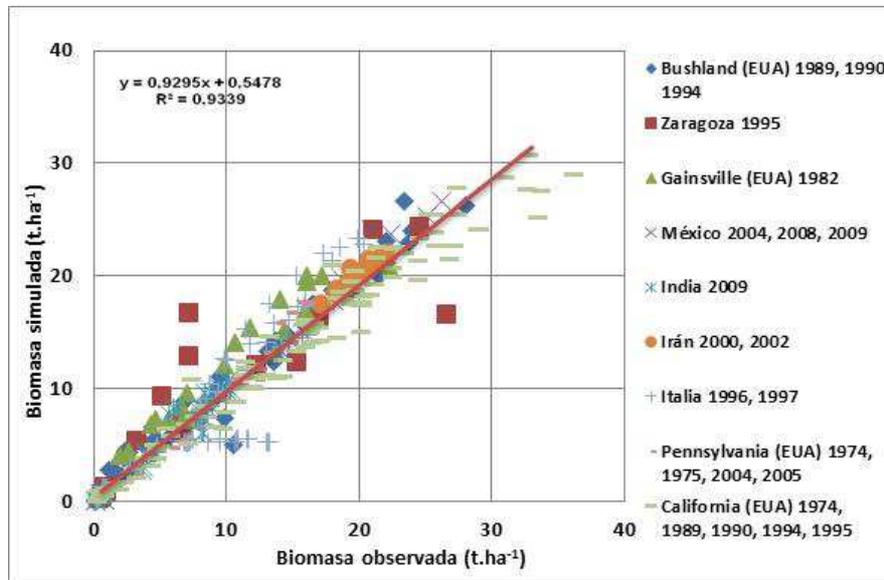


Figura 2.18. Comparación entre biomasa observada y simulada por AquaCrop en distintos lugares del mundo.

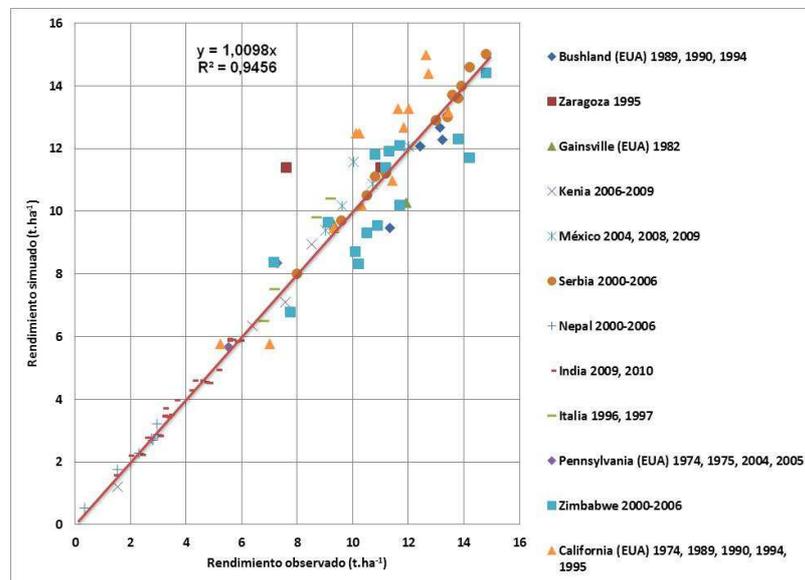


Figura 2.19. Comparación entre rendimientos observados y simulados por AquaCrop en distintos lugares del mundo. La recta de ajuste ha sido forzada al punto 0:0.

La revisión general sobre el desempeño de AquaCrop demostró su capacidad para simular adecuadamente la producción del maíz en gran diversidad de situaciones: $R^2=0.933$ y $R^2=0.945$ para biomasa y rendimientos respectivamente. Cuando se incorporaron los datos de Santiago del Estero, Argentina (figuras 2.20 y 2.21), los ajustes se mantuvieron prácticamente

iguales ($R^2=0.945$ y $R^2=0.946$ para biomasa y rendimientos respectivamente). Por lo tanto, los resultados obtenidos en Argentina guardaron buena relación con los antecedentes.

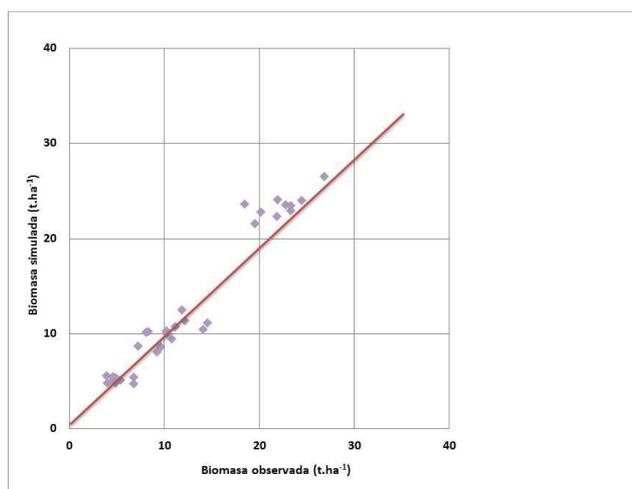


Figura 2.20. Comparación entre biomasa observada y simulada por AquaCrop en distintos lugares del mundo (recta de ajuste, de Figura 2.20) y los datos de Santiago del Estero, Argentina.

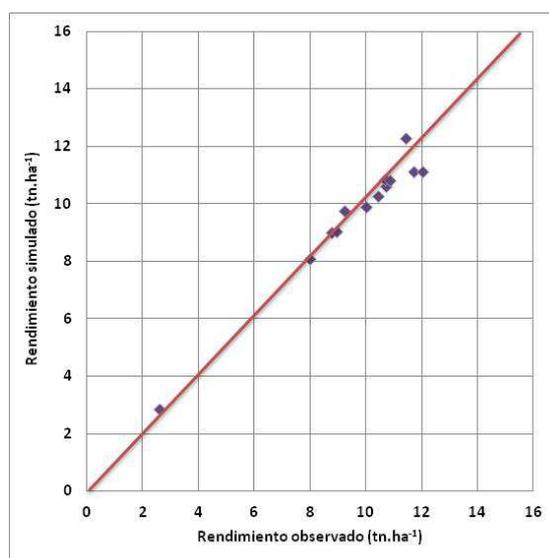


Figura 2.21. Comparación entre rendimientos observados y simulados por AquaCrop en distintos lugares del mundo (recta de ajuste forzada a 0:0, de Figura 2.21) y los datos de Santiago del Estero, Argentina.

2.10 Conclusiones

La habilidad capacidad de AquaCrop para simular el comportamiento del cultivo de maíz en las condiciones del Sistema de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero, República Argentina, se considera muy buena. El modelo simuló adecuadamente el comportamiento de dos híbridos, sembrados en cuatro momentos diferentes y bajo condiciones de disponibilidad de agua adecuada, estrés hídrico leve y estrés hídrico intenso en experimentos realizados entre los años 2007 y 2012. Los experimentos usados para la calibración fueron sin estrés hídrico y los de validación, con y sin estrés. Debido a las condiciones de fertilidad de los experimentos, se simuló con la opción de limitación de nutrientes. Se mantuvieron la mayoría de los parámetros de cultivo conservadores definidos por Hsiao *et al* (2009), introduciendo

algunos ajustes en *canopy growth coefficient* y *canopy decline coefficient*. Los indicadores estadísticos confirmaron un grado de acuerdo que puede calificarse de bueno a muy bueno. Los valores para la validación fueron: biomasa ($\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$): $R^2=0,955$, índice de Willmott (d)=0,987 MAE=1,235, RMSE=1,598 y NRMSE=12,7; para rendimiento ($\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$): $R^2=0,985$, d=0,995, MAE=0,259, RMSE=0,361 y NRMSE=3,6; para cubierta vegetal (%): $R^2=0,889$, d=0,938, MAE=0,875, RMSE= 1,173 y NRMSE=1,27. En general, AquaCrop subestimó la ET, aunque el cálculo de la ET observada pudo haber tenido cierto grado de error, al haberse considerado como parte de la ET al drenaje profundo. En concordancia con publicaciones antecedentes (Heng, L. *et al* 2009) y Hsiao, T. *et al* 2009), el modelo simuló con menor precisión los rendimientos y la ET en condiciones de estrés hídrico severo. Se enfatiza la precisión del modelo para estimar la producción, ya que, si bien deben tenerse en cuenta, otros parámetros (biomasa, cubierta vegetal, índice de cosecha, evapotranspiración) se consideran accesorios en relación a los rendimientos. El hecho de haber mantenido los parámetros conservadores del cultivo prácticamente sin modificar es una condición importante para el éxito de su aplicación, ya que reduce la respuesta principalmente a información sitio-específica (clima, suelo, manejo agronómico). Se hizo también una revisión del desempeño del modelo para simular el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz bajo un amplio rango de condiciones de clima, suelo, materiales genéticos y manejo agronómico, analizando la literatura existente. Se demostró la buena respuesta del modelo en doce localidades de características climáticas diversas (R^2 0.933 y 0.946 para biomasa y rendimiento respectivamente). Cuando se incorporaron los datos de los experimentos realizados en Santiago del Estero y las simulaciones correspondientes, los ajustes se mantuvieron prácticamente iguales, es decir, guardaron buena relación con los antecedentes.

El meta análisis demostró la capacidad de AquaCrop para simular con precisión la producción de maíz en una amplia diversidad de climas (incluido el de Santiago del Estero), lo que sugiere la validez de su formulación y la posibilidad de generalizar su aplicación a pesar de tener conceptos y principios más simples que otros modelos. Es destacable la simplicidad y el entorno amigable del modelo; su horizonte de utilización es amplio en aspectos tales como estimación de rendimientos, análisis de riesgos productivos por impacto de sequías, analizar estrategias de riego a nivel de finca para mejorar el uso del agua y como apoyo en la evaluación del desempeño de sistemas de riego.

Bibliografía

- Abedinpour, M.; A. Sarangi; T.B.S. Rajput; M. Singh; H. Pathak, T. Ahmad. 2012. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management* 110 (2012), 55-66.
- Allen, R.G.; L. S. Pereira; D. Raes and M. Smith. 1998. *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy, 300 pg.
- Angueira C.; D. Prieto; J. López; G. Barraza. 2007. *Sistema de Información Geográfica de Santiago del Estero*. SigSE V. 2.0.CD. ISBN 987-521-170-2.
- Baker, D.N.; J.N. Larnbert and J.M. McKinion. 1983. GOSSYM: A simulator of cotton growth and yield. *Tech. Bull.* 1089. South Carolina Agric. Exp. Stn., Clemson.
- Brown, L.G.; J.W. Jones; J.D. Hesketh; J.D. Hartsog; F.D. Whisler and F.S. Harris. 1985. COTCROP: Computer simulation of growth and yield. *Information Bull.* No. 69. Agric. Forest. Exp. Stn., Mississippi State, MS.
- Doorenbos, J. and Kassam, A. 1979. *Yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome, FAO.
- Evett, R. and J. A. Tolk. 2009. Introduction: Can Water Use Efficiency Be Modeled Well Enough to Impact Crop Management? *Agronomy Journal*. Volume 101, Issue 3. 2009. 423-425.
- Farahani, H. J.; G. Izzì and T. Oweiss. 2009. Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. *Agronomy Journal*. Vol. 101. Issue 3, 469-476.
- Fereres, E.; S. Walker; L. Heng; T. Hsiao; P. Steduto; D. Raes; G. Izzì; S. Asseng; S. Evett. 2012. *AquaCrop applications*. In: Steduto, P.; T. C. Hsiao; E. Fereres and D. Raes. *Crop Yield Response to Water*. Pp. 50-68. FAO Irrigation and Drainage Paper 66. 2012. FAO, Rome, Italy.
- Flores Gallardo, H.; Ojeda Bustamante, W.; Flores Magdaleno, H.; Sifuentes Ibarra, E.; Mejía Sáenz, E. 2013. Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo Aquacrop. *Agrociencia*, vol. 47, num. 4, 2013, pp. 347-359.
- García, F. 2005. Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de maíz. INPOFOS/PPI/PPIC Cono Sur. 19 p. <http://www.fertilizando.com/articulos/criterios-manejo-fertilizacion-cultivo-maiz.pdf>
- García-Vila, M. and E. Fereres. 2012. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *European J. of Agronomy* Vol. 36 Num. 1 (2012), 21–31.
- Gowda, P.; Sunil A. Satyareddy and S. B. Manjunath. 2013. Crop Growth Modeling: A Review. *Research and Reviews: Journal of Agriculture and Allied Sciences*, Vol.2, Issue 1, January-March 2013, pp. 1-11. ISSN: 2319-9857.
- Hearn, A.B. and G.A. Constable. 1984. Irrigation for crops in a sub-humid environment. VII Evaluation of irrigation strategies for cotton. *Irrig. Sci.* 5:75–94.
- Hsiao, T. C.; L. Heng; P. Steduto; B. Rojas Lara; D. Raes and E. Fereres. 2009. AquaCrop. The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. *Agronomy Journal*, Volume 101, Issue 3, 448-459.
- Hsiao, T.; E. Fereres; P. Steduto; D. Raes. *AquaCrop parameterization, calibration and validation guide*. In: Steduto, P.; T. C. Hsiao; E. Fereres and D. Raes. *Crop Yield Response to Water*. Pp. 70-87. FAO Irrigation and Drainage Paper 66. 2012. FAO, Rome, Italy.
- Jones, J.; G. Hoogenboom; C.H. Porter; K.J. Boote ; W.D. Batchelor; L.A. Hunt; P.W. Wilkens; U. Singh; A.J. Gijsman; J.T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. *Europ. J. Agronomy* 18 (2003) 235/265.

- Katerji, N.; P. Campi; M. Mastrorilli. 2013. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management* 130 (2013) 14-26.
- Kipkorir, E.C.; E. Mugalavai; R. Bargerei. 2010. *Application of AquaCrop model for within-season prediction of maize yields*. Proceeding of: *Capacity Development for Farm Management Strategies to Improve Crop-Water Productivity using AquaCrop*.
- Masanganise, J.; K. Basira; B. Chipindu; E. Mashonjowa; T. Mhizha. 2013. Testing the utility of a growth crop simulation model in predicting maize yield in a changing climate in Zimbabwe. *International Journal of Agricultural and Food Science* 2013, 3(4): 157:163.
- Mebane, V. J.; R. L. Day; J. M. Hamlett; J. E. Watson and G. W. Roth. 2013. Validating the FAO AquaCrop Model for Rainfed Maize in Pennsylvania. *Agronomy Journal*, volume 105, Issue 2, 2013, pp. 419-427.
- Nielsen, D. C.; J. J. Miceli-García and D. J. Lyon. 2012. Canopy Cover and Leaf Area Index Relationships for Wheat, Triticale and Corn. *Agronomy Journal*, vol. 104, Issue 6, 2012, pp. 1569-1573.
- Pereira, A. and L. Pires. 2011. *Evapotranspiration and Water Management for Crop Production, Evapotranspiration-From Measurements to Agricultural and Environmental Applications*, Dr. Giacomo Gerosa (Ed.), ISBN: 978-953-307-512-9, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/evapotranspiration-from-measurements-to-agricultural-and-environmentalapplications/evapotranspiration-and-water-management-for-crop-production>.
- Orgaz, F.; L. Mateos and E. Fereres. 1992. Season length and cultivar determine the optimum evapotranspiration deficit in cotton. *Agron. J.*, 84:700-706.
- Raes, D.; P. Steduto; T. Hsiao and E. Fereres. 2009. *AQUACROP Reference Manual*. AquaCrop Version 3.0. FAO, Land and Water Division. Rome, Italy.
- Raes, D.; P. Steduto; T. Hsiao and E. Fereres. 2012. *AQUACROP Reference Manual*. AquaCrop Version 4.0. FAO, Land and Water Division. Rome, Italy.
- Ritchie, J. T. 1983. *Efficient Water Use in Crop Production: Discussion on the Generality of Relations Between Biomass Production and Evapotranspiration*. Pp. 29-43. En: *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. H. M. Taylor, W. R. Jordan, T. R. Sinclair (Eds). American Society of Agronomy.
- Ritchie, J.T.; D.C. Godwin and S. Otter-Nacke. 1985. CERES—Wheat. A simulation model of wheat growth and development. Texas A&M Univ. Press, College Station.
- Romani, M.; S. Uhart y M. Mondino. 2010a. Efectos de la fecha de siembra y densidad poblacional sobre el rendimiento de maíz tropical, tropical x templado y templado en el Área de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero. IX Congreso Nacional de Maíz y Simposio Nacional de Sorgo. Rosario 2010.
- Shrestha, N.; D. Raes; S. Kumar Sah. 2013. Strategies to improve cereal production in the Terai region (Nepal) during dry season: simulations with aquacrop. *Procedia Environmental Sciences* 19 (2013) 767–775.
- Smith, M.; D. Clarke and K. El-Askari. 1998. *CROPWAT. Cropwat for Windows. User guide*. FAO, Rome, Italy, 43 pg.
- Steduto, P. 2003. Biomass water-productivity. Comparing the growth-engines of crop models. In: *FAO Expert Meeting on Crop Water Productivity Under Deficient Water Supply*. Rome, February 26-28.
- Steduto, P.; D. Raes; T. Hsiao; E. Fereres; L. Heng; G. Izzi and J. Hoogeveen. 2009. AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions. *Options Méditerranéennes, Series A, No. 80*.285-292.
- Steduto, P.; T. Hsiao and E. Fereres. 2007. On the conservative behaviour of biomass water productivity. *Irrig. Sci.*, 25: 189-207.

- Steduto, P.; T. Hsiao; D. Raes; E. Fereres; G. Izzi; L. Heng and G. Hoogeveen. 2011. Performance Review of AquaCrop-The FAO Crop Water Productivity Model. ICID 21st International Congress on Irrigation and Drainage. 15-23 October 2011. Teheran, Iran.
- Steduto, P.; D. Raes; T. Hsiao; E. Fereres. 2012. *AquaCrop concepts, rationale and operation*. In: Steduto, P.; T. C. Hsiao; E. Fereres and D. Raes. *Crop Yield Response to Water*. Pp. 17-49. FAO Irrigation and Drainage Paper 66. 2012. FAO, Rome, Italy.
- Stricevic, R.; M. Cosic; N. Djurovic; B. Pejic; L. Maksimovic. 2011. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management* 98 (2011) 1615-1621.
- Tsuji, G.Y.; G. Hoogenboom; P. Thornton (Eds). 1998. *Understanding Options for Agricultural Production*. Series System Approaches for Sustainable Agricultural Development Vol. 7. XIII, 400 p.
- Vanuytrecht, E.; D. Raes; P. Willems. 2014. Global sensitivity analysis of yield output from the water productivity model. *Environmental Modelling & Software* 51 (2014) 323-332.
- Wang E.; Robertson M.J.; Hammer G.L.; Carberry P.S.; Holzworth D.; Meinke H.; Chapman S.C.; Hargreaves J.N.G.; Huth N.I. and McLean G. 2002. Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM. *European Journal of Agronomy* 18, 121–140.
- Washington State University. *CropSyst Model*.
http://www.bsyse.wsu.edu/CS_Suite/CropSyst/index.html
- Willmott, C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Meteorol. Soc.* 63:1309–1313.

CAPÍTULO 3
CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL
MODELO *AQUACROP* PARA EL
CULTIVO DE ALGODÓN EN LAS
CONDICIONES AGROECOLÓGICAS
DE SANTIAGO DEL ESTERO,
ARGENTINA

Capítulo 3

Calibración y Validación del Modelo AquaCROP para el cultivo de algodón en las condiciones agroecológicas de Santiago del Estero, Argentina

Resumen

En este capítulo el modelo AquaCrop se calibró y validó para simular el comportamiento del cultivo de algodón en las condiciones agroecológicas y productivas del Área de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero, República Argentina, utilizando experimentos realizados en la EEA Santiago del Estero del INTA. Los experimentos se desarrollaron entre los años 2010 y 2013 y tuvieron como objetivos determinar la respuesta del algodón a tratamientos de riego deficitario y a contenidos variables de agua en el suelo, sin condiciones de estrés. Los experimentos usados para la calibración fueron sin estrés hídrico y los de validación, con y sin estrés. Se cambiaron parámetros considerados conservadores (coeficiente de crecimiento de la cubierta vegetal (CGC), coeficiente de declinación de la cubierta vegetal (CDC), tiempo a máxima cubierta vegetal, tiempo a floración, duración de la floración, longitud de período de formación del índice de cosecha HI, tiempo a inicio de senescencia de cubierta vegetal, tiempo a maduración, índice de cosecha y máxima cubierta vegetal), a los fines de adaptar el archivo de cultivo a las características de los cultivares utilizados en los experimentos y al sistema de cultivo en uso actual en Santiago del Estero. Los indicadores estadísticos confirmaron un grado de ajuste que puede calificarse de bueno a muy bueno. Los valores para la validación fueron: biomasa ($\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$): $R^2=0.957$, índice de Willmott (d)=0.989, MAE=0,590, RMSE=0,801 y NRMSE 13.2. Para CC: $R^2=0.916$, $d=0.976$, MAE=4.893, RMSE=6.039 y NRMSE 8.1. Para ET: $R^2=0.747$, $d=0.699$, MAE=84, RMSE=93 y NRMSE 15.2. Para rendimiento ($\text{tn}\cdot\text{ha}^{-1}$): $R^2=0.940$, $d=0.974$, MAE=0,317, RMSE=0,413 y NRMSE=10.1. Para WP ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$): $R^2=0.784$, $d=0.858$, MAE=1.30, RMSE= 1.531 y NRMSE=23.1. La desviación entre valores observados y simulados fueron, en promedio: biomasa final 6.9%, ET 13.9%, rendimientos 2.9% y WP 20.6%. El modelo simuló adecuadamente el comportamiento de dos cultivares creciendo en diversas condiciones de humedad del suelo.

3.1 El modelo Aquacrop y su aplicación en el cultivo de algodón

Existen algunos antecedentes de calibración y validación de AquaCrop para el cultivo de algodón. Farahani *et al* (2009) utilizaron el modelo en un clima cálido, seco y ventoso en el norte de Siria (lluvias promedio de $350 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$, concentradas en otoño e inicio de primavera); Qiao (2012) en un clima subhúmedo, en Carolina del Sur (EUA); Heidariya *et al* (2012) en Irán, en un clima mediterráneo con veranos secos y García Vila *et al* (2009) quienes calibraron y validaron el modelo para las condiciones de Córdoba, España (clima semiárido cálido con estación seca en primavera verano, precipitaciones promedio de $550 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$), generando los valores de los parámetros considerados conservadores que se sugieren usar con el modelo (Steduto *et al* 2012).

Dado que no hay muchos antecedentes de la aplicación del modelo para simular el crecimiento, desarrollo y rendimiento del algodón, resulta interesante estudiar su respuesta en el clima semiárido cálido con estación húmeda en primavera-verano, característico del Área de Riego del Río Dulce, provincia de Santiago del Estero, Argentina. Por otra parte, las características de los cultivares actualmente difundidos en Argentina y su manejo agronómico son diferentes a las expresadas en el archivo del cultivo original del modelo (Evet 2012) y, en general, a los utilizados en los experimentos arriba citados. En Córdoba, la densidad de plantación varió entre 100,000 y 130,000 $\text{pl}\cdot\text{ha}^{-1}$ y el ciclo del cultivo en promedio fue de 170

días; en Irán, densidad de 120,000 pl.ha⁻¹ y ciclo de 177 días; en Siria, la densidad varió entre 70,000 y 100,000 pl.ha⁻¹ y el ciclo entre 133 y 147 días; en EUA, la distancia entre líneas fue de 0.97 m (no se especifica densidad de siembra) y el ciclo del cultivo en promedio fue de 145 días. Mientras tanto, en Santiago del Estero, Argentina, los experimentos se sembraron con una densidad mayor (220,000 pl.ha⁻¹) y el ciclo fue de 140 a 145 días. La distancia entre líneas fue de 0.52 m; el manejo agronómico se orienta a lograr plantas de sólo 0.9 a 1.0 m de altura, aplicándose regulador de crecimiento para evitar el crecimiento vegetativo excesivo y defoliante, sobre el final del ciclo del cultivo.

3.2 Objetivo

El objetivo de este trabajo fue calibrar y validar el modelo AquaCrop para el cultivo de algodón, en las condiciones agroecológicas del Área de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina.

3.3 Materiales y métodos

3.3.1 Área de estudio

El estudio se realizó en el Sistema de Riego del Río Dulce-Los Quiroga, la cual se extiende entre los 27°25' y 28°30' de Latitud Sur y entre los 64°20' y 63°45' de Longitud Oeste. Comprende parte de los departamentos Capital, Loreto, Silípica Robles, Banda y San Martín. Las principales características del SRRD se describieron en el apartado 1.3 del Capítulo 1. Los suelos predominantes son de textura franco limosa, con una secuencia de horizontes A1-AC-C1-C2 y una capacidad de agua disponible total de alrededor de 160-170 mm.m⁻¹. El agua del Río Dulce es de buena calidad, la conductividad eléctrica (CE) es 0,6 dS.m⁻¹ con leves variaciones espaciales.

3.3.2 Suelo y condiciones climáticas

El suelo pertenece a la Serie “La María” y fue descrito en el capítulo 2. Los datos meteorológicos diarios se obtuvieron de la estación meteorológica automática Davis Vantage Pro[®], ubicada en el campo experimental. Los datos de entrada para correr el modelo fueron: temperatura máxima y mínima, lluvia, ETo (calculada por el método de FAO Penman-Monteith, Allen *et al* 1998). El comportamiento de las variables climáticas durante los años de los experimentos se presenta en las figuras 3.1 a 3.3; en la tabla 3.1 se muestra un resumen de las mismas.

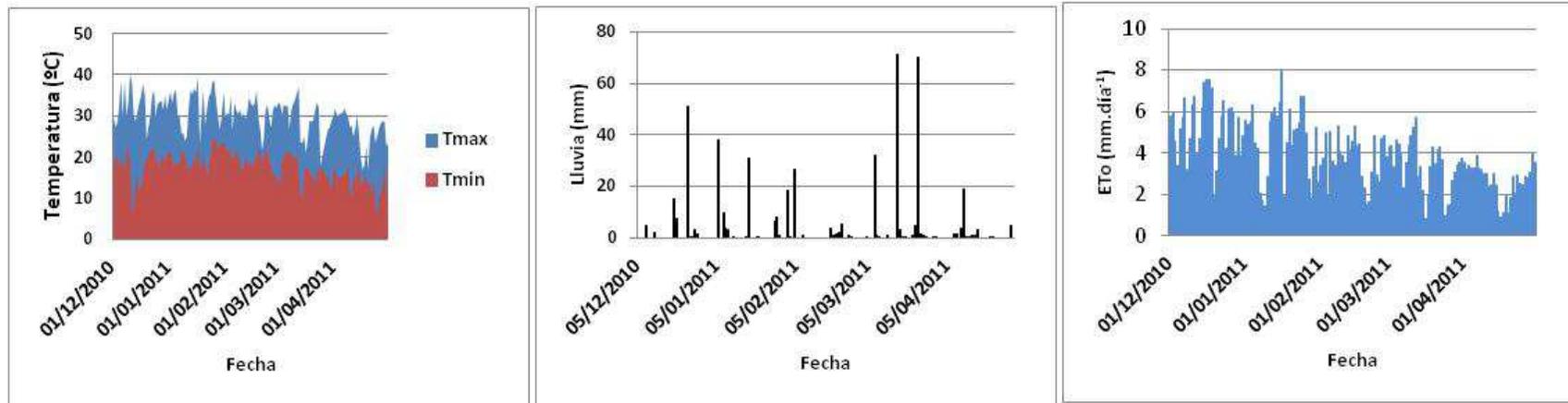


Figura 3.1. Variables climáticas (temperatura, lluvia y ETo) durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Experimentos RD0 2010/2011 (calibración) y RD 2010/2011 (validación).

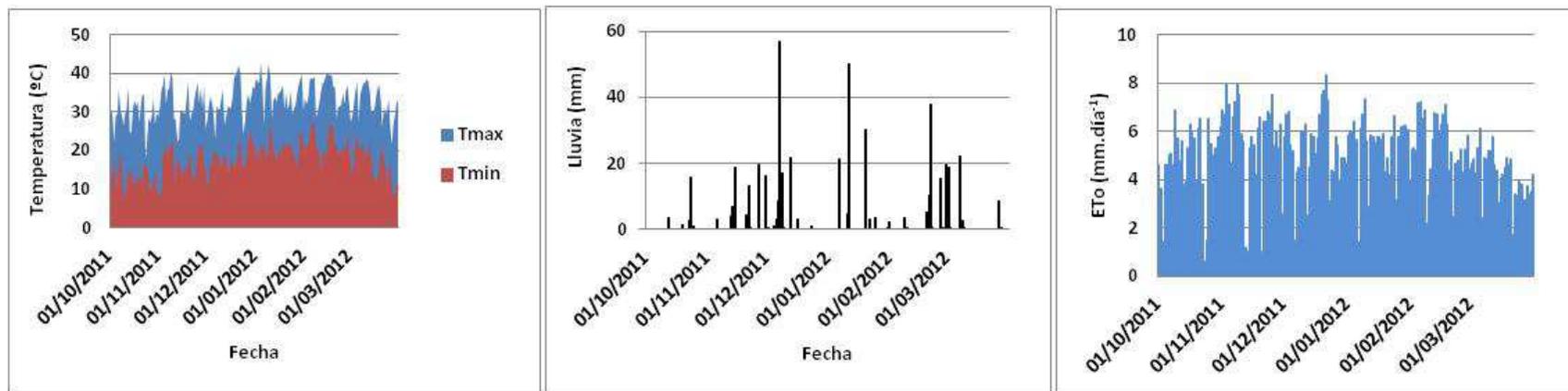


Figura 3.2. Variables climáticas (temperatura, lluvia y ETo) durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Experimentos RD0 2011/2012, ALG 2011/2012 T1 (calibración), RD 2011/2012 y ALG 2011/2012 (validación).

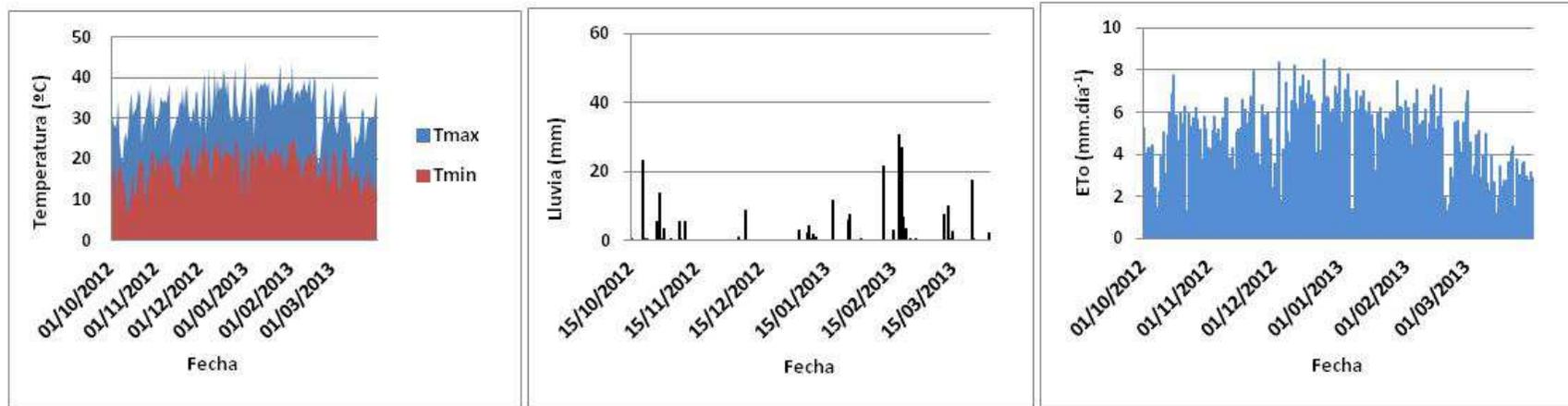


Figura 3.3. Variables climáticas (temperatura, lluvia y ETo) durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Experimentos ALG 2012/2013 T1 (calibración) y ALG 2012/2013 (validación).

Tabla 3.1. Resumen del comportamiento de las variables climáticas durante los experimentos de algodón.

	Tmax. media (°C)	Tmin. Media (°C)	Tmax. abs. (°C)	Tmin. abs. (°C)	Lluvia (mm)	ETo media (mm.día ⁻¹)	ETo max. (mm.día ⁻¹)
RDO 2010/2011 (calibración) y RD 2010/2011 (validación)	30.1	17.6	40.0	5.3	466	4.0	7.9
RDO 2011/2012, ALG 2011/2012 T1 (calibración), RD 2011/2012 y ALG 2011/2012 (validación)	32.8	17.8	43.0	7.0	461	5.1	8.3
ALG 2012/2013 T1 (calibración) y ALG 2012/2013 (validación)	32.9	18.5	43.8	6.6	237	5.1	8.5

Tmax media: temperatura máxima media; Tmin media: temperatura mínima media; Tmax abs: temperatura máxima absoluta; Tmin abs: temperatura mínima absoluta; ETo max: ETo máxima

3.3.3 Descripción de los experimentos

Los experimentos para la calibración y validación de AquaCrop se realizaron en la Estación Experimental Agropecuaria Santiago del Estero, del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA-EEASE), ubicado en 28° 01' 30'' de latitud sur y 64° 14' 55'' de longitud oeste, a 169 metros sobre el nivel del mar (Figura 3.4). Se usaron experimentos sembrados en tres campañas agrícolas: 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013. Un grupo de experimentos estuvo relacionado con la respuesta del algodón al riego deficitario controlado (RDC) y el otro a la respuesta a posibles excesos de humedad en el suelo. Para la calibración se utilizaron tratamientos sin estrés hídrico y para la validación tratamientos con distintos aportes de agua.



Figura 3.4. Campo Experimental “La María” del INTA EEA Santiago del Estero. Ubicación de las parcelas experimentales de algodón (Imagen: Google Earth).

La calibración de AquaCrop se hizo en dos grupos de experimentos, que se describen por separado a continuación.

Experimentos de calibración A

Estos tratamientos se identifican como RDO 2010/2011 y RDO 2011/2012 y formaron parte de un experimento en el que se estudió la respuesta del algodón a condiciones de riego deficitario, siendo estos los tratamientos testigos (sin estrés hídrico). Se sembró la variedad *Guazuncho 2000 RR*, la distancia de siembra fue de 0.52 metros entre líneas. En estado de dos hojas expandidas se raleó manualmente dejando 9 plantas por metro lineal, correspondiente a una densidad de plantación de 220,000 plantas por hectárea (pl.ha^{-1}). La unidad experimental (parcela) consistió de 12 surcos de 10 metros de largo y se empleó un diseño experimental totalmente aleatorizado con cuatro repeticiones. Se aplicó 170 kg.ha^{-1} de urea en aparición de primer pimpollo. Se aplicó regulador de crecimiento tomando como referencia el largo medio de entrenudo (por medición de la altura de la planta y conteo de número de nudos). Cuando el largo medio de entrenudo superó 4.5 cm, se aplicó regulador en dosis variables según el estado fenológico. Cuando se alcanzó el 30% de cápsulas abiertas, se aplicó defoliante. Se utilizó riego por goteo (una línea de goteros por línea de cultivo) y en estos tratamientos se repuso el 100% de la ET_c , que se calculó en forma diaria según la siguiente ecuación:

$$ET_c = ETo * kc$$

donde:

ETo : Evapotranspiración del cultivo de referencia según la fórmula de Penman-Monteith modificada por FAO (FAO-PM).

Kc : coeficiente del cultivo de maíz (FAO 2006).

Se registró fecha de aplicación y dotación de los riegos. Los registros y determinaciones fueron las siguientes:

En planta:

- observación de los eventos fenológicos más relevantes: fin de etapa vegetativa, primer pimpollo, primera flor, fin de floración efectiva, primera cápsula, madurez;
- materia seca: determinación de materia seca en las etapas fenológicas mencionadas. La superficie muestreada fue de 0.5 m^2 (0.5 m lineales de 2 surcos contiguos) por parcela. El muestreo final se hizo sobre 1 m^2 . Las plantas se secaron en estufa a 80°C hasta peso constante;
- cubierta vegetal: se determinó mediante fotografías digitales;
- rendimiento: se determinó a partir de la cosecha de 8 m^2 (8 m lineales en 2 surcos contiguos) por parcela. Sobre una submuestra de 1 m^2 (1 m lineal en 2 surcos contiguos) se contó el número de cápsulas por planta y el peso promedio del cápsula.

En suelo:

- humedad inicial, determinada por gravimetría, hasta una profundidad de 3 metros en cada parcela. El contenido de agua del perfil se determinó posteriormente cada 10-15 días. Los intervalos de muestreo fueron 0-30, 30-45, 45-60, 60-75, 75-90, 90-105, 105-125, 125-150, 150-175, 175-200, 200-230, 230-260, 260-300 centímetros.

Basado en las mediciones de agua en el suelo, el consumo de agua del cultivo (ET_a) se determinó mediante balance hídrico simplificado (mediante cálculos parciales a lo largo del ciclo de crecimiento), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$ET_a = R + P \pm \Delta S \quad [3.1]$$

Donde: ETa: evapotranspiración real

R: riego

P: lluvia

ΔS: variación de almacenaje de agua en el suelo

La escorrentía se consideró despreciable (pendiente media del terreno de 0.20 %) y la percolación profunda se ignora, suponiendo que es pequeña en relación a la magnitud de la ETc, dado que el balance hídrico se hizo con frecuencia semanal y la reposición de la cantidad de agua consumida se hizo cada dos o tres días.

Experimentos de calibración B

Estos tratamientos se identifican como ALG 2011/2012 T1 Y ALG 2012/2013 T1 y formaron parte de un experimento cuyo objetivo fue determinar la respuesta del algodón a condiciones de exceso de agua en el suelo. La unidad experimental fue de 8 surcos de 10 metros de largo, se sembró la variedad *Nu Opal RR* a 0.52 m entre líneas y 15 semillas por metro lineal. Posteriormente se efectuó un raleo manual para tener 10 plantas por metro lineal, correspondiente a una densidad de 190,000 plantas por hectárea. El tratamiento 1 (T1) replicó la práctica habitual de riego en la el Sistema de Riego del Río Dulce (riego de presiembra y en floración) más aplicación extra de agua (cuando fue necesario) para alcanzar el aporte hídrico correspondiente a un año con precipitaciones medias (480 mm en el ciclo, para fechas de siembra de octubre). Se regó por superficie, registrándose fecha y lámina de aplicación. Se aplicó regulador de crecimiento tomando como referencia el largo medio de entrenudo (por medición de la altura de la planta y conteo de número de nudos). Cuando el largo medio de entrenudo superó 4.5 cm, se aplicó regulador en dosis variables según el estado fenológico. Cuando se alcanzó el 30% de cápsulas abiertas, se aplicó defoliante. Se fertilizó con 110 kg.ha⁻¹ de urea a los 45 días desde la siembra. Los registros y determinaciones fueron las siguientes:

En planta:

- observación de los eventos fenológicos más relevantes: aparición de capullos, inicio de floración, plena floración, (flor blanca en arte alta) y cosecha;
- cobertura de la canopia, mediante fotografías cenitales procesadas por software específico. Las fotografías se tomaron con una cámara digital que se mantuvo horizontalmente por encima de la canopia, al mediodía, para minimizar el sombreado. Se tomaron dos fotografías por parcela y se procesaron con el software libre Green Crop Tracker (Liu, J. 2012 y <http://www.flintbox.com/public/project/5470/>, accedido 4/3/2014). El software se fundamenta en un método de umbrales basados en un histograma para diferenciar el suelo de los tejidos vegetales y así derivar el porcentaje de cobertura. El operador debe identificar las malezas para diferenciarlas del cultivo. Las dos fotografías se promediaron para obtener la cubierta vegetal por parcela;
- materia seca total en pimpollado, inicio de floración, plena floración y cosecha. Se cortaron las plantas en 0.5 metro lineal de 2 surcos contiguos (10 plantas en total) por parcela. Las plantas se pusieron a secar en estufa a 60° C hasta peso constante;
- en cosecha: cantidad de plantas, se cosecharon 8 metros de las 2 líneas de cosecha, el porcentaje de desmote se determinó sobre la muestra de 25 cápsulas.

En suelo:

- humedad inicial: contenido de agua del suelo hasta los 2 metros de profundidad una vez emergido el cultivo;

- evolución de la humedad del suelo: seguimiento del contenido de agua de suelo hasta los 2 metros de profundidad mediante gravimetría. Las profundidades de medición fueron: 0-15, 15-45, 45-75, 75-125, 125-200 cm. Una vez por mes se muestreó humedad hasta cuatro metros de profundidad, para conocer el movimiento del agua en profundidad.

La validación de AquaCrop se hizo en dos grupos de experimentos, que se describen por separado a continuación.

Experimentos de validación A

Estos tratamientos se identifican como RD 2010/2011 y RD 2011/2012 y el objetivo fue determinar la respuesta del algodón a tratamientos de riego deficitario. Se regó por goteo y se varió el régimen de riego en cuatro tratamientos: reposición del 75% de la evapotranspiración del cultivo (ETc), reposición del 50% de ETc, reposición del 25% de ETc y sin riego (T1 a T4, respectivamente). La variedad, densidad de siembra, manejo de la fertilización, diseño experimental, dimensión de las parcelas, registros y determinaciones en planta y en suelo fueron iguales a lo detallado para la calibración (RDO 2010/2011 y RDO 2011/2012). Se registró fecha de aplicación y dotación de los riegos.

Experimentos de validación B

Estos tratamientos se identifican como ALG 2011/2012 y ALG 2012/2013 y el objetivo, las características, manejo agronómico y las mediciones de estos experimentos fueron las mismas que las detalladas en la calibración (ALG 2011/2012 T1 y ALG 2012/2013 T1). Aparte del tratamiento 1 (descrito en la calibración) se plantearon: el tratamiento 2 (T2) y tratamiento 3 (T3), para simular condiciones de años húmedos. T2: práctica habitual de riego más aplicación extra de agua (cuando fue necesario) para alcanzar el aporte hídrico correspondiente a un año con precipitaciones del 40% de probabilidad de excedencia respecto del promedio (530 mm en el ciclo, para fechas de siembra de octubre). T3: práctica habitual de riego más aplicación extra de agua (cuando fue necesario) para alcanzar el aporte hídrico correspondiente a un año con precipitaciones del 20% de probabilidad de excedencia respecto del promedio (620 mm en el ciclo, para fechas de siembra de octubre).

3.4 Proceso de calibración

La Tabla 3.2 presenta las fechas de siembra y de cosecha de los experimentos de algodón.

Tabla 3.2. Fecha de siembra y cosecha de los ensayos de calibración del modelo AquaCrop.

Experimentos de calibración	Fecha de Siembra	Fecha de cosecha
RDO 2010/2011	7/12/2010	9/5/2011
RDO 2011/2012	25/10/2011	23/3/2012
ALG 2011/2012 T1	3/11/2011	19/3/2012
ALG 2012/2013 T1	31/10/2012	25/3/2013

Respecto del cultivo, los parámetros conservadores que se mantuvieron sin cambios se detallan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Valores de parámetros conservadores en algodón que se mantuvieron sin cambios.

Parámetro	Valor
Crecimiento y desarrollo del cultivo	
Tiempo a 90% de emergencia (días)	7
Temperatura base y superior (grados día)	12-35
Tamaño de canopia al 90% de emergencia (cm ² .planta ⁻¹)	6
Producción de biomasa y formación de cosecha	
Productividad del agua normalizada por ETo y CO ₂ (WP*, gr.m ⁻² .d ⁻¹)	15.0
Transpiración del cultivo	
Declinación del coeficiente del cultivo como resultado del envejecimiento (%.día ⁻¹)	0.3
Estrés hídrico	
Umbrales superior e inferior de agotamiento de agua en el suelo para expansión de la canopia y forma de la curva de estrés	0.2–0.7
Umbral superior de agotamiento de agua en el suelo para cierre estomático y forma de la curva de estrés	0.65
Umbral superior de agotamiento de agua en el suelo para senescencia temprana y forma de la curva de estrés	0.75
Posible incremento en el IC como resultado de estrés hídrico antes de floración	Small
Coeficiente que describe el impacto positivo del crecimiento vegetativo restringido durante la formación de cosecha en el IC	Moderado
Incremento máximo permisible del IC (%)	30
Estrés térmico	
Temperatura mínima y máxima por debajo de las cuales la polinización falla (°C)	10-43

Los datos correspondientes al manejo agronómico se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Datos de manejo agronómico utilizados para la calibración.

Parámetro	Valor
Distancia entre líneas (m)	0.52
Distancia entre plantas (m)	0.11
Densidad de plantas (pl.ha ⁻¹)	220,000

En función de las características de los cultivares utilizados, se introdujeron cambios en algunos parámetros considerados conservadores. Se hicieron las primeras simulaciones del modelo y se compararon los resultados simulados con los valores observados, en términos de biomasa (B), cubierta vegetal (CC), evapotranspiración del cultivo (ETc), rendimiento (R) y productividad del agua (WP). Se continuó con este procedimiento repetidamente, realizando

ajustes, hasta que los resultados simulados ajustaron con los resultados experimentales a niveles aceptables. La tabla 3.5 muestra los parámetros conservadores que se modificaron. En la segunda columna, los valores que finalmente se usaron y en la tercera, los originales del archivo de algodón de AquaCrop (Evet, S. 2012), a los fines de apreciar las diferencias.

Tabla 3.5. Valores de parámetros conservadores que se cambiaron y su comparación con los originales.

Parámetro	Valor utilizado	Valor original
Cultivo		
Coeficiente de crecimiento de canopia (CGC)	11.0-11.4	8.7
Coeficiente de declinación de canopia (CDC)	9.5-10.1	3.0
Tiempo a máxima canopia (días)	65	85
Tiempo a floración (días)	56	64
Duración de la floración (días)	50	50
Longitud de período de formación del HI (días)	75-80	106
Tiempo a inicio de senescencia de canopia (días)	95-100	117
Tiempo a maduración (días)	140	150
Índice de cosecha	41	35
Máxima cubierta vegetal (%)	94	98

Las diferencias entre las variedades simuladas en este artículo y la utilizada para conformar el archivo de algodón en el modelo son importantes, también el manejo agronómico. Sobre este último, actualmente el algodón se siembra en Argentina en “surco estrecho” (52 cm entre líneas) o “surco ultra-estrecho” (38 cm entre líneas), con altas densidades (tabla 3.5), plantas de no más de un metro de altura y poco desarrollo lateral, con crecimiento vegetativo controlado a través de reguladores de crecimiento. Es un paquete tecnológico adaptado a la recolección mecánica, que busca mayor competencia entre plantas, una cobertura del suelo más rápida, un ciclo más corto (desarrollo más rápido) y, en principio, un uso más eficiente del agua, incrementando la transpiración y disminuyendo la evaporación. Una consecuencia de estos cambios y del uso de los reguladores de crecimiento es la modificación del índice de cosecha en relación al que se daba en el sistema de cultivo usado anteriormente.

Los parámetros conservadores detallados en la tabla 3.6 se cambiaron para representar de la forma más fiel posible las características de las variedades *Guazuncho 2000 RR* y *Nu Opal RR*. La longitud del ciclo de crecimiento, la rapidez del crecimiento de la canopia, el tiempo a floración, el inicio de senescencia, el índice de cosecha y otros difieren significativamente de los valores originales.

La concentración de CO₂ se mantuvo sin cambios, tomando como referencia el valor de 369.5 partes por millón (ppm), correspondiente a la concentración media medida en el observatorio de Mauna Loa en el año 2000. Respecto a la fertilidad del suelo, el modelo se usó en la opción fertilidad *Non limiting soil fertility*. El archivo de suelo se elaboró en función de las características del mismo (tabla 3.1). El manejo del riego (método, fechas y lámina de agua

aplicada en cada evento) se reflejó en los correspondientes archivos para cada experimento. En las tablas 3.6a y 3.6b se brinda información básica de los experimentos y la lámina de riego aplicada se muestra en la tabla 3.7.

Tabla 3.6a. Fecha de siembra, principales estados fenológicos e índice de cosecha de los tratamientos RDO 2010/2011 y RDO 2011/2012 utilizados para la calibración del modelo AquaCrop.

Experimentos Calibración	Fecha de siembra	Octava hoja (DDS)	Primer pimpollo (DDS)	Primera Flor (DDS)	Fin de floración efectiva (DDS)	Primer cápsula (DDS)	Madurez (DDS)	IC
RDO 2010/2011	7/12/2010	33	42	58	73	125	153	0.43
RDO 2011/2012	25/10/2011	35	57	65	72	114	150	0.48

DDS: días desde la siembra

IC: índice de cosecha

Tabla 3.6b. Fecha de siembra, principales estados fenológicos e índice de cosecha de los tratamientos ALG 2011/2012 T1 y ALG 2012/2013 T1 utilizados para la calibración del modelo AquaCrop.

Experimentos	Fecha de siembra	Fin Vegetativo (DDS)	Pimpollado (DDS)	Plena Floración (DDS)	Apertura cápsulas (DDS)	Cosecha (DDS)	IC
ALG 2011/2012 T1	3/11/2011	34	49	68	117	138	0.40
ALG 2012/2013 T1	31/10/2012	33	47	63	120	145	0.51

Tabla 3.7. Riego en los experimentos de calibración.

Experimento	Riego (mm)
RDO 2010/2011	170
RDO 2011/2012	320
ALG 2011/2012 T1	260
ALG 2012/2013 T2	245

3.5 Proceso de validación

Experimentos RD 2010/2011, RD 2011/2012, ALG 2011/2012 y ALG 2012/2013.

RD 2010/2011 y RD 2011/2012 se sembraron el 7/12/2010 y 25/10/2011 respectivamente; el ciclo total y la fenología fueron similares a lo detallado en la tabla 3.7a, pero hubo diferencias en los índices de cosecha (tabla 3.8).

Tabla 3.8. Índices de cosecha de los experimentos RD 2010/2011 y RD 2011/2012, utilizados para la validación del modelo AquaCrop.

Campaña	Tratamientos	IC
2010/2011	RD1	0.46
	RD2	0.42
	RD3	0.47
	RD4	0.45
2011/2012	RD1	0.49
	RD2	0.44
	RD3	0.37
	RD4	0.35

Las fechas de siembra y los períodos fenológicos de los experimentos ALG 2011/2012 y ALG 2012/2013 fueron iguales a los presentados en la tabla 3.7b, pero se observaron diferencias en los índices de cosecha de los tratamientos (tabla 3.9).

Tabla 3.9. Índices de cosecha de los experimentos ALG 2011/2012 y ALG 2012/2013 utilizados para la validación del modelo AquaCrop.

	Tratamientos	IC
ALG 2011/2012	T2	0.35
	T3	0.42
ALG 2012/2013	T2	0.50
	T3	0.61

Nota: los IC son significativamente más altos que el utilizado para algodón en AquaCrop. Esto se debe principalmente al manejo agronómico que se comenta en la página 16. El IC de 0.61 de ALG 2012/2013 sí resultó excesivo y se explica por la baja biomasa medida ($10 \text{ tn} \cdot \text{ha}^{-1}$), que pudo resultar de pérdida de material vegetal al momento de cosecha (en otros experimentos la biomasa final varió entre 12 y 13 $\text{tn} \cdot \text{ha}^{-1}$).

El riego total aplicado en los experimentos de validación se presenta en la tabla 3.10.

Tabla 3.10. Riego en los experimentos de validación.

Experimento	Riego (mm)
RD1 2010/2011	130
RD2 2010/2011	80
RD3 2010/2011	45
RD4 2010/2011	0
RD1 2011/2012	255
RD2 2011/2012	175
RD3 2011/2012	95
RD4 2011/2012	0
ALG 2011/2012 T2	300
ALG 2011/2012 T3	380
ALG 2012/2013 T2	275
ALG 2012/2013 T3	355

3.6 Evaluación de la respuesta del modelo

El ajuste y su valoración mediante indicadores estadísticos se hicieron en términos de biomasa (B), cubierta vegetal (CC) y rendimiento (R), evapotranspiración real del cultivo (ETa) y productividad del agua (WP). Cuando en los experimentos no se midió evolución de la cubierta vegetal sino del área foliar, se hizo una conversión según la ecuación 3.5.

$$CC = \frac{(1 - e^{-IAF/1,3})}{(1 + e^{-IAF/1,3})} \quad [3.2]$$

IAF: índice de área foliar

La ecuación [3.5] se tomó de García Vila, M. (2010).

Se usaron los mismos indicadores estadísticos que para la calibración y validación de maíz, detallados en el capítulo 2.

3.7 Resultados de los experimentos

3.7.1 Experimentos usados para la calibración

En esta sección se presentan los datos de los experimentos usados en la calibración de AquaCrop: biomasa (tabla 3.11a y 3.11b), cubierta vegetal (tabla 3.12a, 3.12b, 3.12c), evapotranspiración (tabla 3.13), rendimientos (tabla 3.14) y productividad del agua (tabla 3.15). No se dispuso de información de biomasa y cubierta vegetal para RDO 2011/2012.

Tabla 3.11a. Biomasa observada (t.ha⁻¹) en RDO 2010/2011.

Tratamiento	Vegetativo	1 ^{er} pimpollo	1 ^{era} flor	Fin floración efectiva	1 ^{er} cápsula
RDO 2010/2011	0,936	2,753	4,687	7,737	11,721

tn.ha⁻¹: toneladas por hectárea

Tabla 3.11b. Biomasa observada (t.ha⁻¹) en ALG 2011/2012 T1 y ALG 2012/2013 T1.

Tratamiento	Pimpollado	Inicio floración	Plena floración	Apertura cápsulas	Cosecha
ALG 2011/2012 T1	2,327	5,111	6,870	10,213	13,188
ALG 2012/2013 T1	1,351	3,385	7,433	12,524	n/d

n/d: no disponible

Tabla 3.12a. Cubierta vegetal observada (CC%) en RDO 2010/2011.

	35 DDS	84 DDS	104 DDS
RDO 2010/2011	57	98	95

DDS: días desde la siembra

Tabla 3.12b. Cubierta vegetal observada (CC%) en ALG 2011/2012 T1.

Tratamiento	34 DDS	42 DDS	49 DDS	55 DDS	62 DDS
ALG 2011/2012 T1	39	58	73	88	84

Tabla 3.12c. Cubierta vegetal observada (CC%) en ALG 2012/2013 T1.

Tratamiento	43 DDS	56 DDS	98 DDS
ALG 2012/2013 T1	46	73	89

Tabla 3.13. Evapotranspiración estacional observada (ETa, mm) en los tratamientos usados para la calibración.

	ETa
RDO 2010/2011	630
RDO 2011/2012	620
ALG 2011/2012 T1	627
ALG 2012/2013 T1	600

Tabla 3.14. Rendimientos observados ($t \cdot ha^{-1}$) en los tratamientos usados para la calibración.

	Rendimiento
RDO 2010/2011	4,387
RDO 2011/2012	3,574
ALG 2011/2012 T1	5,235
ALG 2012/2013 T1	6,353

Tabla 3.15. Productividad del agua observada ($WP, kg \cdot ha^{-1} \cdot mm^{-1}$) en los tratamientos usados para la calibración.

	WP
RDO 2010/2011	6.9
RDO 2011/2012	5.8
ALG 2011/2012 T1	8.3
ALG 2012/2013 T1	10.6

3.7.2 Experimentos usados para validación

En esta sección se presentan los datos de los experimentos usados en la validación de AquaCrop: biomasa (tablas 3.16a y 3.16b), cubierta vegetal (tablas 3.17a, 3.17b, 3.17c), evapotranspiración (tabla 3.18), rendimientos (tabla 3.19) y productividad del agua (tabla 3.20). No se dispuso de información de biomasa y cubierta vegetal para RD 2011/2012.

Tabla 3.16a. Biomasa observada (tn.ha⁻¹) en RD 2010/2011.

	Tratamiento	Vegetativo	1 ^{er} cápsula	1 ^{era} flor	Fin floración efectiva	1 ^{er} cápsula
RD 2010/2011	RD1	0,961	2,894	4,251	7,858	11,220
	RD2	0,891	2,632	4,846	7,789	10,306
	RD3	0,958	2,484	4,420	6,358	9,248
	RD4	0,903	2,342	3,601	7,043	7,346

Tabla 3.16b. Biomasa observada (tn.ha⁻¹) en ALG 2011/2012 y ALG 2012/2013.

	Tratamiento	Pimpollado	Inicio floración	Plena floración	Apertura cápsulas	Cosecha
ALG 2011/2012	T2	2,591	4,788	7,731	11,716	13,337
	T3	2,438	5,620	7,154	13,760	12,822
ALG 2012/2013	T2	1,543	4,063	7,226	12,534	n/d
	T3	1,202	3,986	7,966	10,678	n/d

Tabla 3.17a. Cubierta vegetal observada (%) en RD 2010/2011.

Tratamiento	35 DDS	84 DDS	104 DDS
RD1	55	98	90
RD2	53	96	94
RD3	52	96	90
RD4	59	94	89

Tabla 3.17b. Cubierta vegetal observada (%) en ALG 2011/2012.

Tratamiento	34 DDS	42 DDS	49 DDS	55 DDS	62 DDS
T2	39	58	73	88	80
T3	39	58	73	88	83

Tabla 3.17c. Cubierta vegetal observada (%) en ALG 2012/2013.

Tratamiento	43 DDS	56 DDS	98 DDS
T2	58	83	93
T3	45	77	88

Tabla 3.18. Evapotranspiración estacional observada (ETa, mm) en los experimentos usados para la validación.

	Tratamiento	ETa
RD 2010/2011	RD1	620
	RD2	555
	RD3	553
	RD4	527
RD 2011/2012	RD1	656
	RD2	631
	RD3	544
	RD4	533
ALG 2011/2012	T2	690
	T3	724
ALG 2012/2013	T2	600
	T3	707

Tabla 3.19. Rendimientos ($t \cdot ha^{-1}$) de los experimentos usados para la validación.

	Tratamiento	Rendimiento
RD 2010/2011	RD1	4,148
	RD2	4,272
	RD3	4,056
	RD4	3,683
RD 2011/2012	RD1	3,277
	RD2	3,086
	RD3	2,056
	RD4	1,735
ALG 2011/2012	T2	4,615
	T3	5,445
ALG 2012/2013	T2	6,273
	T3	6,517

Tabla 3.20. Productividad del agua observada (WP, $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$) en los experimentos usados para la validación.

	Tratamiento	WP
RD 2010/2011	RD1	6.7
	RD2	7.7
	RD3	7.3
	RD4	7.0
RD 2011/2012	RD1	5.0
	RD2	4.9
	RD3	3.8
	RD4	3.3
ALG 2011/2012	T2	6.7
	T3	7.5
ALG 2012/2013	T2	10.5
	T3	9.2

3.8 Resultados y discusión del comportamiento de AquaCrop

3.8.1 Calibración de AquaCrop

En esta sección se comparan los valores observados y simulados en el proceso de calibración: biomasa (figuras 3.5a y 3.5b), cubierta vegetal (figuras 3.6a y 3.6b), evapotranspiración (tabla 3.21), rendimientos (figura 3.7a y 3.7b) y productividad del agua (tabla 3.22). No se dispuso de información de biomasa y cubierta vegetal para RD0 2011/2012.

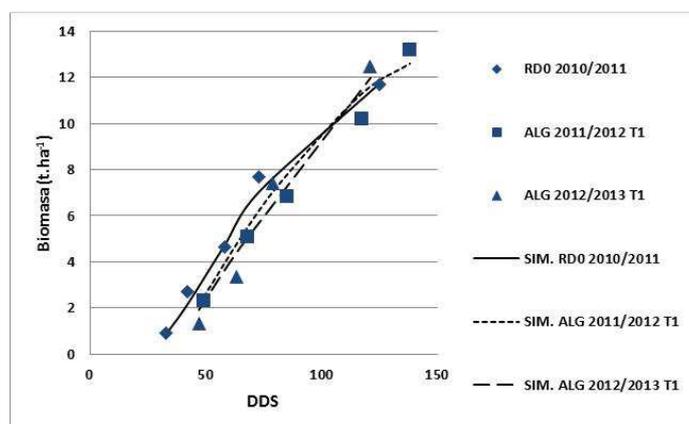


Figura 3.5a. Biomasa observada y simulada en los experimentos de calibración.

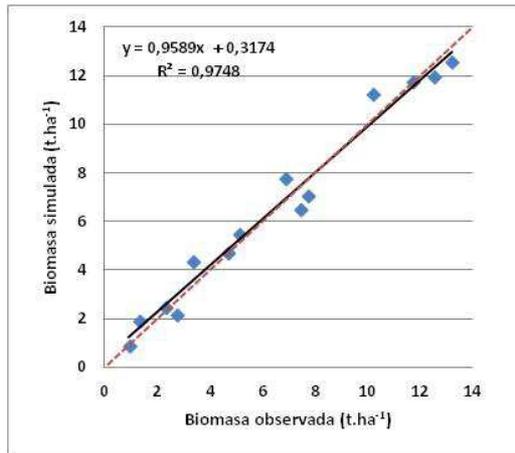


Figura 3.5b. Comparación entre biomasa observada y simulada en los experimentos de calibración. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1.

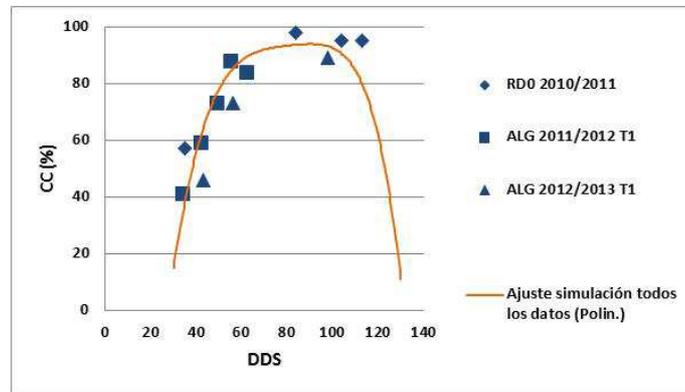


Figura 3.6a. Valores observados y simulados de cubierta vegetal en los experimentos de calibración.

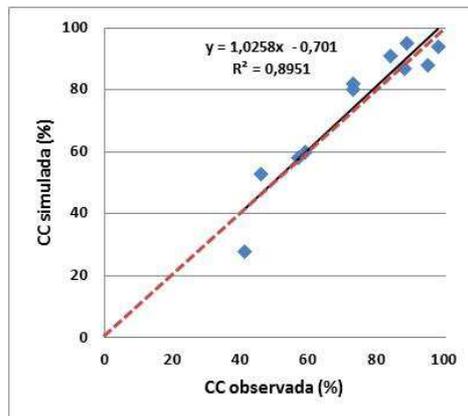


Figura 3.6b. Comparación entre valores observados y simulados de cubierta vegetal en los experimentos de calibración. Línea Llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1.

Tabla 3.21. Evapotranspiración estacional observada y simulada (ETa, mm) en los tratamientos usados para la calibración.

	ETa obs.	ETa sim.
RDO 2010/2011	630	519
RDO 2011/2012	620	581
ALG 2011/2012 T1	627	634
ALG 2012/2013 T1	600	583

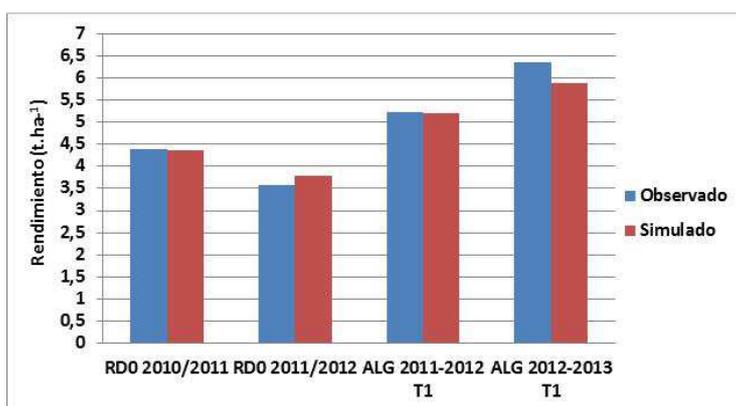


Figura 3.7a. Rendimientos observados y simulados en los experimentos de calibración.

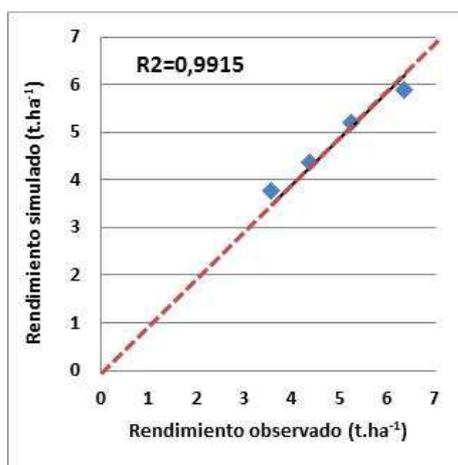


Figura 3.7b. Comparación entre rendimientos observados y simulados en los experimentos de calibración. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1. La recta de ajuste ha sido forzada al punto 0:0.

Tabla 3.22 Productividad del agua observada y simulada (WP, kg.ha⁻¹.mm⁻¹) en los tratamientos usados para la calibración.

	WP obs.	WP sim.
RDO 2010/2011	6.9	8.6
RDO 2011/2012	5.8	6.7
ALG 2011/2012 T1	8.3	8.2
ALG 2012/2013 T1	10.6	10.1

La tabla 3.23 muestra los indicadores estadísticos de ajuste para evolución de biomasa, cubierta vegetal y rendimiento.

Tabla 3.23. Estadísticos para la comparación entre valores observados y simulados de biomasa, cubierta vegetal y rendimientos (experimentos de calibración).

Variable	n	R ²	Índice <i>d</i>	MAE	RMSE	NRMSE
Biomasa	14	0.974	0.993	0,541	0,646	10
Cubierta vegetal	11	0.895	0.970	5.727	6.749	9.2
Rendimiento	4	0.991	0.980	0,186	0,257	5.3

AquaCrop simuló con precisión la evolución de biomasa, según se desprende de la comparación visual (figura 3.7a) y del valor de los estadísticos (figura 3.7b y tabla 3.22): R² e índice *d* muy cercanos a 1 y MAE, RMSE y NRMSE bajos a muy bajos. Para la biomasa final la desviación promedio fue del -2.9%, siendo la menor diferencia para RD0 2010/2011 (0.2%) y las mayores para ALG 2011/2012 T1 y ALG 2012/2013 T1 (-4.4%).

También puede calificarse como bueno el ajuste de la cubierta vegetal. Si bien el ajuste fue aceptable (figuras 3.11a, 3.11b y tabla 3.22). Las discrepancias pueden explicarse en parte debido a que, como se indicó, la CC se calculó a partir de datos de AF, lo cual pudo generar algún grado de error. Lamentablemente en no todos los experimentos se midió CC en las etapas inicial y final del ciclo del cultivo, información que pudo haber ayudado para lograr un mejor ajuste general del modelo.

La desviación de la ETa entre valores observados y simulados fue del -6.4% en promedio. Si bien se estima que pudo haber errores en el cálculo de la ET observada (especialmente debido a imprecisiones en el cálculo del balance de agua, en el que la percolación profunda fue computada como parte de la ET), en RD0 2010/2011 la ET simulada parece ser algo baja. Las mayores discrepancias se dieron en los experimentos de riego deficitario.

Para los rendimientos, el comportamiento del modelo resultó muy bueno. La desviación promedio fue de -0.7% y los extremos variaron entre -0.7% y -7.3% (figuras 3.10a, 3.10b y tabla 3.22). Los valores de R² e índice *d* fueron muy cercanos a 1 y MAE, RMSE y NRMSE bajos. AquaCrop fue capaz de simular con precisión un amplio rango de rendimientos, destacándose aquellos de más de 5 t.ha⁻¹.

La productividad del agua fue sobreestimada por AquaCrop (8.6% en promedio), lo cual es concomitante a la correspondiente subestimación de ETa. Se observa una variación importante de la WP entre experimentos, aunque similar comportamiento fue observado en algodón por Prieto, D. y C. Angueira (1999) en experimentos realizados en Santiago del Estero.

3.8.2 Validación de AquaCrop

En esta sección se comparan los valores observados y simulados en el proceso de validación: biomasa (figuras 3.8a y 3.8b), cubierta vegetal (figuras 3.9a y 3.9b), evapotranspiración (figuras 3.10a y 3.10b), rendimientos (figura 3.11a y 3.11b) y productividad del agua (figuras 3.12a y 3.12b). No se dispuso de información de biomasa y cubierta vegetal para RD 2011/2012.

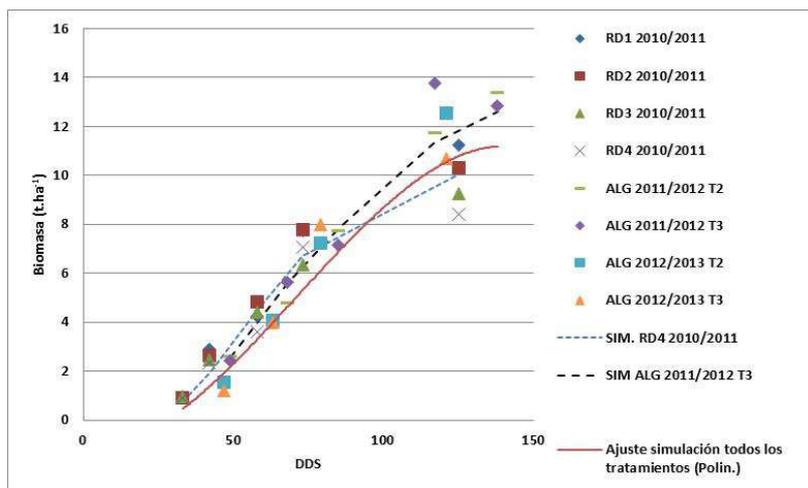


Figura 3.8a. Biomasa observada en los experimentos de validación. Se indican valores simulados para los tratamientos RD4 2010/2011 y ALG 2011/2012 T3 y el ajuste de la simulación incluyendo todos los datos.

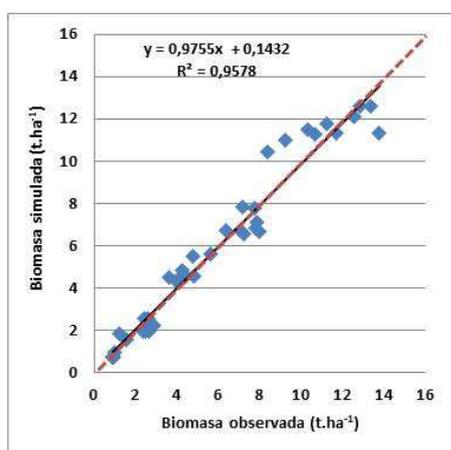


Figura 3.8b. Comparación entre biomasa observada y simulada en los experimentos de validación. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1.

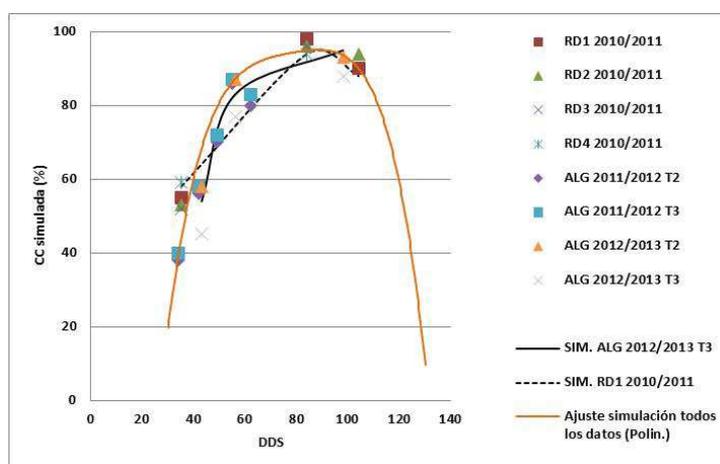


Figura 3.9a. Valores observados de cubierta vegetal en los experimentos de validación. Se indican valores simulados para los tratamientos RD1 2010/2011 y ALG 2012/2013 T3 y el ajuste de la simulación incluyendo todos los datos.

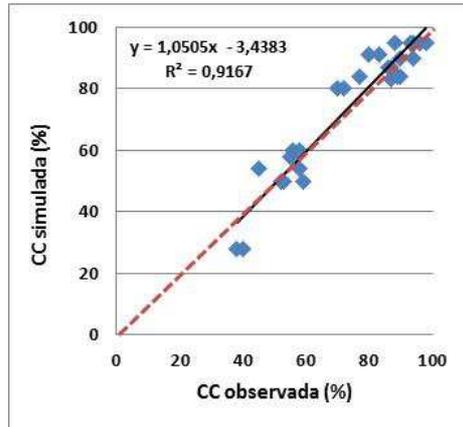


Figura 3.9b. Comparación entre valores observados y simulados de cubierta vegetal en los experimentos de validación. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1.

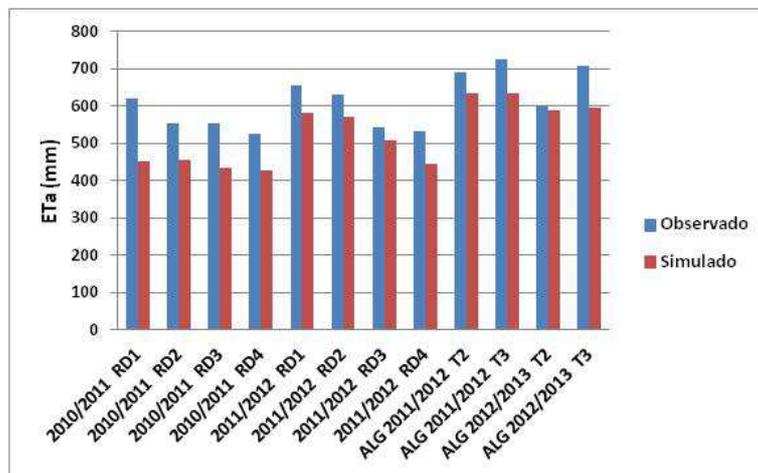


Figura 3.10a. ETa estacional observada y simulada en los experimentos de validación.

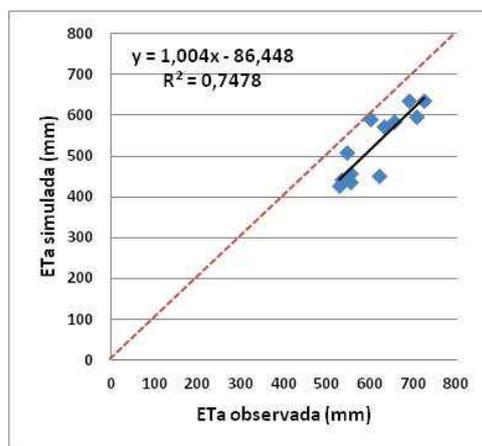


Figura 3.10b. Comparación entre valores observados y simulados de ETa en los experimentos de validación. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1.

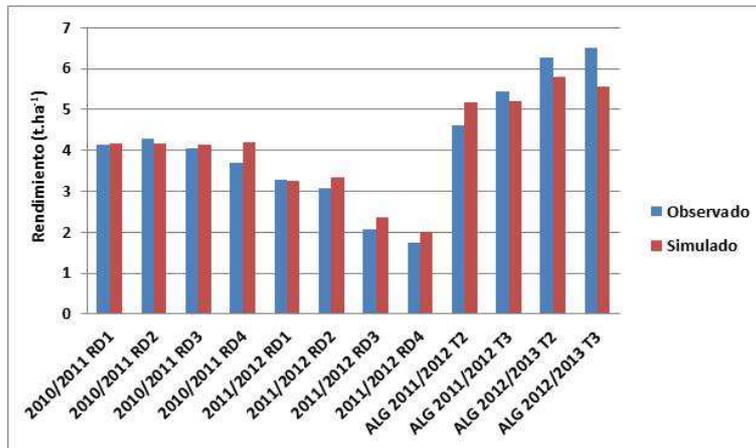


Figura 3.11a. Rendimientos observados y simulados en los experimentos de validación.

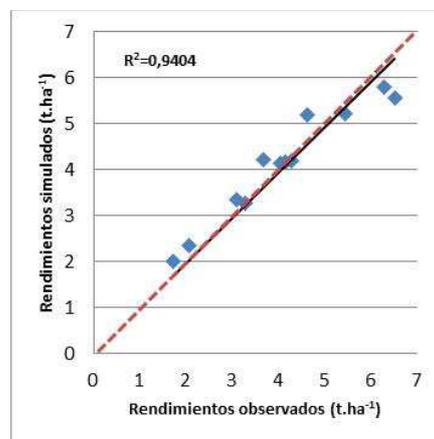


Figura 3.11b. Comparación entre rendimientos observados y simulados en los experimentos de validación. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1. La recta de ajuste ha sido forzada a punto 0:0.

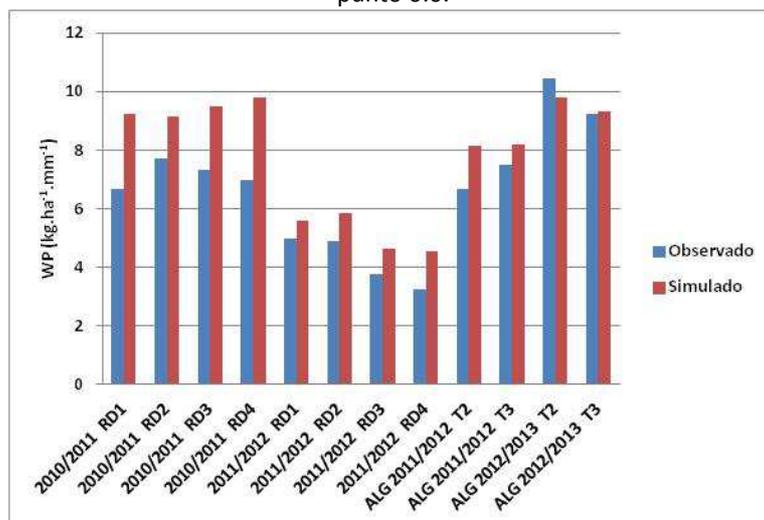


Figura 3.12a. Productividad del agua observada y simulada en los experimentos de validación.

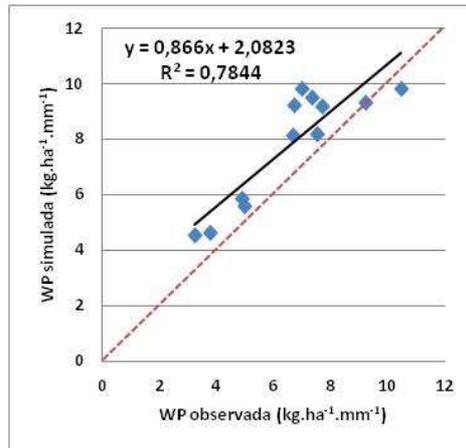


Figura 3.12b. Comparación entre productividad del agua observada y simulada en los experimentos de validación. Línea llena: recta de ajuste; línea punteada: relación 1:1.

La tabla 3.24 muestra los indicadores estadísticos de ajuste para biomasa, cubierta vegetal, ETa, rendimiento y WP.

Tabla 3.24. Estadísticos para la comparación entre valores observados y simulados de: biomasa, cubierta vegetal, evapotranspiración, rendimientos y productividad del agua (experimentos de validación).

Variable	n	R ²	Índice <i>d</i>	MAE	RMSE	NRMSE
Biomasa	38	0.957	0.989	0,590	0,801	13.2
Cubierta vegetal	28	0.916	0.976	4.893	6.039	8.1
ETa	12	0.747	0.700	84	93	15.2
Rendimiento	12	0.940	0.974	0,317	0,413	10.1
WP	12	0.784	0.858	1.300	1.531	23.1

AquaCrop simuló muy bien la evolución de biomasa, según se desprende de la comparación visual (figura 3.12a) y del valor de los estadísticos (figura 3.12b y tabla 3.23): R² e índice *d* muy cercanos a 1 y MAE, RMSE y NRMSE bajos. Para la biomasa final la desviación promedio fue del 6.9%, siendo la menor diferencia para ALG 2011/2012 T3 (-1.7%) y la mayor para RD4 2010/2011 (24.7%).

Similar comportamiento tuvo el ajuste de la CC (figuras 3.13a, 3.13b y tabla 3.23); al igual que para la calibración, en no todos los experimentos se midió CC en las etapas inicial y final del ciclo del cultivo, información que pudo haber ayudado para lograr un mejor ajuste general del modelo.

Los ajustes de la ET y la WP, si bien resultaron aceptables, fueron los de menor calidad. La desviación promedio entre la ET simulada y la observada fue de -13.9%, con la menor diferencia para ALG 2012/2013 T2 (-1.8%) y la mayor para 2010/2011 RD1 (-27.3%). En todos los casos AquaCrop simuló una ET menor a la observada, lo cual podría atribuirse a algún grado de imprecisión en el cálculo de la ET observada, principalmente debido a errores en el cálculo del balance de agua, en el que la percolación profunda fue computada como parte de la ET. En tratamientos de consumos extremos (más bajos, 2010/2011 RD4 y 2011/2012 RD4 o más altos, ALG 2011/2012 T3 y ALG 2012/2013 T3) las diferencias porcentuales se ubicaron entre las mayores.

Respecto de la WP, la desviación promedio fue del 20.6%, con la menor discrepancia para ALG 2012/2013T3 (1.1%) y la mayor para 2010/2011 RD4 (40.5%). En casi todos los casos, la WP simulada fue mayor que la observada, lo cual es concordante con la menor ET simulada, considerando el preciso ajuste de rendimientos. El rango de valores observados de WP es amplio, mayor al dado por Doorenbos y Kassam (1979), de 4 a 6 kg.ha⁻¹.mm⁻¹, aunque Zwart y Bastiaanssen (2004), en una revisión de productividad del agua en varios cultivos, citan para algodón un rango de 4.1 a 9.5 kg.ha⁻¹.mm⁻¹. Prieto y Angueira (1999), en Santiago del Estero, informan también importantes variaciones: 5.0 y 12.7 kg.ha⁻¹.mm⁻¹.

Para los rendimientos el ajuste fue muy bueno (figuras 3.15a, 3.15b y tabla 3.23). La desviación promedio entre valores observados y simulados fue de 2.9% y los extremos variaron entre 0.5% (2010/2011 RD1) y 15.7% (2011/2012 RD4). Los indicadores estadísticos R² e índice *d* fueron muy cercanos a 1 y MAE, RMSE y NRMSE bajos. Los rendimientos más altos que se observaron indican que no hubo limitaciones por fertilidad, por lo cual resultó acertada la elección de la opción *Non limiting soil fertility* en las simulaciones. Debe mencionarse además que el cultivo antecesor (en los experimentos en que se dieron esos rendimientos) fue alfalfa, lo cual supuso un aporte extra de nitrógeno. En general, AquaCrop sobrestimó los rendimientos de tratamientos con mayor estrés hídrico (2010/2011 RD4; 2011/2012 RD3 y RD4) y los subestimó en tratamientos con mayores aportes de agua (ALG 2011/2012 T3 y ALG 2012/2012 T2 y T3). Debe destacarse que las máximas producciones observadas exceden bastante el rango de rendimientos en los que se basó la calibración original de AquaCrop en algodón (García-Vila *et al* 2010).

3.9 Conclusiones

La habilidad de AquaCrop para simular el comportamiento del cultivo de algodón en las condiciones del Área de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero, República Argentina, se considera muy buena. El modelo simuló adecuadamente el comportamiento de dos cultivares y diversas condiciones de humedad del suelo en experimentos realizados durante tres campañas agrícolas (2010 a 2012). Los experimentos usados para la calibración fueron sin estrés hídrico y los de validación, con y sin estrés. Estos cultivares son de características muy diferentes respecto de los que se usaron para la parametrización del modelo. Se mantuvieron sin cambios algunos parámetros conservadores y se cambiaron otros (coeficiente de crecimiento de la cubierta vegetal, coeficiente de declinación de la cubierta vegetal, tiempo a máxima la cubierta vegetal, tiempo a floración, duración de la floración, longitud de período de formación del índice de cosecha, tiempo a inicio de senescencia de cubierta vegetal, tiempo a maduración, índice de cosecha y máxima cubierta vegetal), para representar de la forma más fiel posible las características de las variedades *Guazuncho 2000 RR* y *Nu Opal*, cultivadas a alta densidad, utilizadas en los experimentos. La longitud del ciclo de crecimiento, la rapidez del crecimiento de la cubierta vegetal, el tiempo a floración, el inicio de senescencia, el índice de cosecha y otros difirieron significativamente de los valores originales del archivo de algodón del modelo. También se incorporaron cambios en el manejo agronómico, para adaptarlo a las características del sistema productivo actual del algodón en Argentina. Los indicadores estadísticos confirmaron un grado de ajuste que puede calificarse de muy bueno. Los valores para la validación fueron: biomasa (tn.ha⁻¹): R²=0.957, índice de Willmott (*d*)=0.989, MAE=0,590, RMSE=0,801 y NRMSE 13.2. Para CC: R²=0.916, *d*=0.976, MAE=4.893, RMSE=6.039 y NRMSE 8.1. Para ET: R²=0.747, *d*=0.699, MAE=84, RMSE=93 y NRMSE 15.2. Para rendimiento (tn.ha⁻¹): R²=0.940, *d*=0.974, MAE=0,317, RMSE=0,413 y NRMSE=10.1. Para WP (kg.ha⁻¹.mm⁻¹): R²=0.784, *d*=0.858, MAE=1.30, RMSE= 1.531 y NRMSE=23.1. La desviación entre valores observados y simulados fueron, en promedio: biomasa final 6.9%, ET 13.9%, rendimientos 2.9% y WP 20.6%. Para la ET, en tratamientos de consumos extremos (los más bajos o los más altos) la calidad del ajuste fue menor. Fue muy buena respuesta del modelo para simular un

amplio rango de rendimientos; en general, sobrestimó los rendimientos de tratamientos con mayor estrés hídrico y los subestimó en tratamientos con mayores aportes de agua. Debe destacarse que las máximas producciones observadas en los experimentos, y apropiadamente simuladas por AquaCrop exceden bastante los rendimientos más altos en los que se basó su calibración original (García-Vila *et al* 2010). Finalmente, es necesario resaltar la gran adaptación del modelo a condiciones agronómicas muy diferentes (distancia entre líneas, densidad de plantas, uso de reguladores de crecimiento) respecto de las que se usaron para su parametrización original.

Bibliografía

- Allen, R.G.; L. S. Pereira; D. Raes and M. Smith. 2006. *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy, 300 pp.
- Angueira C.; D. Prieto; J. López; G. Barraza. 2007. *Sistema de Información Geográfica de Santiago del Estero*. SigSE V. 2.0. CD. ISBN 987-521-170-2.
- Doorenbos, J. y Kassam, A.H. 1979. Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Evelt, S. 2012. *Respuesta del rendimiento de los cultivos herbáceos al agua: el modelo de simulación AquaCrop. Algodón*. En: Pasquale Steduto, Theodore C. Hsiao, Elías Fereres y Dirk Raes. *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*. Estudio FAO Riego y Drenaje 66. Pp. 161-170. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma.
- Farahani, H. J.; Izzi, G. and Oweis, T. 2009. Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. *Agronomy Journal* Volume 101, Issue 3.
- García-Vila, M.; E. Fereres, L. Mateos, F. Orgaz and P. Steduto. 2009. Deficit Irrigation Optimization of Cotton with AquaCrop. *Agron. J.* 2009 101: 477-487.
- García-Vila, M. 2010. Avances en la utilización del agua de riego: desde el cultivo hasta la parcela. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba, Departamento de Agronomía. Programa de Producción y Protección Vegetal.
- Hsiao, T. C.; L. Heng; P. Steduto; B. Rojas Lara; D. Raes; E. Fereres. 2009. AquaCrop. The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. *Agronomy Journal*, Volume 101, Issue 3, 448-459.
- Liu, J.; E. Pattey.; S. Admiral. 2012. Assessment of in situ crop LAI measurement using unidirectional view digital photography. *Agric. Forest Meteorol.* 169:25-34.
- Moloud Heidariniya; A. Naseri; S. Boroumandnasab; B. Sohrabi Moshkabadi; A. H. Nasrolahi. 2012. Evaluation of AquaCrop model application in irrigation management of Cotton. *World Rural Observ.* 2012; 4 (2):55-59. ISSN: 1944-6543 (Print); ISSN: 1944-6551 (Online).
- Pereira, A. and L. Pires 2011. *Evapotranspiration and Water Management for Crop Production, Evapotranspiration-From Measurements to Agricultural and Environmental Applications*, Dr. Giacomo Gerosa (Ed.), ISBN: 978-953-307-512-9, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/evapotranspiration-from-measurements-to-agricultural-and-environmentalapplications/evapotranspiration-and-water-management-for-crop-production>.
- Prieto, D., y C. Angueira. 1999. *Water stress effect on different growing stages for cotton and its influence on yield reduction*. In: Kirda, C.; Moutonnet, P.; Hera, C.; Nielsen, D.R. (Eds) *Crop Yield Response to Deficit Irrigation*. Developments in Plant and Soil Sciences, vol. 84. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 161–179.
- Qiao, X. 2012. Parameterization of FAO AquaCrop Model for Irrigated Cotton in the Humid Southeast USA. Thesis Presented to the Graduate School of Clemson University. MSc Thesis Biosystems Engineering. Clemson University.
- Raes, D.; P. Steduto; T. C. Hsiao y E. Fereres. 2009. *AQUACROP Reference Manual*. AquaCrop Version 3.0. FAO, Land and Water Division. Rome, Italy. 153 pp.
- Smith, M.; D. Clarke; K. El-Askari. 1998. CROPWAT. Cropwat for Windows. User guide. FAO, Rome, Italy, 43 pg.
- Steduto, P, D. Raes, T. C. Hsiao, E. Fereres, L. Heng, G. Izzi y J. Hoogeveen. 2009. "AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions". *Options Méditerranées, Series A, No. 80.* 285-292.

- Steduto, P.; Hsiao, T. C.; Fereres, E. 2007. On the conservative behaviour of biomass water productivity. *Irrig. Sci.*, 25: 189-207.
- Tsuji, G.Y.; G. Hoogenboom; P. K. Thornton (Eds). 1998. *Understanding Options for Agricultural Production*. Series System Approaches for Sustainable Agricultural Development Vol. 7. XIII, 400 p.

CAPÍTULO 4
CUANTIFICACIÓN DE LA BRECHA DE
RENDIMIENTOS Y DE LA
PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN EL
DISTRITO DE RIEGO SAN MARTÍN

Capítulo 4

Cuantificación de la brecha de rendimientos y de la productividad del agua en el distrito de riego San Martín

Resumen

4.1 Introducción

En un panorama mundial en el que la competencia por el agua es creciente, su uso eficiente y productivo en la agricultura es de importancia capital, al ser el sector agrícola el principal consumidor: el 70% del agua derivada de ríos, acuíferos y lagos se usa para regar cultivos (Kassam *et al* 2007; Bos *et al* 1994).

La evaluación del desempeño de sistemas de riego ha sido abordada por gran cantidad de trabajos, desde hace varias décadas. Probablemente, los primeros conceptos y trabajos sistemáticos, bajo la idea de “eficiencia de riego”, fueron desarrollados por Israelsen. Varias de sus publicaciones (Israelsen *et al* 1944; Israelsen 1950; Israelsen y Hansen 1962) son citadas y comentadas por Jensen (2007). A partir de estos trabajos pioneros, el enfoque ha ido evolucionando desde una base casi estrictamente “ingenieril” (estudiando el uso del agua desde el punto de vista “físico” y su relación con la producción agrícola), a enfoques más amplios, incluyendo aspectos económicos, sociales y las interrelaciones de las áreas de riego con las cuencas en la que están insertas, con una mirada hidrológica más amplia.

La evaluación del desempeño es fundamental para conocer, entre otras cosas, la relación entre cantidad de agua derivada y la requerida por los cultivos (que caracteriza la adecuación a la demanda y la eficiencia de uso) y la relación entre producción y cantidad de agua consumida para lograr esa producción (el concepto de productividad del agua). La evaluación permite conocer mejor el funcionamiento de los sistemas y los hábitos de riego de los agricultores y debería servir de insumo para la toma de decisiones. La información generada brinda herramientas para establecer estrategias de manejo a distintos niveles del sistema, que permitan, entre otros objetivos: incrementar el rendimiento de los cultivos, reducir o manejar mejor el volumen de agua derivada, incrementar la productividad del agua y disminuir los riesgos de salinización.

Para hacer evaluaciones se usan indicadores, cuya selección varía en función de los objetivos, actores involucrados, escala y marco de tiempo en que se realizará el estudio, entre otros factores. Su funcionamiento puede analizarse desde diferentes puntos de vista (Hoeberichts 1996), por lo que establecer un marco de estudio es una cuestión central. Numerosos autores han propuesto indicadores, que fueron compendiados por (entre otros) Rao (1993), quien sostiene que cualquier marco de estudio y conjunto de indicadores sólo capturarán parte de la compleja realidad de un sistema de riego. Es deseable que la evaluación se realice teniendo en cuenta un valor objetivo o “target” y una serie de valores “estándar”, que describan un rango aceptable alrededor del valor objetivo. De acuerdo a Bos *et al* (1994), tanto los valores objetivos como los valores estándar son específicos y dependientes de las características del sistema.

Los indicadores de adecuación a la demanda evalúan la calidad del manejo del riego a diferentes escalas del sistema y su formulación, en general, relaciona el agua necesaria para un determinado fin, con el agua derivada. Dentro de la gran cantidad de trabajos que han

analizado el uso del agua de riego con este enfoque, es bueno mencionar aquellos que han propuesto marcos de intervención para su abordaje.

Bos *et al* (1994) presentan directrices dirigidas a brindar apoyo a la toma de decisión por parte los responsables de la administración del riego. Sostienen que, para un marco de intervención sea aplicable, los indicadores deben ser prácticos y, además, es necesario crear condiciones para que los responsables del manejo del riego tengan incentivos para establecer mejoras. Presentan dos aproximaciones: el sistema “anidado” en el que el sistema de riego es el primer nivel de un esquema que alcanza el sistema político y económico. Acciones realizadas en un determinado nivel impacta en los otros y definir con claridad cada uno de los niveles facilita la selección de indicadores específicos para cada situación. La otra aproximación es el “diagnóstico de desempeño”, tiene un enfoque más asociado al estudio “tradicional” de la *performance* de riego y con el que evalúa el cumplimiento de tareas y metas en forma cíclica (por ejemplo en términos anuales). Los autores consideran a estas aproximaciones como complementarias. Burt *et al* (1997) analizan distintos conceptos sobre eficiencias de riego con el objetivo de estandarizar indicadores y evitar confusiones de terminología. El artículo se enfoca sobre todo en la eficiencia “física” del agua de riego a distintos niveles del sistema de riego, y presenta los conceptos de porción de agua reutilizable y no reutilizable, usos beneficiosos y no beneficiosos. Malano y Burton (2001) resaltan la necesidad de disponer de indicadores de sencilla formulación y que requieran datos que rutinariamente recolecten las administraciones de riego. Asimismo, presentan al proceso de *benchmarking* como una estrategia para ayudar mejorar las prestaciones de los organismos responsables de administrar servicios de riego. Los autores definen al *benchmarking* como “un proceso sistemático para asegurar mejoras continuas mediante la comparación con objetivos, normas o estándares internos o externos” y su objetivo es mejorar el funcionamiento de una institución. Molden *et al* (1998) proponen el uso de nueve indicadores, con los que comparan dieciocho sistemas de riego. De los nueve indicadores, cuatro están relacionados a la producción (expresada en términos monetarios), tres a aspectos más “tradicionales” de la eficiencia de riego y dos a económicos-financieros. Los autores detallan la información de clima, cultivos, del sistema de riego y económico-financiera necesaria para calcular los indicadores. Los autores de estos trabajos tienen coincidencias conceptuales importantes, entre las que se puede mencionar: los objetivos de la evaluación de desempeño deben ser claros, para definir la escala y el tipo de indicadores apropiados; el número de indicadores debe ser el mínimo indispensable; deben ser de sencilla interpretación y emplear datos que habitualmente se registren en la operación de los sistemas y, asimismo, permitir la comparación entre sistemas y entre años. Además, entienden a la evaluación de desempeño como un proceso continuo, cuyos resultados deben ser insumo para la aplicación de medidas correctivas para mejorar el funcionamiento de un sistema, cuando sea necesario. Otros antecedentes sobre el desempeño de sistemas de riego con aproximaciones similares a las de los trabajos comentados anteriormente son, entre otros: Bos y Nugteren (1990); Clemmens y Molden (2007); Bird y Gillot (1992); Small y Svendsen (1992); Clemmens (1991); Jurriens (1996) y Wolters (1992).

La relación entre producción (expresada en términos físicos o monetarios) y cantidad de agua consumida para lograr esa producción se conoce como productividad del agua y su estudio ha sido intenso en los últimos años. Una cuestión central fue la necesidad de aclarar terminología y el significado de ciertas definiciones. Así, por ejemplo, se ha diferenciado el concepto de productividad del agua del de eficiencia de uso de agua, más relacionado a la fisiología de los cultivos: carbono asimilado y producción de los cultivos en relación a la transpiración (Molden *et al* 2010). Molden *et al* (2003) presentan un marco de interpretación del concepto de productividad del agua y sugieren líneas de acción para lograr mejoras. Ante el desafío de hacer frente a una demanda cada vez mayor de alimentos haciendo un manejo sustentable de los recursos, consideran fundamental investigar el uso del

agua en la agricultura más allá de los sistemas de riego y con equipos de trabajo que incluyan el conocimiento de distintas profesiones. Proponen una serie de definiciones de productividad del agua, que están interrelacionadas y cruzan las escalas de intervención. Enfatizan la necesidad de definir con precisión el término “agua” que se usará para definir su productividad. Mateos (2008) propone un nuevo paradigma para afrontar el estudio del desempeño de riego, mediante el uso de siete indicadores. Algunos de ellos calculan la productividad del agua consumida, derivada y beneficiosamente utilizada y tienen en cuenta posibles reúsos de agua, que pueden ocurrir de acuerdo a ciertas características hidráulicas del sistema de riego y de su relación con la cuenca. Asimismo, Pereira *et al* (2012) consideran posibles reúsos de agua, diferencian entre agua derivada y agua consumida y entre usos beneficiosos y no beneficiosos, siguiendo a Jensen (1993, 2007) y Burt *et al* (1997). Vazifedoust *et al* (2008) analizan la productividad del agua en un distrito de riego en Irán. A partir de los resultados obtenidos, para aumentar la productividad del agua proponen medidas tales como el riego deficitario, la disminución de la superficie sembrada, control de la dosis y el momento de riego. Naroua *et al* (2014) informan un estudio en el distrito de riego Río Adaja (Ávila, España), en el que estudiaron la productividad del agua y la productividad del riego. Entre otras conclusiones, determinaron que los agricultores aplicaron riego deficitario y que la productividad del agua de riego tuvo variaciones importantes entre cultivos y dentro del mismo cultivo. Lorite *et al* (2004) realizaron una evaluación de desempeño de un sistema de riego en Andalucía, España, usando seis indicadores (físicos y económicos). Demostraron que se utilizaron estrategias de riego deficitario, reflejadas en el valor del suministro relativo de riego (SRR, definido como el cociente entre el volumen de agua derivado para riego y las necesidades de riego de los cultivos) inferior a 1. Moden *et al* (2010) plantean la necesidad de evaluar juiciosamente las posibilidades de lograr mejoras “reales” en el uso eficiente del agua y en su productividad. Sostienen que hay espacio para reducir el volumen derivado de agua para la agricultura, incrementar la productividad y mantener su calidad a través de distintas acciones. Pero para alcanzar resultados concretos, es preciso entender los factores biofísicos y socio-económicos que interactúan desde el cultivo a la cuenca, para luego emplear las medidas adecuadas.

AquaCrop y otros modelos de simulación son apropiados para estudiar la respuesta de los cultivos al agua y para integrar los procesos relacionados con el crecimiento, el desarrollo y la producción, pero, al dar una salida ideal y puntual, tienen limitaciones para hacer análisis a escalas regionales y, en algunos casos (como AquaCrop), cuando es necesario realizar muchas simulaciones. En este capítulo se describe una metodología para “escalar” el uso del modelo desde el cultivo puntual a la finca y finalmente hasta distrito de riego y para una serie de años, mediante el uso de la herramienta AquaGIS (Lorite *et al* 2013). La metodología se aplicó para caracterizar el uso del agua de riego, cuantificar la brecha de rendimiento y de la productividad del agua en los cultivos de maíz y algodón en el distrito San Martín, del Sistema de Riego del Río Dulce-Los Quiroga (SRRD), cuyas principales características se presentaron en los capítulos precedentes.

En el Sistema de Riego del Río Dulce-Los Quiroga (SRRD), las evaluaciones de desempeño han sido realizadas casi exclusivamente por la EEA Santiago del Estero del INTA y apuntaron mayormente a la determinación de las eficiencias “físicas” a varios niveles del sistema. Entre los antecedentes pueden citarse a: Prieto *et al* (1994a, b, c, d); Angella (1999); Angella y Prieto (2000a, b); Prieto y Angella (2007); Prieto y Angella (2008); Prieto y Angella (2010); Angella y Salgado (2011) y Angella *et al* (2013). Las eficiencias medidas han sido variables, dependiendo sobre todo del distrito y de los cultivos donde se hicieron las evaluaciones. En el distrito San Martín, la situación predominante fue de sobre-riego (Angella *et al* 2011), reflejada por indicadores como la eficiencia de aplicación (Ea): 59% y la razón de percolación (DPR): 0.39. La Ea se definió como el volumen de agua necesario y disponible para

la evapotranspiración del cultivo en relación con volumen de agua de riego derivada al lote (Till y Bos 1985); el DPR como la relación entre la lámina que percola por debajo de la profundidad radicular considerada en relación a la lámina de riego aplicada (Walker 1989). A nivel de sistema, Prieto (2006) calculó un valor medio de 3.6 para el suministro relativo de riego (SRR), alcanzándose picos de 5 en algunos años. El SRR (Malano y Burton 2001) es un indicador de desempeño que expresa la relación entre el agua que se deriva para riego y los requerimientos de los cultivos; dada tal definición, significa que en el SRRD se deriva tres veces más agua que la necesaria. En el SRRD, se ha puesto menos énfasis a investigaciones sobre la productividad del agua y del agua de riego y la brecha de rendimientos asociada al manejo del agua.

4.1.1 El distrito de riego San Martín

El Canal secundario San Martín, que sirve al Distrito del mismo nombre, tiene una longitud de 64 kilómetros, de los cuales 38 son revestidos en hormigón. Tiene una capacidad máxima de conducción de $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. En el Distrito San Martín aproximadamente 16,000 hectáreas disponen de infraestructura de riego. En la Tabla 1.1 (capítulo 1) se detalla información de la superficie bruta y con derecho de riego en el distrito San Martín. A partir del canal San Martín, se derivan una red de canales terciarios y cuaternarios o “comuneros”. La figura 4.1 muestra la posición relativa del Distrito San Martín en el SRRD, la figura 4.2 la superficie con aptitud agrícola y la figura 4.3, la red de canales.

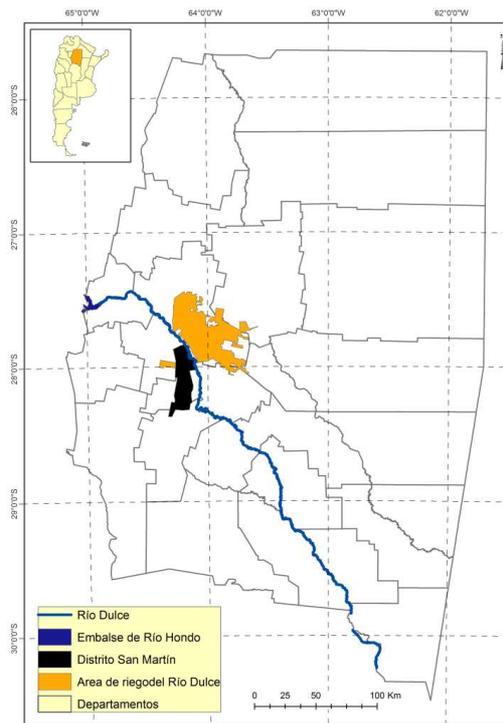


Figura 4.1. Ubicación del Distrito San Martín en el SRRD.

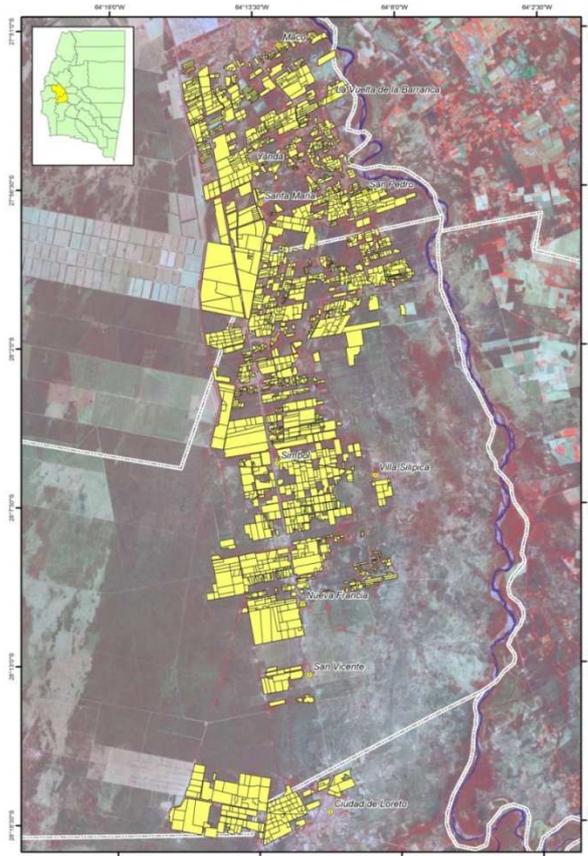


Figura 4.2. Superficie con aptitud agrícola en el Distrito de riego San Martín.

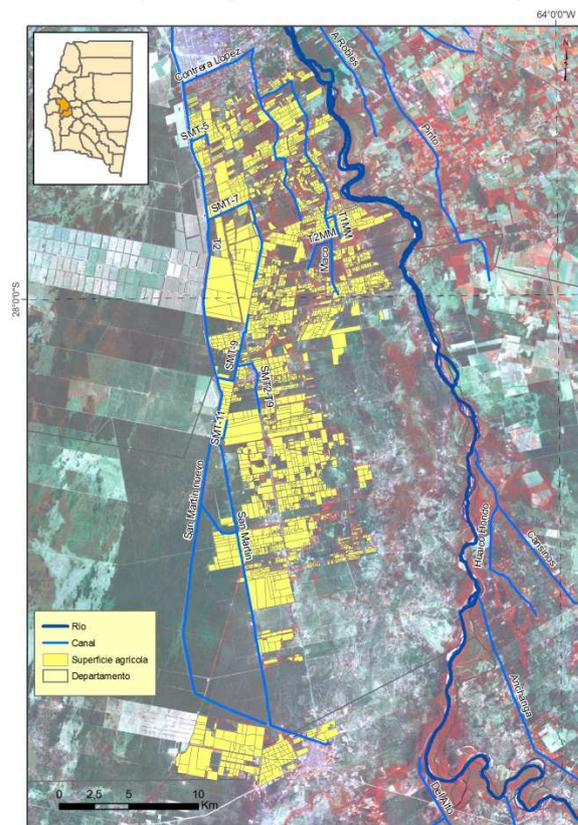


Figura 4.3. Red de canales del distrito San Martín, SRRD.

La tabla 4.1 informa la distribución del tamaño de las parcelas y derechos de riego en el distrito San Martín.

Tabla 4.1. Distribución del tamaño de parcelas y derechos de riego en el distrito San Martín (Prieto D. 2006).

Rango (hectáreas)	Número de parcelas	%	Hectáreas con derecho de riego
0-5	887	58	2215
5-10	307	20	1990
10-25	222	15	3215
25-50	52	3	1724
50-100	31	2	2061
100-500	17	1.5	3285
500-1000	1	0.5	795
Total	1517	100	15285

En la campaña agrícola 2012-2013 se realizó un censo de cultivos, luego de varios años en que no se relevó información (tabla 4.2. Fuente: INTA EEA Santiago del Estero).

Tabla 4.2. Hectáreas cultivadas por cultivo en las campañas 2012-2013 en el Distrito de Riego San Martín.

Cultivo	2012-2013
Alfalfa	5,683
Maíz	736
Algodón	3,178
Soja	180
Sorgo	52
Otros*	11,936

*Incluye principalmente pasturas de secano

4.1.2 Descripción de AquaGIS

AquaGIS (Lorite *et al* 2013) es un programa-interfaz que facilita el análisis temporal y espacial de las salidas del modelo AquaCROP-FAO. AquaGIS fue creado a los fines de salvar las actuales limitaciones de AquaCROP cuando es necesario hacer muchas simulaciones sobre áreas grandes y para una serie larga de años. Requiere la herramienta de programación MapObject, de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Aparte del análisis espacio-temporal, permite la visualización de los resultados sobre un mapa base. Si bien la actual versión de AquaCrop permite realizar múltiples simulaciones, es necesario crear individualmente los archivos de inputs y también los archivos de proyectos, lo cual significa un tiempo considerable de trabajo. Por ello, la creación de una interfaz que genere los archivos de inputs y de proyectos al mismo tiempo y permita la inmediata visualización de los resultados, es una herramienta deseable para numerosas aplicaciones de AquaCrop.

A los fines de una correcta configuración de AquaGIS se debe disponer de una serie de archivos. El mapa en el cual se quieren mostrar los resultados, se denomina *map* y tiene extensión *.shp*. El archivo *map.dbf* permite asociar los polígonos definidos en el mapa con las simulaciones y se identifican mediante un campo. Hay un grupo de archivos con extensión *.xlsx*, que se describen a continuación:

crops.xlsx: define la combinación de cultivos y concentración de CO₂. Los archivos de cultivos son generados en AquaCrop.

initials.xlsx: contiene la información del contenido de agua del suelo al inicio de la simulación.

soils.xlsx: describe los parámetros del tipo de suelo a utilizar, principalmente las características de capacidad de retención de agua.

batch.xlsx: es el principal archivo de configuración, desde el cual AquaGIS leerá las combinaciones posibles de suelos, cultivos, datos climáticos, período de tiempo a simular, humedad inicial del suelo y manejo del riego.

La información climática se almacena en archivos *.xlsx* y se guardan en la carpeta *Weather*. Finalmente, las variantes de riego se configuran en archivos tipo *AquaGISN.irr*.

AquaGIS cuenta con una pantalla principal en la cual se selecciona la serie de años y la combinación de variables que se desea simular y se muestra la cantidad de simulaciones requeridas de acuerdo a las selecciones hechas (Figura 4.4). También se pueden elegir los *outputs* que se quieren generar (Figura 4.5).

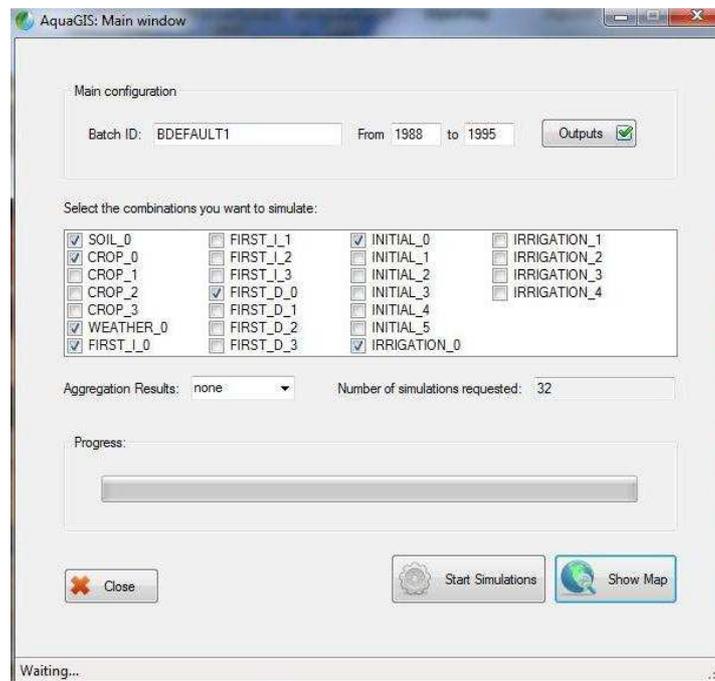


Figura 4.4. Pantalla principal de AquaGIS

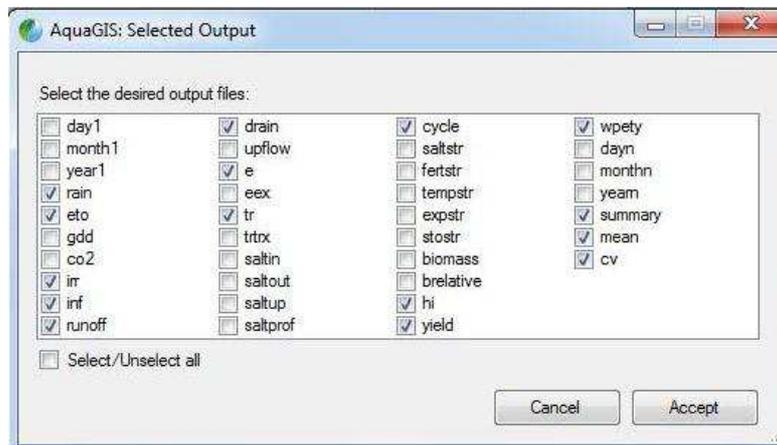


Figura 4.5. Selección de *outputs*.

Una vez realizadas las simulaciones, los resultados se pueden ver sobre el mapa base, al presionar *Show map* en la ventana principal (Figura 4.6). Es posible seleccionar entre las variables de salida (en *Field*) ya sea para un año específico o ver el promedio o el coeficiente de variación de una serie de años (en *Info*). Los resultados también se generan en tres planillas de cálculo. Una descripción más detallada de AquaGIS se encuentra en Lorite *et al* 2013.

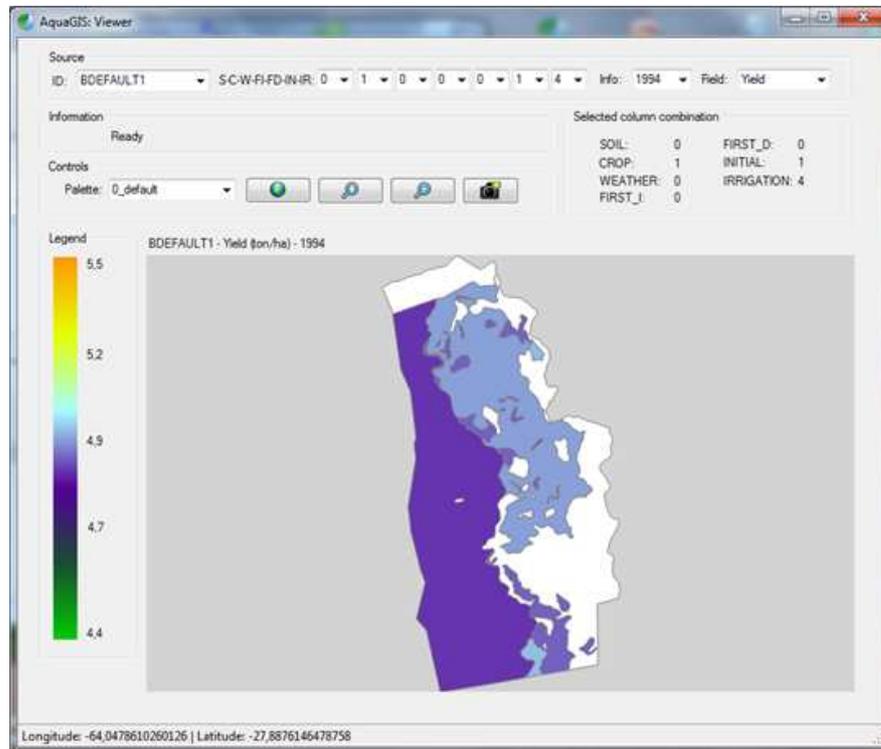


Figura 4.6. Visor de AquaGIS

4.2 Objetivos

Los objetivos de este capítulo son:

- caracterizar las variaciones en el uso del agua en los cultivos del maíz y algodón en el Distrito San Martín del SRRD,
- determinar las brechas de rendimientos y de la productividad del agua de los cultivos de algodón y maíz en el Distrito San Martín del SRRD,
- evaluar los beneficios productivos de cambiar el sistema de turno fijo a uno más flexible, que permita acoplarse mejor a los requerimientos de agua de los cultivos,
- evaluar cómo distintas programaciones de riego impactan sobre el uso del agua a escala de distrito.

4.3 Materiales y métodos

Para caracterizar el uso actual del agua a nivel de distrito y estimar las brechas de rendimiento y de la productividad del agua se utilizó AquaGIS. Mediante la simulación y para de diferentes escenarios se calcularon las siguientes variables: rendimiento (Y), índice de cosecha (IC), relación transpiración real/transpiración máxima (Tra/Trx), riego (Irr), drenaje

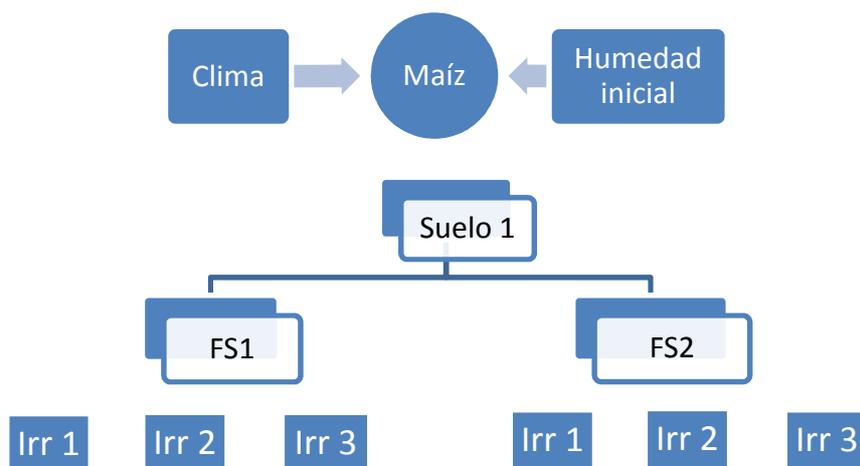
(Dr), índice de drenaje (IDr), productividad del agua (WP) y productividad del agua de riego (IWP). Se establecieron áreas homogéneas, generando módulos de simulación con adecuada representación espacial y relaciones suelo-agua-cultivo específicas. Se siguió esta aproximación para caracterizar situaciones predominantes de prácticas agrícolas y así superar la complejidad que significa el gran predominio de minifundios en el área en estudio, lo cual hace prácticamente imposible realizar el seguimiento de una cantidad suficiente de situaciones individuales que luego puedan “escalarsen” regionalmente mediante su simple agregación.

4.3.1 Información base disponible

En el distrito de riego San Martín se definieron cuatro módulos de simulación en base a propiedades de los suelos, especialmente capacidad de uso y características de retención de agua. Para cada cultivo se utilizaron dos fechas de siembra y tres alternativas de manejo de riego:

- manejo habitual de los productores,
- manejo mejorado, dentro de la forma actual de entrega de agua,
- riego a la demanda.

Se utilizó un archivo de clima (veintiséis años de datos diarios de Tmax, Tmin, ETo y lluvia) y se definió una situación de humedad inicial del perfil del suelo; a modo de ejemplo en la figura 4.7 se presenta esquemáticamente las combinaciones para maíz y para un suelo.



Donde: FS: fecha de siembra
Irr: riego

Figura 4.7. Esquema de simulaciones para maíz en un tipo de suelo.

Se considera que estas opciones de manejo son las más relevantes para analizar la situación actual y explorar variantes superadoras del manejo del agua. De la figura 4.7 y teniendo en cuenta que se seleccionaron cuatro suelos con aptitud productiva, se desprende que para cada cultivo y para cada campaña agrícola se estudiaron veinticuatro combinaciones de factores, lo cual hace un total de seiscientos veinticuatro simulaciones por cultivo para la serie climática 1998-2013.

Tipos de suelo

La elección de los suelos se basó en la publicación Carta de Suelos del Oeste del Área de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina (Angueira, C. y E. Zamora, 2007). Los cuatro suelos seleccionados (La María, Santa Rosa, Maquito y El Simbol) conformaron los polígonos en AquaGIS. En la Tablas 4.3 a 4.5 se presentan las principales características de las series Santa Rosa, Maquito y El Simbol. La serie La María ya fue descrita en el capítulo 2.

Tabla 4.3. Propiedades de la Serie Santa Rosa.

Horizonte	A1	AC	C1ca
Profundidad (cm)	0-34	34-66	66-110
Arena (%)	24	22	18
Limo (%)	54	53	60
Arcilla (%)	22	25	22
Textura	Franco limoso	Franco limoso	Franco limoso
Dens. Ap. (gr.cm ³⁻¹)	1.38	1.37	1.36
pH (pasta)	7.0	7.6	7.9
Materia orgánica (%)	2.16	0.98	1.02
N total (%)	0.16	0.06	0.07
P (ppm)	42	42	8
K (meq.100 gr ⁻¹)	2.14	2.47	2.1
CE (dS.m ⁻¹)	0.98	0.56	0.67
PMP (v/v)	16	16	15
FC (v/v)	34	33	33
ADT (v/v)	18	17	18
Saturación (v/v)	45	46	46

Tabla 4.4. Propiedades de la Serie Maquito.

Horizonte	A1	AC	C1	IIC2
Profundidad (cm)	0-23	23-64	64-130	+130
Arena (%)	59	59	57	44
Limo (%)	14	35	37	51
Arcilla (%)	7	6	6	5
Textura	Franco arenoso	Franco arenoso	Franco arenoso	Franco limoso
Dens. Ap. (gr.cm ³⁻¹)	1.44	1.44	1.43	1.42
pH (pasta)	7.3	8	8.1	8
Materia orgánica (%)	1.14	0.45	0.31	0.21
N total (%)	0.1	0.06	0.03	0.02
P (ppm)	1	2	1	1
K (meq.100 gr ⁻¹)	0.94	0.6	0.55	0.53
CE (dS.m ⁻¹)	0.52	0.38	0.52	1.04
PMP (v/v)	7	6	6	5
FC (v/v)	19	17	17	19
ADT (v/v)	12	11	11	14
Saturación (v/v)	45	45	45	45

Tabla 4.5. Propiedades de la Serie El Simbol.

Horizonte	A1	B2t	B3	C1
Profundidad (cm)	0-22	22-53	53-90	+90
Arena (%)	25	22	19	50
Limo (%)	58	60	64	45
Arcilla (%)	17	18	17	5
Textura	Franco limoso	Franco limoso	Franco limoso	Franco arenoso
Dens. Ap. (gr.cm ³⁻¹)	1.39	1.38	1.38	1.43
pH (pasta)	7	7.2	7.7	7.9
Materia orgánica (%)	3.2	1.55	1	0.21
N total (%)	0.2	0.12	0.11	0.04
P (ppm)	81	31	18	18
K (meq.100 gr ⁻¹)	2.78	2.47	1.65	0.77
CE (dS.m ⁻¹)	0.58	0.46	0.62	0.58
PMP (v/v)	14	13	12	5
FC (v/v)	33	32	31	18
ADT (v/v)	19	19	19	13
Saturación (v/v)	47	47	46	41

En la Tabla 4.6 se presenta la superficie de cada serie en el área evaluada, la capacidad productiva según el Índice de Storie (IS) y la capacidad de uso para riego.

Tabla 4.6. Superficie de cada tipo de suelo, IS y capacidad de riego.

Serie	Superficie (ha)	% sobre total	IS (%)*	Capacidad de riego (clase)*
La María	16,652	54.9	82	1-2
Santa Rosa	10,473	34.5	75	1-2
Maquito	422	1.5	77	2
El Simbol	2,772	9.1	72	1-2
Total	30,318	100	-	-

*Promedio de unidades dentro de la serie.

El Índice de Storie (Storie 1970) es un sistema paramétrico multiplicativo que se usa para clasificar las cualidades de los suelos y es una expresión numérica de las condiciones del suelo para el desarrollo de los cultivos. Las unidades cartográficas clasificadas según el IS son reagrupadas en seis clases de aptitud para riego. El IS varía entre 0 y 100% y cuando su valor es menor al 60%, se recomienda hacer estudios específicos para determinar su aptitud para un determinado cultivo (Angueira y Zamora, 2007). En la figura 4.8 se muestra la distribución espacial de los suelos.

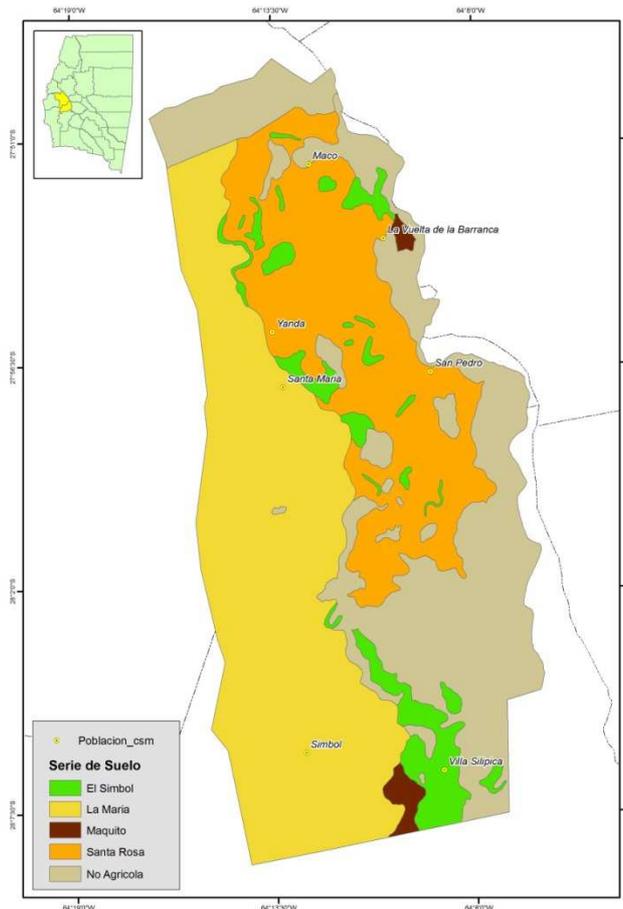


Figura 4.8. Distribución espacial de los suelos seleccionados en el distrito de riego San Martín.

La información que se incluye en los archivos de suelo de AquaGIS, para cada horizonte, es: humedad de saturación, capacidad de campo, punto de marchitamiento permanente, conductividad hidráulica saturada y los parámetros Cra_1 y Crb_1. Cra_1 y Crb_1 son los parámetros de ascenso capilar para el primer horizonte. AquaCrop (Raes, D. *et al* 2009) asigna directamente valores a estos dos parámetros en función de la textura y las características hidráulicas del suelo. Son los parámetros a y b de la ecuación 4.1, que define el ascenso capilar en función de la profundidad de la capa freática (z).

$$CR = \exp(\ln(z)-b/a) \quad [4.1]$$

Fechas de siembra

Para el maíz se plantearon las fechas de siembra de 10 de octubre y 5 de diciembre y para algodón, 15 de octubre y 15 de noviembre, épocas de siembra recomendadas para el área y habitualmente adoptadas por los productores.

Clima y humedad inicial del suelo

La serie climática utilizada para explorar distintos escenarios abarcó los años 1988-2013, con datos diarios de: temperatura máxima y mínima, ETo (calculada por el método de FAO-Penman-Monteith) y lluvia. Los datos corresponden a la Estación Meteorológica “La María”, del INTA Santiago del Estero y en la tabla 4.7 se presentan los promedios de la serie.

Tabla 4.7. Serie climática 1988-2014. Estación Meteorológica La María, INTA Santiago del Estero. Valores medios mensuales.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom./Total
Tmax. °C	33.4	32.0	29.8	25.9	22.8	19.9	20.6	24.0	26.5	29.8	31.6	33.2	27.5
Tmin. °C	19.5	18.9	17.5	13.8	9.3	6.0	3.4	5.5	8.5	14.0	16.6	19.0	12.7
Lluvia mm	118	100	103	39	14	9	3	1	12	43	65	106	613
ETo diaria Mm	5.4	4.9	3.7	2.6	1.8	1.4	1.6	2.5	3.6	4.5	5.2	5.6	3.6

Para los escenarios producción limitada por el agua (Y_{WL}) y producción real (Y_a) se utilizó el contenido inicial de agua en el suelo medido en relevamientos de campo. El contenido de humedad se determinó por el método gravimétrico durante evaluaciones del desempeño de riego (Angella *et al* 2011) y de ajuste de AquaCrop en la campaña agrícola 2012-2013. En 35 casos se muestreó el perfil de humedad al momento de la siembra hasta un metro de profundidad, en intervalos de 20 cm: 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100. El contenido hídrico inicial promedio, para cada intervalo, fue de 18.2, 20.3, 22.2, 22.2 y 21.8 (vol.vol^{-1}), respectivamente. Durante el proceso de simulación con AquaGIS, en algunos casos, estos valores se aumentaron levemente para permitir el establecimiento del cultivo y posterior desarrollo de la cubierta vegetal. Para el escenario producción potencial (Y_p), la humedad inicial fue de capacidad de campo.

4.3.2 Niveles de producción simulados

Se definieron tres niveles productivos o escenarios: producción potencial (Y_p), producción limitada por el agua (Y_{WL}) y producción real (Y_a). Las dos primeras situaciones son habitualmente usadas cuando se exploran opciones de manejo en modelos de simulación. Con AquaCrop es posible simular sin inconvenientes Y_a y Y_{WL} .

- Y_p está definida por los factores concentración de CO_2 , radiación, temperatura y las características del cultivo. Las malezas, plagas, enfermedades, fertilidad del suelo y disponibilidad de agua no son factores limitantes. Para el escenario Y_p , las simulaciones se hicieron con la opción de manejo del riego *Generate Irrigation Requirement* (GIR), de forma de no producir estrés hídrico en ninguna etapa del cultivo
- En el escenario Y_{WL} se considera que no hay factores limitantes tales como malezas, plagas, enfermedades y fertilidad del suelo, manteniéndose el agua como único factor que puede limitar los rendimientos. En este caso, se eligió una estrategia de riego mejorada respecto Y_a , dentro de las restricciones que impone el sistema de entrega de agua por turnos.
- En los campos de productores (Y_a), habitualmente hay reducción de rendimientos respecto de Y_{WL} , por la presencia de malezas, ataque de plagas y enfermedades y la fertilidad del suelo.

En AquaCrop no se simula el efecto en los rendimientos de malezas, plagas y enfermedades. Tampoco simula ciclos ni balances de nutrientes, pero provee categorías de fertilidad que varían de “sin limitación” a “limitación severa”. Incluir un nivel de estrés por fertilidad no óptima permitiría pasar de rendimientos limitados por el agua (Y_{WL}) a rendimientos reales (Y_a) mediante la inclusión de lo que podría llamarse un “componente de

reducción”. Una aproximación similar, esto es, “traducir” la producción limitada por el agua a la producción real o actual mediante la incorporación de un “factor de manejo” fue realizada por Bessembinder *et al* (2003).

Tal “componente de reducción” se definió en función de la información disponible (cartas de suelo, datos de campos de productores, encuestas y experimentos), los objetivos de esta tesis y las características del modelo AquaCrop. Se evaluó cómo el crecimiento y el desarrollo del cultivo, la E+Tr y la producción se afectaron debido a estrés por fertilidad del suelo no óptima, especialmente el bajo contenido de nitrógeno. Dicho estrés impacta en la expansión de la canopia (*Canopy Growth Coeficient, CGC*), su máximo crecimiento (*Maximum Canopy Cover, CCx*), su declinación (*Canopy Decline Coeficient, CDC*) y la productividad del agua (WP).

La fertilización no es práctica habitual en el SRRD y en los campos de productores en los que se hizo seguimiento, no se aplicó fertilizantes. Considerando que el contenido de nitrógeno (Tablas 2.1, 4.3, 4.4 y 4.5) es de medio a bajo, resulta claro que la disponibilidad de este elemento es determinante entre los factores que explican la producción real. Igual razonamiento puede usarse respecto el contenido de materia orgánica. Atento a estas consideraciones, se fue variando en AquaCrop el nivel de fertilidad del suelo, hasta ajustar los rendimientos simulados con los observados (tabla 4.8). Lamentablemente, no existen relevamientos de organismos oficiales que provean información de producción en el área de riego. Los rendimientos reales se obtuvieron a partir de encuestas a productores (mencionadas en el siguiente apartado) y de otros informantes, tales como técnicos asesores e instituciones del medio (cooperativas, asociaciones de productores). Como lo menciona Prieto, D. (2006), debido la diversidad de sistemas productivos y de aplicación de tecnología, no es sencillo estimar rendimientos medios. Para ajustar la información obtenida, en 10 de los establecimientos (que habían sembrado ambos cultivos) mencionados en la tabla 4.10 se hicieron muestreos para estimar rendimientos. En el caso del maíz, se cosecharon tres líneas de diez metros de largo por parcela (20 m²) y en el algodón tres líneas de cinco metros de largo (15 m² por parcela).

Tabla 4.8. Niveles de estrés por fertilidad del suelo para simular *Ya*.

	Nivel de reducción	
	Maíz	Algodón
Producción de biomasa	Moderado (70%)	Moderado (70%)
Reducción de CGC	2%	2%
Máxima cubierta vegetal	Leve (CCx 70%)	Leve (CCx 70%)
Declinación de la cubierta vegetal	Fuerte	Media
Rendimientos medios actuales (T.ha-1)	6,5-7,0	2,5-3,0

Estrategias de riego

En la Tabla 4.9 se detalla el manejo del riego para cada uno de los niveles de producción o escenarios planteados.

Tabla 4.9. Aplicación de riego por escenarios para algodón y maíz.

Escenarios productivos	Riego	Momento de riego	Lámina (mm)
Producción potencial Y _p	Opción GIR de AquaCrop	Agotamiento de 100% del agua fácilmente disponible	Definida por AquaCrop. Variable, de acuerdo al balance de agua
Producción limitada por el agua Y _{wL}	Manejo mejorado respecto de Ya (dentro de la entrega de agua por turnos)	23, 53 y 83 DDS	125 en cada riego
Producción real Ya	Práctica predominante SRRD	53 y 83 DDS	170 en cada riego

Para caracterizar los hábitos predominantes del uso del agua en las fincas, se hizo el seguimiento de treinta y cinco eventos de riego en campos de productores entre los años 2009-2010 (Angella *et al* 2011) y 2012-2013, para la presente tesis (tabla 4.10) y se complementó información de cuarenta y dos encuestas realizadas en 2009 y 2010 (Brim *et al* 2011 y Brim *et al* 2010).

Las encuestas fueron semi-estructuradas y directas al productor, con el objetivo de obtener descripciones, lo más acabadas posibles, de los paquetes tecnológicos utilizados y la gestión integral de la finca. Las encuestas semi-estructuradas se consideran un método cualitativo de recolección de información y permiten el diálogo amplio y distendido, aunque siempre orientado a obtener los datos deseados. A los fines de tener una buena representación, se definieron los sistemas productivos preponderantes y sobre esta base se estableció el número de encuestas para cada tipo. Sobre el manejo del riego, el 75% de los entrevistados dijo aplicar tres riegos en algodón (uno de ellos es de pre-siembra) y entre dos y tres en maíz, uno de los cuales es también de pre-siembra.

En el escenario Ya, la lámina de 170 mm es el promedio de las láminas aplicadas en los eventos de riego estudiados, cuya información principal se presenta en la Tabla 4.10. El caudal se determinó por el método de área-velocidad, midiéndose la velocidad del agua con micro-molinete hidrométrico Global Water® y la sección transversal de la acequia regadora. La lámina bruta aplicada al lote se calculó según la ecuación 4.2:

$$Db \text{ (mm)} = \frac{Qf \times 60 \text{ (seg.min}^{-1}) \times 60 \text{ (min.hr}^{-1}) \times Tap \times 1000 \text{ (mm.m}^{-1})}{\text{Área del lote o unidad de riego (m}^2\text{)}} \quad [4.2]$$

donde:

(Db): lámina bruta aplicada

Qf: agua derivada al lote o unidad de riego (m³.seg⁻¹)

Tap: tiempo de aplicación del riego (hr)

En distintos canales se tomaron muestras de agua para analizar su aptitud para riego, obteniéndose los siguientes valores (dS.m⁻¹): 0.59, 0.56, 0.57, 0.68, 0.59 y 0.56 (Prieto, D. *et al* 2008). En el año 2013, durante la recolección de datos base para esta tesis, en el Canal San Martín se registró un valor de 0.56 dS.m⁻¹. Teniendo en cuenta la clasificación de calidad de agua para riego de la FAO (Ayers y Westcot 1990), que propone los siguientes rangos (valores en dS.m⁻¹): hasta 0.7, sin problemas; 0.7 a 3, problemas crecientes; más de 3, problemas

graves, la calidad del agua en el SRRD se califica como apta para el riego de los cultivos de maíz y algodón.

Tabla 4.10. Principales de datos del riego en predios de productores

Evento de riego	Superficie (ha)	Tiempo de riego (h)	Tiempo de riego por hectárea (h)	Caudal disponible (l.s ⁻¹)	Lámina media aplicada (mm)
1	0.924	2.5	2.7	270	260
2	0.73	1.25	1.7	293	180
3	9.0	21	2.3	244	205
4	1.13	3	2.7	285	270
5	0.3	0,5	1.7	254	150
6	0.8	1.25	1.6	280	160
7	9.5	14	1.5	420	220
8	0.6	1.25	2.1	248	180
9	0.7	0.75	1.1	237	90
10	0.84	1	1.2	180	80
11	2.22	1.5	0.7	530	145
12	4.5	7	1.6	250	140
13	0.6	2	3.3	277	330
14	0.125	1	8.0	45	130
15	55.0	35	0.6	540	124
16	78.0	51	0.7	590	139
17	93.0	60	0.6	560	130
18	93.0	53	0.6	560	115
19	93.0	78	0.8	500	151
20	93.0	72	0.8	560	156
21	93.0	84	0.9	540	176
22	35.0	41	1.2	353	149
23	35.0	36	1.0	350	130
24	35.0	40	1.1	350	144
25	45.0	90	2.0	300	220
26	28.0	30	1.1	360	139
27	15.5	33	2.1	187	143
28	15.5	61.5	4.0	90	129
29	15.5	41.5	2.7	190	183
30	20.0	40	2.0	300	220
31	15.5	53	3.4	183	225
32	21.0	34	1.6	170	99
33	21.0	50	2.4	151	129
34	1.0	2	2.0	300	220
35	21.0	32	1.5	225	123
Promedio			2.0	319	167
SD			1.4	147	54

SD: desviación estándar

En la figura 4.9 se señalan los predios (indicados con puntos azules) en los cuales se efectuaron las mediciones. No se corresponden con los treinta y cinco eventos de la tabla 4.10, ya que algunos predios se evaluaron más de una vez.

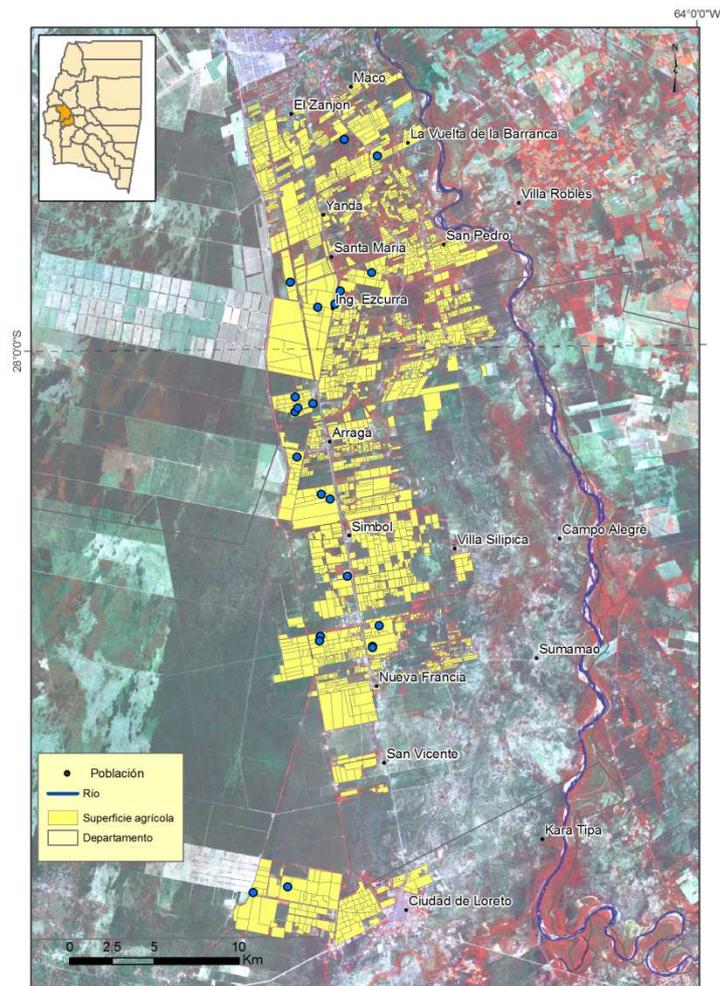


Figura 4.9. Predios en los que se hicieron las evaluaciones de riego.

La práctica del riego es similar independientemente del momento de aplicación y del cultivo (en el caso de cultivos extensivos; sí hay diferencias cuando se riegan hortalizas); es decir, el productor tiene hábitos de manejo que utiliza en general.

En el 80% de los casos presentados en la tabla 4.10 se aplicó agua en exceso; esto es, más de la necesaria para reponer la humedad del suelo hasta capacidad de campo. Las condiciones de sobre-irrigación se reflejaron en el valor promedio de indicadores tales como la eficiencia de aplicación (59%) la eficiencia de almacenaje (96%) y la razón de percolación (0.39). Esto es consistente con el suministro relativo de riego (SRR) calculado por Prieto, D. (2006) para el distrito San Martín: un promedio de 2.3 para los años 1995 a 2002. El SRR es un indicador de desempeño que expresa la relación entre el agua que se deriva para riego y los requerimientos de los cultivos.

Los momentos de riego (53 y 83 DDS) son los más utilizados en maíz y algodón, según lo mencionado por los productores en las encuestas citadas. Los momentos son aproximados y surgen de los usos habituales en el área bajo estudio. El detalle es el siguiente: se aplica riego de pre-siembra y transcurridos alrededor de siete días, se siembra. El turno de riego es, en promedio, cada 30 días. O sea que, contando desde el riego de pre-siembra y teniendo en cuenta la fecha de siembra, el siguiente turno sería alrededor de los 23 días de emergido el cultivo. Este turno de riego habitualmente no es usado por los productores, por distintos motivos, entre los que se puede mencionar: falta de nivelación del terreno, que dificulta

aplicar el riego y produce anegamientos en sectores del lote que afectan a las plantas, que son aún pequeñas; la consideración de que el riego de presembrado permite acumular suficiente agua en el perfil y, por lo tanto, “dejar pasar” el primer turno; en el caso del algodón, opinión de que no es necesario aplicar riego en esta etapa del cultivo; ocurrencia de lluvias, que aunque no sean copiosas, llevan a los agricultores a tomar la decisión de no regar. Luego, en general, hacen uso de los turnos siguientes, que serían aproximadamente a los 53 y 83 días de ciclo del cultivo.

La estrategia de riego para Y_{wL} fue elegir el mejor manejo posible, teniendo en cuenta las restricciones impuestas por el sistema de turnos. Este esquema incluye un riego adicional respecto de Y_a , a los 23 DDS. Se consideró que un cuarto riego, posterior a los 83 DDS, no sería agrónomicamente lógico ni en maíz ni en algodón, con el cultivo definido y en proximidad de la cosecha. La lámina de 125 mm en cada riego se deriva del manejo planteado por Romanella (1971), considerando el caudal en cabecera de finca, el tiempo de riego por hectárea y la eficiencia de aplicación (E_a) media que se estimaba podría alcanzarse, mejorando la sistematización de los predios y el manejo por parte del agricultor. El detalle es el siguiente:

Caudal de reglamento: 300 l.s^{-1}

Tap de reglamento: 50 min.ha^{-1}

Dn: 90 mm.ha^{-1}

E_a de proyecto: 70%

Db: 125 mm

Donde: Dn: lámina de riego neta

E_a : eficiencia de aplicación en finca

Db: lámina de riego bruta

Para simular la producción potencial Y_p se eligió en AquaCrop la opción de riego GIR (*Generate irrigation requirement*), para no producir estrés hídrico en ningún momento del ciclo del cultivo. En tal programación se aplica una dosis de riego al consumirse el 100% del agua fácilmente disponible (RAW), reponiéndose la humedad hasta capacidad de campo. El umbral utilizado para definir el RAW fue el 50% ($p=0.50$) de consumo del agua disponible total (TAW) para algodón y el 40% de TAW ($p=0.40$) para maíz. AquaCrop aplica láminas de riego netas; a los fines de la comparación del uso del agua entre los escenarios y buscando reproducir situaciones reales de manejo, se consideraron los requerimientos de lixiviación y la eficiencia de aplicación, de forma tal de generar la aplicación de láminas brutas.

El requerimiento de lixiviación es la cantidad adicional de agua que debe agregarse a la lámina neta de riego para lavar las sales que se incorporan con el agua de riego y mantener el equilibrio salino del suelo dentro del rango deseado. Los rendimientos de los cultivos no se ven afectados hasta un cierto valor de la conductividad eléctrica del extracto de saturación (CEes) que depende de cada cultivo. A partir de ese umbral la disminución de rendimientos es directamente proporcional al incremento de la salinidad. La expresión de esta relación es:

$$Y_{rel} = 100 - b (CE_{es} - a) \quad [4.3]$$

donde: Y_{rel} =rendimiento relativo (%)

a=umbral de tolerancia (CE máxima, hasta la cual no se produce disminución del rendimiento)

b=constante de proporcionalidad (disminución de rendimiento cuando se supera el umbral a).

CEes=conductividad eléctrica promedio del extracto saturado del suelo.

En la figura 4.10 se muestra la relación entre rendimiento y salinidad para maíz y algodón.

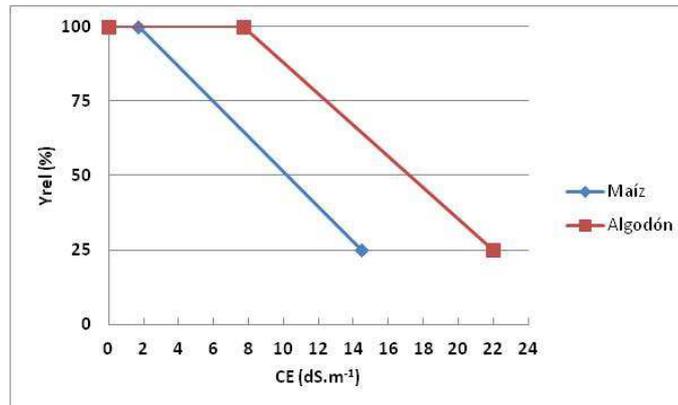


Figura 4.10. Relación entre rendimiento y salinidad del extracto saturado del suelo para maíz y algodón.

Existen tablas con los valores de los parámetros a y b de diferentes cultivos, y también con los valores de rendimiento relativo a distintos niveles de salinidad. Para el maíz, $a=1.7$ dS.m⁻¹ y para algodón $a=7.7$ dS.m⁻¹. Para el estudio de las relaciones entre rendimiento de los cultivos y salinidad se recomienda consultar a Ayers y Westcot (1985); Maas (1986) y Maas y G. y Hoffman (1977).

En función del cultivo, la calidad del agua disponible y considerando que se busca que los rendimientos no se vean afectados por la salinidad, se establece cuál será el requerimiento de lixiviación. Para ello se necesita conocer la conductividad eléctrica del agua de riego (CEi) y la conductividad eléctrica del agua de drenaje (CEd), ya que:

$$RL = CEi \cdot CEd^{-1} \quad [4.4]$$

Donde: RL=requerimiento de lixiviación

CEi=conductividad eléctrica del agua de riego

CEd= conductividad eléctrica del agua de drenaje

Dado que no es práctico ni sencillo obtener a campo de la CEd, se la puede estimar mediante el siguiente razonamiento, que se basa en la distribución de las sales en la zona de exploración radicular luego de producido el riego (figura 4.11).

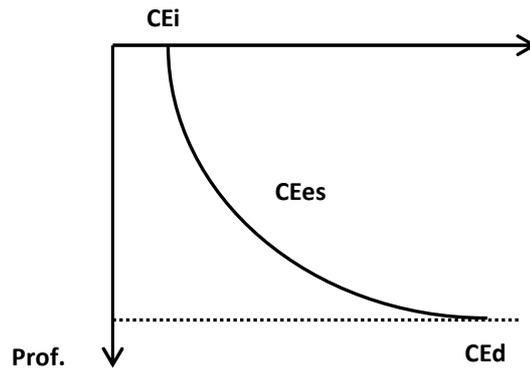


Figura 4.11. Perfil de salinidad en un suelo bajo riego.

La CE de los primeros centímetros de suelo, al momento del riego, se asume que es prácticamente igual a la CEi, por encontrarse en estado saturado. Al avanzar el agua en profundidad, va acumulando las sales del perfil. Si se acepta que la CEes es aproximadamente el promedio entre la CEi y la CEEd:

$$CEes = \frac{CEi + CEEd}{2} \quad [4.5]$$

Por lo tanto:

$$CEEd = 2 CEes - CEi \quad [4.6]$$

De esta manera se obtiene el valor de la CEEd para el cálculo del requerimiento de lixiviación según la ecuación 4.4. Si en la ecuación 4.6 a CEes se le asigna el valor del umbral α , el RL así calculado asegura que no se producirá disminución de rendimiento por efecto de la salinidad. De esta forma y sabiendo que CEi=0.56 dS.m⁻¹ quedan definidos los siguientes requerimientos de lixiviación:

$$\text{Maíz: RL} = 0.56/2.8 = 0.20; \text{ Algodón: RL} = 0.56/14.8 = 0.04$$

El otro aspecto que se consideró es la eficiencia de aplicación. Para la caracterización del nivel de producción Yp , se fijó una Ea del 80%, ya que se considera posible de alcanzar mejorando la sistematización de los predios y el control del riego. De hecho, ese valor se ha medido en lotes de producción del INTA Santiago del Estero y en campos de productores que han incorporado tecnología láser para la sistematización de sus terrenos.

4.3.3 Variables analizadas

Las variables calculadas y analizadas fueron: rendimiento (Y), índice de cosecha (IC), relación transpiración real/transpiración máxima (Tra/Trx), riego (Irr), drenaje (Dr), índice de drenaje (IDr), productividad del agua (WP) y productividad del agua de riego (IWP). Fueron seleccionadas ya que permiten realizar un buen análisis de las relaciones agua-rendimiento y del uso del agua. Varios de ellos (Tra/Trx, WP, IWP, IDr) pueden considerarse en sí mismos indicadores de manejo de agua. En la Tabla 4.11 se dan sus definiciones.

Tabla 4.11. Definición de *outputs* analizados.

<i>Output</i>	Definición	Unidades
Y	Producto cosechado	t.ha ⁻¹
IC	Relación entre producto cosechado y biomasa aérea	-
Tra/Trx	Relación entre la Tr real del cultivo y la Tr máxima	-
Irr	Riego aplicado en el ciclo del cultivo	mm
Dr	Agua drenada por debajo de la zona de raíces en el ciclo del cultivo	mm
IDr	Relación del Dr en escenario <i>Ypot</i> respecto de los escenarios <i>Ywl</i> y <i>Ya</i>	-
WP	Producto cosechado en relación a ET	kg.ha ⁻¹ .mm ⁻¹
IWP	Aumento de los rendimientos debido al riego / Dosis de riego	kg.ha ⁻¹ .mm _w ⁻¹

4.4 Análisis de los resultados

4.4.1 Maíz

Para caracterizar las precipitaciones ocurridas entre los años 1988 y 2013 se graficaron las probabilidades acumuladas para ambas fechas de siembra (figura 4.12).

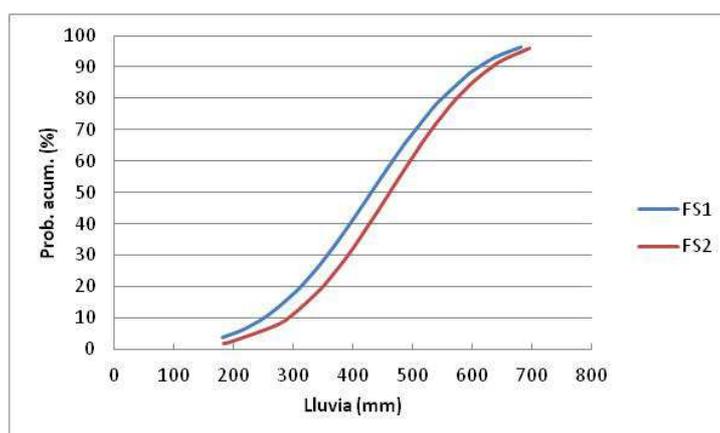


Figura 4.12. Probabilidad acumulada, lluvias para los períodos octubre-febrero (FS1) y diciembre-abril (FS2), serie 1988-2013.

En el período octubre-febrero hay un 50% de probabilidades de que se produzca una lluvia del orden de 435 mm. Yendo hacia los extremos, hay un 20% de probabilidades de que la lluvia sea de aproximadamente 560 mm y un 80% de 310 mm. La ETo promedio es de 760 mm. En diciembre-abril hay un 50% de probabilidades de que la lluvia sea del orden de 465 mm, un 20% de 573 mm y un 80% de 345 mm. La ETo promedio es de 657 mm. Las precipitaciones medias son levemente mayores (6%) en la FS2; mayor es la diferencia de la demanda atmosférica, ya que la ETo de diciembre-abril es 103 mm (14%) inferior respecto de la ETo de octubre-febrero.

Rendimiento, índice de cosecha y relación Tra/Trx

La tabla 4.12 muestra el rendimiento, índice de cosecha y relación Tra/Trx para el maíz, correspondiente a tres programaciones de riego y dos fechas de siembra. Los valores son promedios de los cuatro suelos seleccionados en el distrito de riego San Martín, SRRD. Serie climática 1988-2013.

Tabla 4.12. Rendimientos, IC y Tra/Trx para el cultivo de maíz.

Nivel de producción	FS	Y (t.ha ⁻¹)	IC	Tra/Trx
Potencial (Y _p)	Octubre	12,560	0.47	1.0
	Diciembre	13,084	0.47	1.0
Limitado por el agua (Y _{wl})	Octubre	11,418	0.41	0.95
	Diciembre	11,961	0.42	0.93
Real (Y _a)	Octubre	7,083	0.40	0.63
	Diciembre	6,756	0.37	0.61

En la figura 4.13 se presentan los rendimientos.

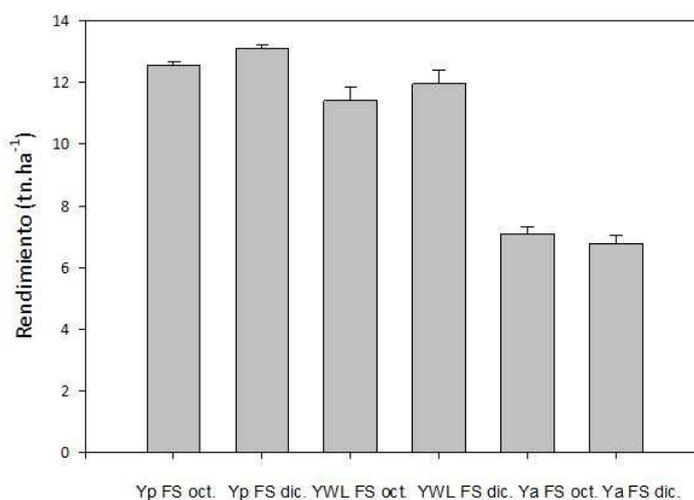
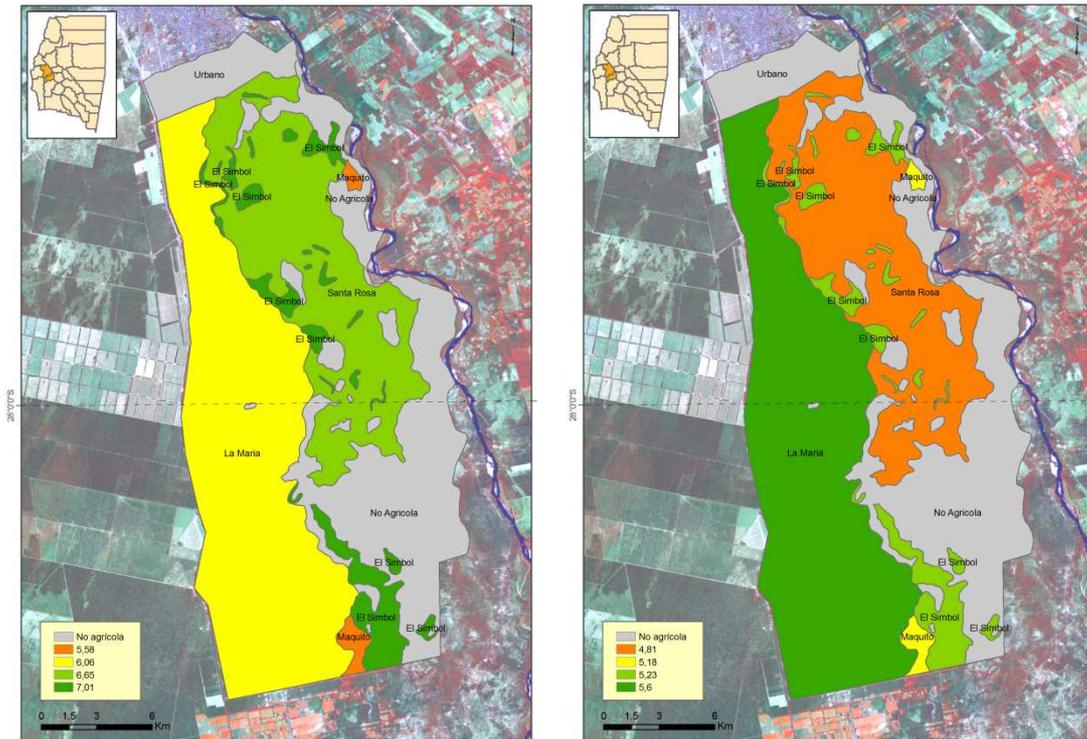


Figura 4.13. Rendimientos de maíz para tres programaciones de riego y dos fechas de siembra. El error estándar (EE) se representa por segmentos verticales.

Los máximos rendimientos se dan en el escenario Y_p, en el cual el riego a la demanda permite acompañar las necesidades de agua del cultivo. El rendimiento potencial (Y_p) es aproximadamente 1100 kg mayor que el limitado por el agua (Y_{wl}) y 5900 kg mayor que el real (Y_a). La brecha entre Y_{wl} y Y_a también es importante: los rendimientos son alrededor de 4800 kg más bajos en Y_a. Es decir, mejorar el actual uso del agua (aún dentro de la restricción impuesta por el método de entrega de agua por turno fijo), permitiría alcanzar muy buenos rendimientos. La brecha entre Y_{wl} y Y_a marca la subutilización de las posibilidades del sistema: en Y_{wl}, un riego adicional resulta en notables incrementos de producción. La fecha de siembra no tiene impacto marcado en los rendimientos, aunque son levemente mayores (alrededor de 0,5 t) en diciembre, en los escenarios Y_p y Y_{wl}. A modo ilustrativo, la figura 4.14a muestra la brecha de rendimientos en maíz entre la producción potencial y la real, y la figura 4.14b la brecha entre la producción limitada por el agua y la real, ambas para la fecha de siembra de diciembre.



Figuras 4.14a y 4.14b. Brechas de rendimiento de maíz entre escenarios Yp-Ya y Y_{WL} -Ya, respectivamente, para la fecha de siembra de diciembre.

Las diferencias que se observan entre los suelos, si bien no son importantes (sobre todo en la comparación Y_{WL} -Ya), se deben principalmente a las distintas características de retención de humedad. En las figuras 9 a 14 del Anexo 1 se presentan los rendimientos de maíz para los distintos escenarios analizados en el distrito de riego San Martín.

Las figuras 4.15 y 4.16 muestran, respectivamente, el IC y la relación Tra/Trx.

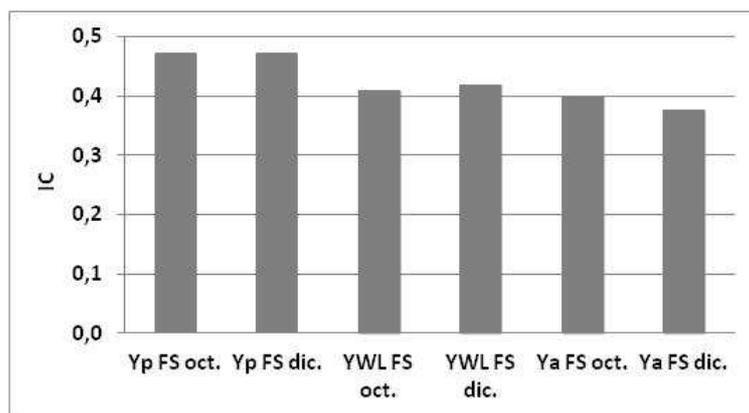


Figura 4.15. IC de maíz para tres programaciones de riego y dos fechas de siembra.

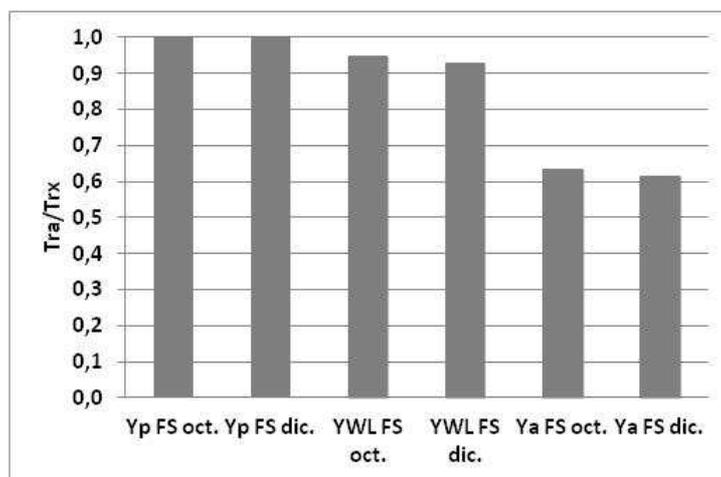


Figura 4.16. Relación Tra/Trx de maíz para tres programaciones de riego y dos fechas de siembra.

El IC del maíz en Yp es un 20% mayor a Ya, mientras que la diferencia es de menor importancia entre Y_{WL} e Ya. Dentro de cada escenario, esta variable no muestra diferencias entre fechas de siembra. Tomando la transpiración de Yp como 100%, la transpiración de Y_{WL} es, en promedio, un 94% de aquella y la de Ya, un 62%. La restricción hídrica que se produce afecta grandemente la transpiración y, como consecuencia, los rendimientos. Tampoco para Tra/Trx se observó influencia destacable de la fecha de siembra.

Riego, drenaje e índice de drenaje

La tabla 4.13 presenta el riego bruto, el drenaje y el índice de drenaje para maíz, correspondiente a tres programaciones de riego y dos fechas de siembra. Los valores son promedios para los cuatro suelos seleccionados en el distrito de riego San Martín, SRRD. Serie climática 1988-2013.

Tabla 4.13. Riego bruto, drenaje e índice de drenaje para el cultivo de maíz.

Nivel de producción	FS	Riego (mm)	Drenaje (mm)	IDr
Potencial	Octubre	325	154	1.00
	Diciembre	224	130	1.00
Limitado por el agua	Octubre	375	235	1.52
	Diciembre	375	301	2.31
Real	Octubre	340	220	1.43
	Diciembre	340	296	2.27

Las figuras 4.17 y 4.18 muestran las lluvias y los requerimientos de riego (escenario Yp) de maíz para los períodos octubre-febrero y diciembre-abril, respectivamente, para la serie 1988-2013.

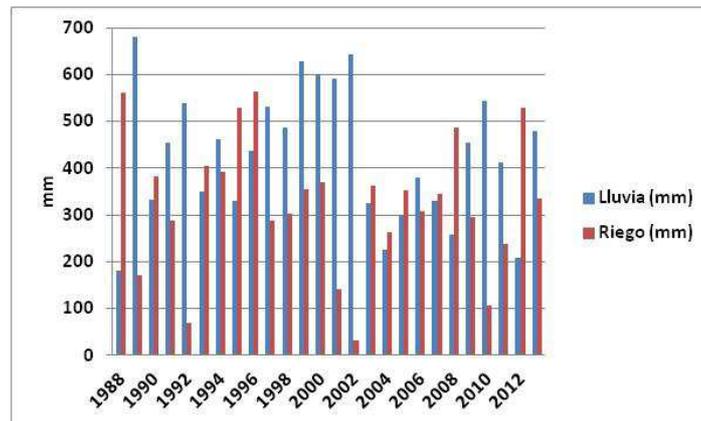


Figura 4.17. Lluvia y requerimientos brutos de riego de maíz, período octubre-febrero, serie 1988-2013.

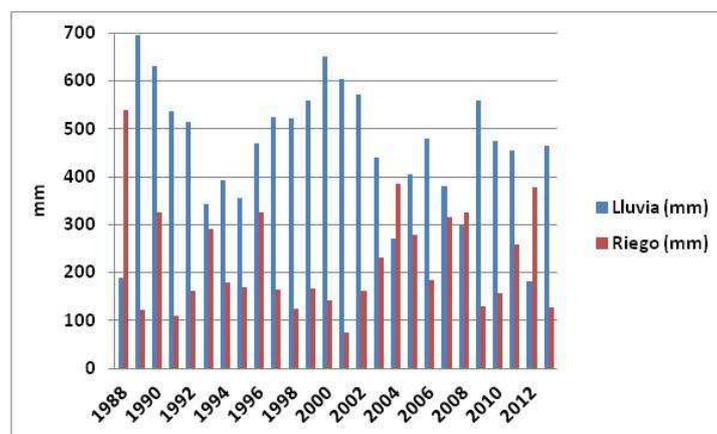


Figura 4.18. Lluvia y requerimientos brutos de riego en maíz, período diciembre-abril, serie 1988-2013.

Ambas figuras ilustran sobre la alta variabilidad de las precipitaciones y, como consecuencia, de los requerimientos de riego. En las figura 4.19 se muestra la probabilidad acumulada de las necesidades de riego de maíz en el período octubre-febrero (FS1) y diciembre-abril (FS2).

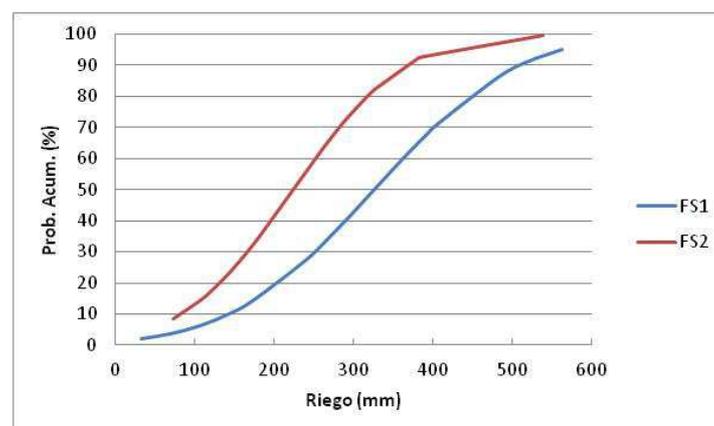


Figura 4.19. Probabilidad acumulada, requerimientos brutos de riego de maíz para el período octubre-febrero y diciembre-abril (FS2), serie 1988-2013.

Puede verse que los requerimientos de riego se reducen pasando de la fecha de siembra de octubre (FS1) a la de diciembre (FS2). En el período octubre-febrero hay un 50% de probabilidades de que los requerimientos brutos de riego sean del orden de 330 mm, un 20% de 440 mm y un 80% de 200 mm. O sea que en aproximadamente 5 de cada 10 años los productores deben aplicar 330 mm, en 2 de cada 10, 440 mm y en 8 de cada 10, 200 mm. En el período diciembre-abril hay un 50% de probabilidades de que los requerimientos brutos de riego sean de alrededor de 230 mm, un 20% de 316 mm y un 80% de 130 mm. La figura 4.20 muestra el riego y el drenaje y la figura 4.20, el IDr para el cultivo de maíz.

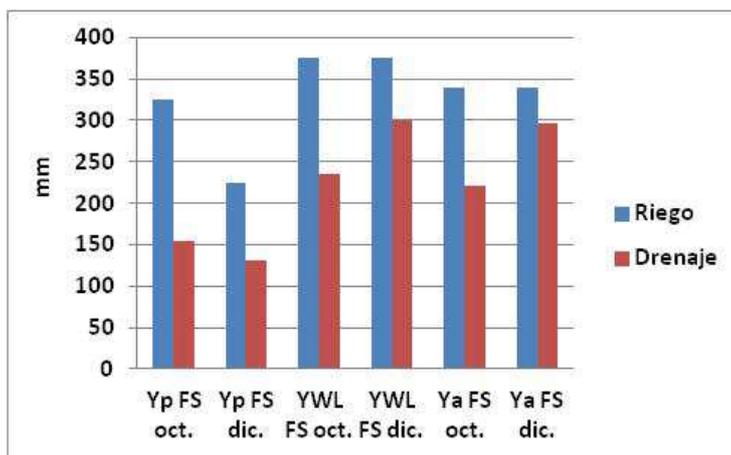


Figura 4.20. Requerimientos de riego y drenaje para tres programaciones de riego y dos fechas de siembra en el cultivo de maíz.

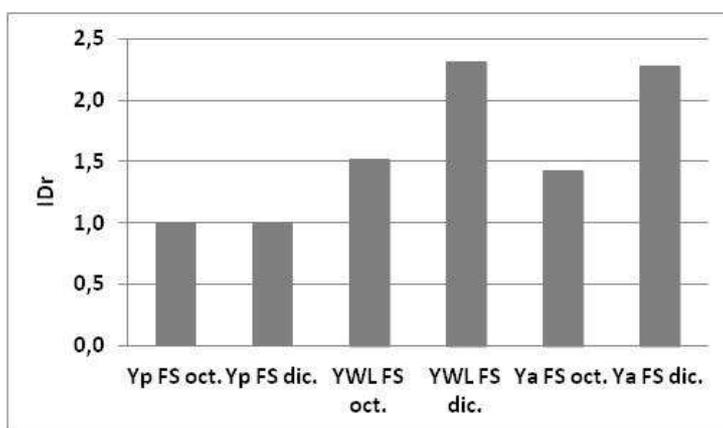


Figura 4.21. Índice de drenaje en el cultivo de maíz.

Las láminas de riego en Y_{WL} y Y_a son mayores a las aplicadas en Y_p : alrededor de 100 mm y 65 mm, respectivamente. En el escenario de manejo actual Y_a se producen sustanciales excesos de riego, como lo indican las láminas de drenaje y los IDr. Tales excesos superan no sólo los requerimientos de agua del cultivo, sino también las necesidades de lavado. Expresado en términos de IDr y tomando como base 1 para Y_p (que representa el mejor manejo del riego), el IDr en Y_{WL} es 1.91 y en Y_a , 1.85. Esto ilustra cómo la combinación de las características del sistema (limitaciones “fuera de la finca”) y los hábitos de riego de los productores (limitaciones “dentro de la finca”) se traducen en significativos excesos de riego que percolan en profundidad, especialmente en la FS2.

En el nivel de producción Yp la necesidad de riego es de casi 100 mm menor en la FS2 que en la FS1. Los menores requerimientos se deben principalmente a la menor ETo, aunque el régimen de lluvias tiene un cierto efecto, por los aportes algo mayores en diciembre-abril. Por lo tanto, tanto desde el punto de vista productivo (mayores rendimientos en la FS2 que en la FS1) como del uso del agua (menor requerimiento de riego) para el maíz la siembra de diciembre es preferible a la de octubre.

Productividad del agua y del agua de riego

En la tabla 4.14 y en las figuras 4.22 y 4.23 se presenta la productividad del agua (WP) y del agua riego (IWP) para maíz, correspondiente a tres programaciones de riego y dos fechas de siembra. Los valores son promedios para los cuatro suelos dominantes en el distrito de riego San Martín, SRRD. Serie climática 1988-2013.

Tabla 4.14. Productividad del agua y del agua riego para el cultivo de maíz.

Nivel de producción	FS	WP (kg.ha ⁻¹ .mm ⁻¹)	IWP (kg.ha ⁻¹ .mm _{IW} ⁻¹)
Potencial	Octubre	23.6	24.8
	Diciembre	27.0	29.5
Limitado por el agua	Octubre	21.2	18.5
	Diciembre	24.8	14.6
Real	Octubre	17.3	7.6
	Diciembre	17.3	1.0

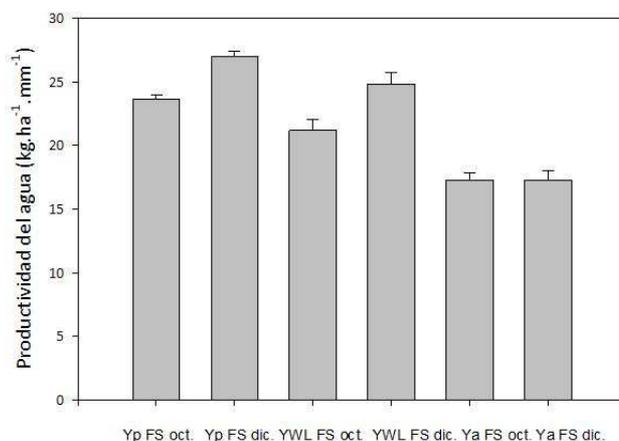


Figura 4.22. Productividad del agua en el cultivo de maíz. El error estándar (EE) se representa por segmentos verticales.

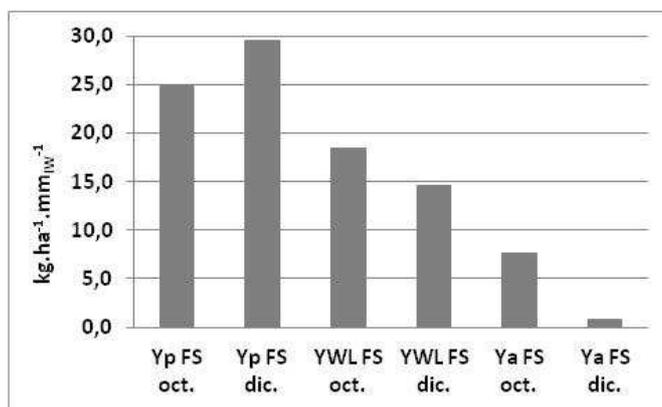
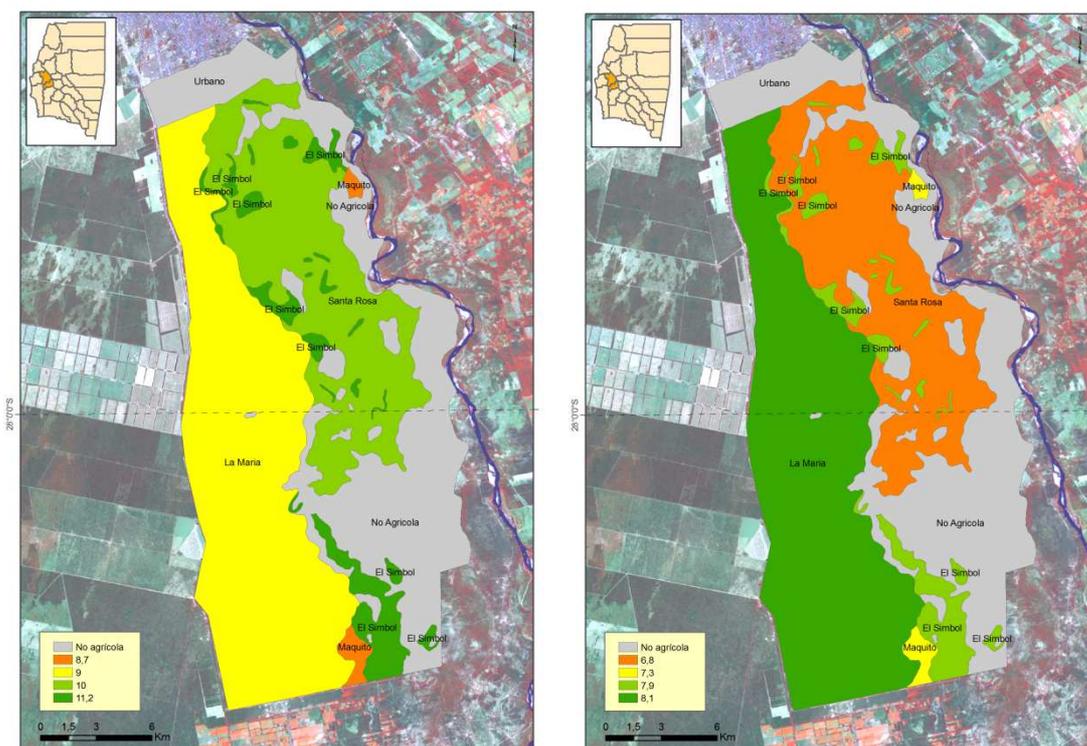


Figura 4.23. Productividad del agua de riego en el cultivo de maíz.

La productividad del agua en Ya es alrededor de $8 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ inferior respecto a Yp y $5 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ inferior a Y_{WL}. La diferencia es de menor magnitud entre Y_{WL} e Yp. A su vez, en Yp y en W_{WL}, la WP es mayor en diciembre que en octubre. La figura 4.24a muestra la brecha de productividad del agua en maíz entre la producción potencial y la real, y la figura 4.24b la brecha entre la producción limitada por el agua y la real, ambas para la fecha de siembra de diciembre.



Figuras 4.24a y 4.24b. Brechas de productividad del agua en maíz entre escenarios Yp-Ya e Y_{WL}-Ya, respectivamente, para la fecha de siembra de diciembre.

La IWP promedio de Y_{WL} es $10 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ menor respecto de Yp y la de Ya, $20 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ menor, mientras que la IWP de Ya es $10 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ menor que la de Y_{WL}. A su vez, en Yp hay diferencias entre fechas de siembra: en diciembre la IWP es mayor que en octubre. Sencillos cambios de manejo del riego por parte de los productores permitirían relevantes incrementos en WP e IWP, aún dentro de las restricciones que impone el turno fijo de entrega de agua. Este análisis de WP e IWP refuerza la conclusión de que para el cultivo de maíz la fecha de siembra de diciembre es preferible a la de octubre. Si bien el estudio estuvo enfocado

en la relación agua-rendimiento, el análisis de las temperaturas que ocurren durante la floración también abona la predilección de diciembre para sembrar maíz, ya que las condiciones son menos extremas. Se calculó la temperatura media máxima y se observaron las máximas para un período de quince días alrededor del momento de floración. Los datos se presentan en la tabla 4.15 y en las figuras 4.25 y 4.26.

Tabla 4.15. Temperaturas en el momento de floración para dos fechas de siembra de maíz.

Momento de floración	Tmax media	Tmax absoluta
10 al 25 de diciembre (FS octubre)	33.5	40.4
5 al 20 de febrero (FS diciembre)	32.0	37.7

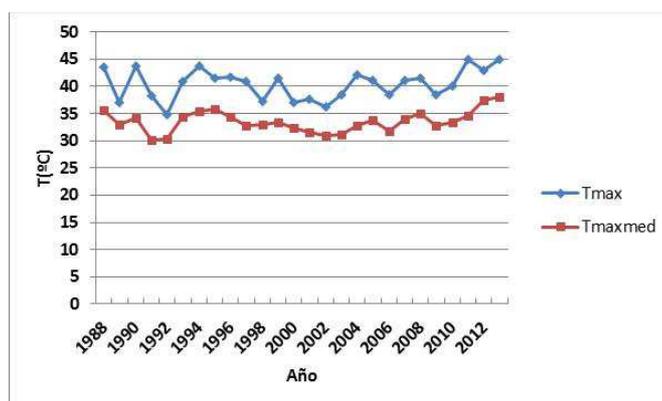


Figura 4.25. Temperaturas máximas medias y temperaturas máximas para el período 10 a 25 de diciembre (serie climática 1988-2013).

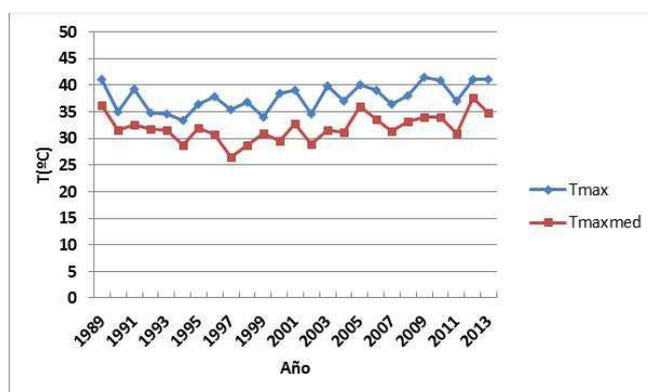


Figura 4.26. Temperaturas máximas medias y temperaturas máximas para el período 5 a 20 de febrero (serie climática 1988-2013).

4.4.2 Algodón

Para caracterizar las precipitaciones ocurridas entre los años 1988 y 2013 se graficaron las probabilidades acumuladas para ambas fechas de siembra (figura 4.27).

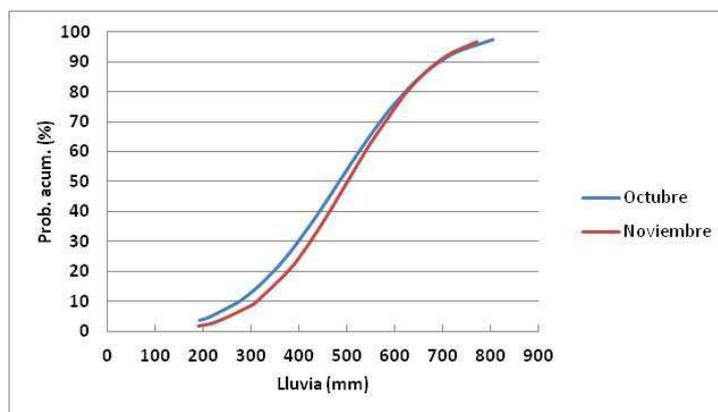


Figura 4.27. Probabilidad acumulada, lluvias para los períodos octubre-marzo (FS1) y noviembre-abril (FS2), serie 1988-2013.

En el período octubre-marzo hay un 50% de probabilidades de que se produzca una lluvia del orden de 480 mm. Yendo hacia los extremos, hay un 20% de probabilidades de que la lluvia sea de aproximadamente 620 mm y un 80% de 345 mm. La ETo promedio es de 800 mm. En noviembre-abril hay un 50% de probabilidades de que la lluvia sea de alrededor de 500 mm, un 20% de 625 mm y un 80% de 380 mm. La ETo promedio es de 750 mm. Las precipitaciones son similares en ambos períodos, en promedio levemente mayores (4%) para la FS2. La demanda atmosférica es un 7% inferior en la FS2.

Rendimiento, índice de cosecha y relación Tra/Trx

La tabla 4.15 detalla rendimiento, índice de cosecha y relación Tra/Trx para algodón, correspondiente a tres programaciones de riego y dos fechas de siembra. Los valores son promedios para los cuatro suelos seleccionados en el distrito de riego San Martín, SRRD. Serie climática 1988-2013.

Tabla 4.15. Rendimientos, IC y Tra/Trx para el cultivo de algodón.

Nivel de producción	FS	Y (t.ha-1)	IC	Tra/Trx
Potencial	Octubre	5,091	0.43	1.00
	Noviembre	5,166	0.43	1.00
Limitado por el agua	Octubre	4,315	0.41	0.88
	Noviembre	4,158	0.39	0.86
Real	Octubre	3,090	0.40	0.67
	Noviembre	2,982	0.40	0.66

La figura 4.28 muestra los rendimientos.

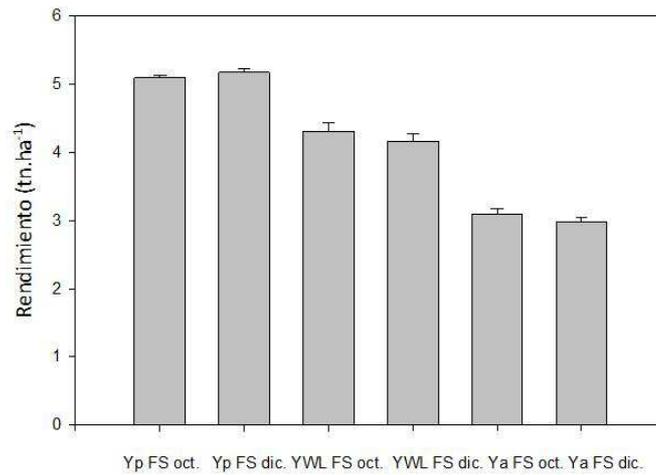
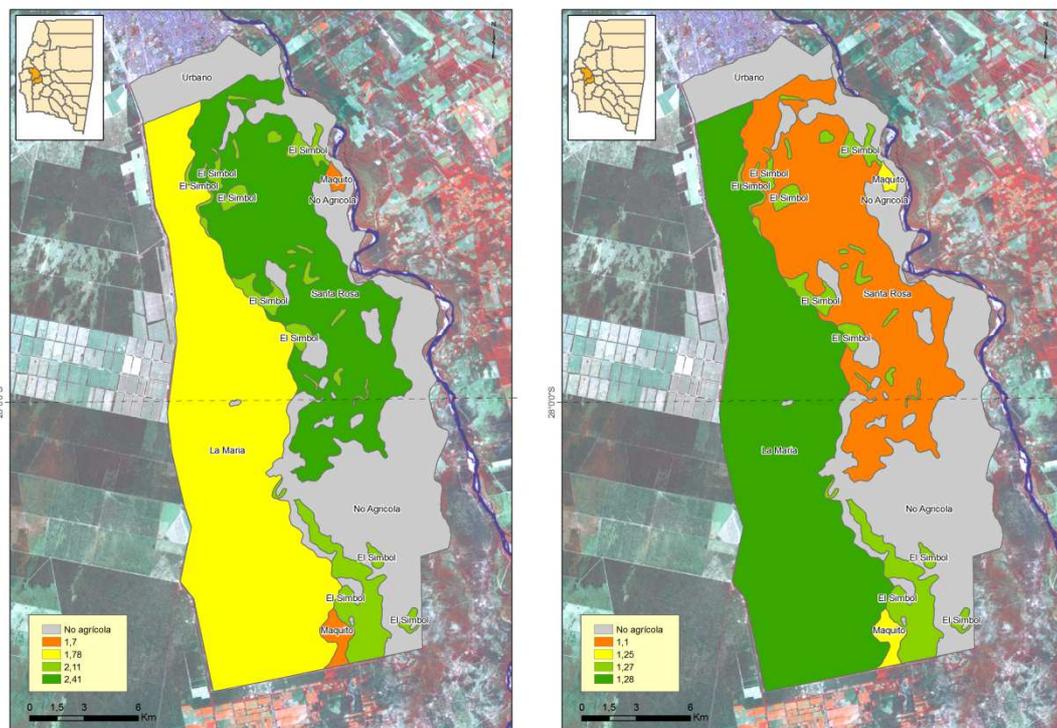


Figura 4.28. Rendimientos de algodón para tres programaciones de riego y dos fechas de siembra. El error estándar (EE) se representa por segmentos verticales.

En los niveles de producción Y_{WL} y Y_a los rendimientos son, respectivamente, 800 kg y 2000 kg inferiores a Y_p (producción potencial). A su vez, entre Y_{WL} y Y_a , la diferencia es de 1200 kg, lo remarca la subutilización del sistema de riego desde el punto de vista de la disponibilidad de agua. Al igual que para el maíz, en Y_{WL} , un riego adicional respecto a los que habitualmente aplican los productores permitiría lograr un importante incremento de la producción. La fecha de siembra no tiene mayor incidencia en los rendimientos en ninguno de los tres niveles de producción. Como ejemplo, la figura 4.29a muestra la brecha de rendimientos en algodón entre la producción potencial y la real, y la figura 4.29b la brecha entre la producción limitada por el agua y la real, ambas para la fecha de siembra de octubre.



Figuras 4.29a y 4.29b. Brechas de rendimiento de algodón entre escenarios Y_p - Y_a e Y_{WL} - Y_a , respectivamente, para la fecha de siembra de octubre.

Se estima que las diferencias de rendimiento que se observan entre los suelos se deben principalmente a las distintas características de retención de humedad, dado que la fertilidad de los mismos es similar. En las figuras 15 a 20 del Anexo 1 se presentan los rendimientos de algodón para los distintos escenarios analizados en el distrito de riego San Martín.

En la figura 4.30 se observa el IC y en 4.31 la relación Tra/Trx.

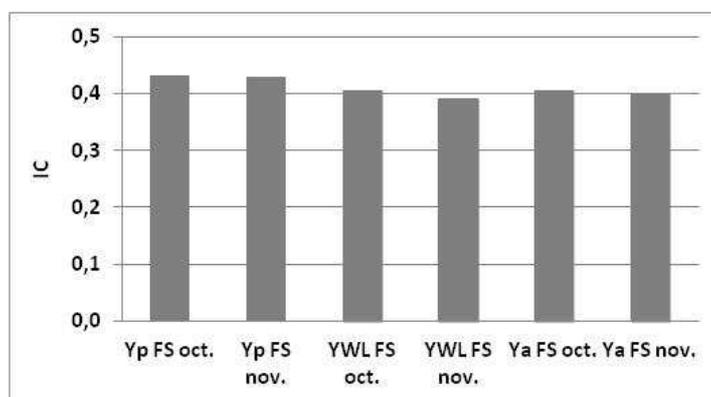


Figura 4.30. IC en algodón para tres programaciones de riego y dos fechas de siembra.

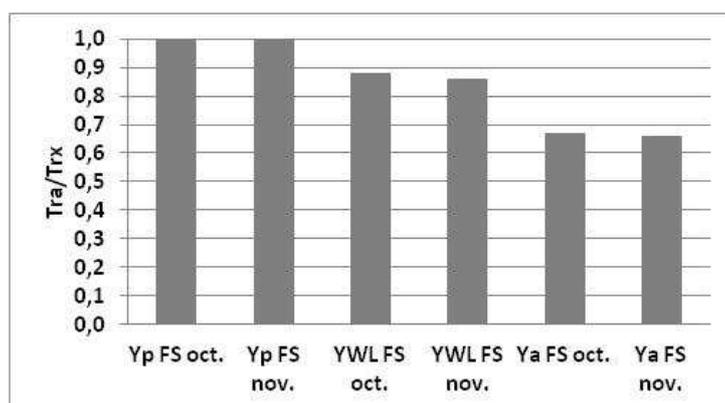


Figura 4.31. Relación Tra/Trx en algodón para tres programaciones de riego y dos fechas de siembra.

Los IC casi no difieren entre niveles de producción; en Y_{WL} y Y_a son un 7% inferiores respecto a Y_p . La fecha de siembra prácticamente no influye en el IC. Tomando la transpiración de Y_p como 100%, la transpiración de Y_{WL} es un 87% de aquella y la de Y_a , un 66%. Al igual que para el maíz, las restricciones hídricas asociadas del manejo del riego afectan la transpiración y, como consecuencia, los rendimientos. Tampoco para Tra/Trx se observó influencia destacable de la fecha de siembra.

Riego, drenaje e índice de drenaje

En la tabla 4.16 se presenta el riego bruto, drenaje y el índice de drenaje en algodón, correspondiente a tres programaciones de riego y dos fechas de siembra. Los valores son promedios para los cuatro suelos seleccionados en el distrito de riego San Martín, SRRD. Serie climática 1988-2013.

Tabla 4.16. Riego bruto, drenaje e índice de drenaje para el cultivo de algodón.

Nivel de producción	FS	Riego (mm)	Drenaje (mm)	IDr
Potencial	Octubre	377	146	1.00
	Noviembre	307	136	1.00
Limitado por el agua	Octubre	375	229	1.57
	Noviembre	375	268	1.97
Real	Octubre	340	191	1.31
	Noviembre	340	233	1.71

Las figuras 4.32 y 4.33 muestran las lluvias y los requerimientos brutos de riego (escenario Yp) de algodón para los períodos octubre-marzo y noviembre-abril, respectivamente.

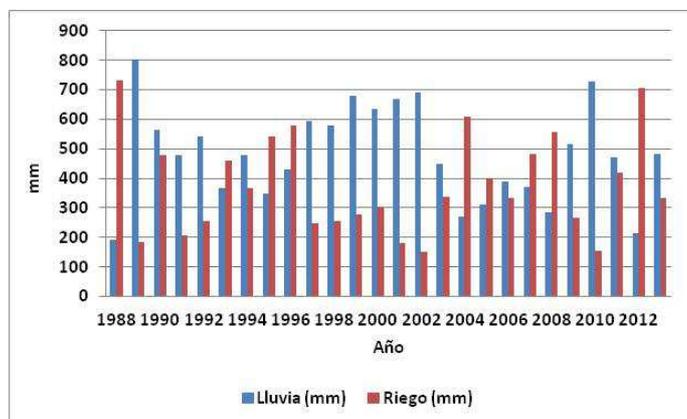


Figura 4.32. Lluvia y requerimiento bruto de riego de algodón para el período octubre-marzo, serie 1988-2013.

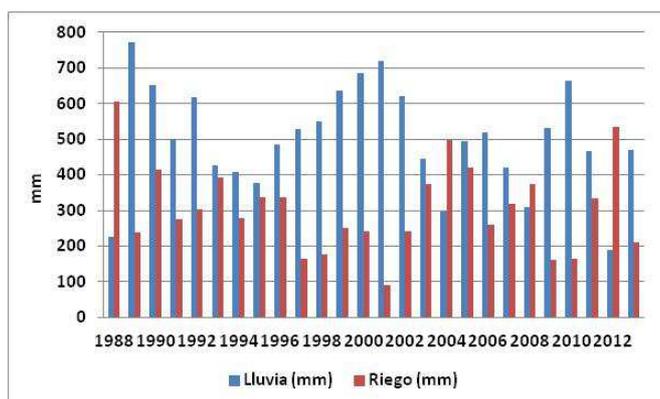


Figura 4.33. Lluvia y requerimiento bruto de riego de algodón para el período noviembre-abril, serie 1988-2013.

Al ser períodos de cultivo semejantes a los del maíz, se repite la alta variabilidad de las precipitaciones (característica del clima semiárido) y, como consecuencia, de los requerimientos de riego. El turno fijo de entrega de agua representa una limitación para que los agricultores puedan hacer frente a tal variabilidad. La figura 4.34 muestra la probabilidad

acumulada de las necesidades de riego de algodón en los períodos octubre-marzo (FS1) y noviembre-abril (FS2).

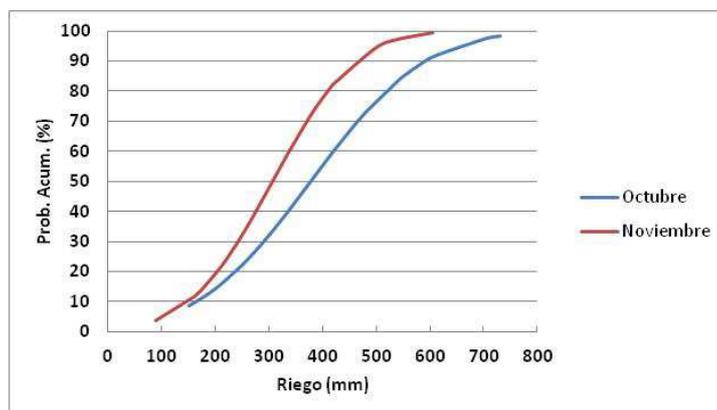


Figura 4.34. Probabilidad acumulada, requerimientos brutos de riego de algodón para los períodos octubre-marzo y noviembre-abril, serie 1988-2013.

Se observa que los requerimientos de riego bajan cambiando la fecha de siembra de octubre (FS1) a la de noviembre (FS2). En el período octubre-marzo hay un 50% de probabilidades de que los requerimientos brutos de riego sean del orden de 370 mm, un 20% de 520 mm y un 80% de 240 mm. O sea que en aproximadamente 5 de cada 10 años los productores deben aplicar 370 mm, en 2 de cada 10, 520 mm y en 8 de cada 10, 240 mm. En el período noviembre-abril hay un 50% de probabilidades de que los requerimientos brutos de riego sean de aproximadamente 310 mm, un 20% de 410 mm y un 80% de 210 mm. La figura 4.35 muestra los requerimientos de riego y el drenaje y la figura 4.36, el IDr para el cultivo de algodón.

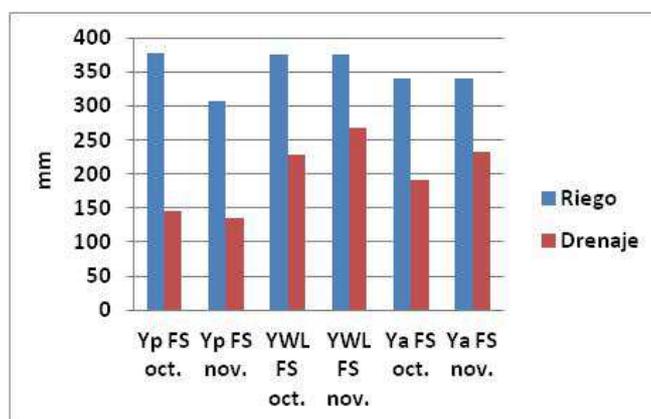


Figura 4.35. Requerimientos de riego y drenaje para tres programaciones de riego y dos fechas de siembra en el cultivo de algodón.

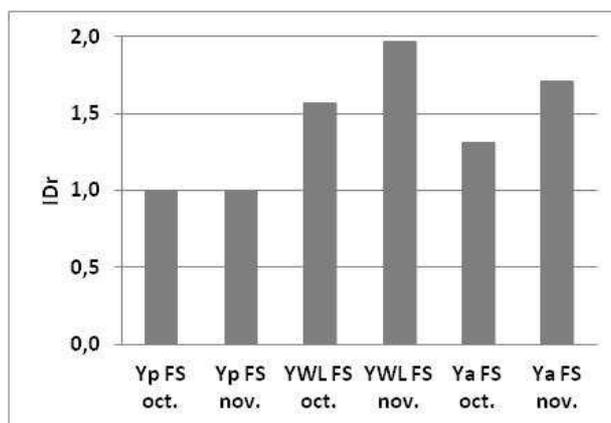


Figura 4.36. Índice de drenaje en el cultivo de algodón.

Las láminas de riego en Y_{WL} y Y_a son similares a la de Y_p . Sin embargo, las diferencias en el drenaje son notables. Expresado en términos de IDr y tomando base 1 para Y_p (el escenario con mejor manejo de agua), el IDr para Y_{WL} es alrededor de 1.70 y para Y_a , 1.50.

En el nivel de producción Y_p la necesidad de riego es 70 mm inferior en la FS2. Los menores requerimientos de riego se explican por el efecto combinado de un aporte de lluvias mayor y una demanda atmosférica menor. En la FS2, en Y_a y en Y_{WL} se aplican los mayores excesos de riego, lo cual conduce a los valores más altos de IDr: 1.71 para Y_a y 1.97 para Y_{WL} .

Productividad del agua y del agua de riego

En la tabla 4.17 y en las figura 4.37 y 4.38 se presenta la productividad del agua (WP) y del agua de riego (IWP) para algodón, correspondiente a tres programaciones de riego y dos fechas de siembra. Los valores son promedios para los cuatro suelos dominantes en el distrito de riego San Martín, SRRD. Serie climática 1988-2013.

Tabla 4.17. Productividad del agua y del agua de riego en algodón.

Nivel de producción	FS	WP $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$	IWP $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}_{IW}^{-1}$
Potencial	Octubre	8.2	6.6
	Noviembre	8.8	8.2
Limitado por el agua	Octubre	7.5	4.6
	Noviembre	7.7	4.0
Real	Octubre	6.7	1.5
	Noviembre	6.8	1.0

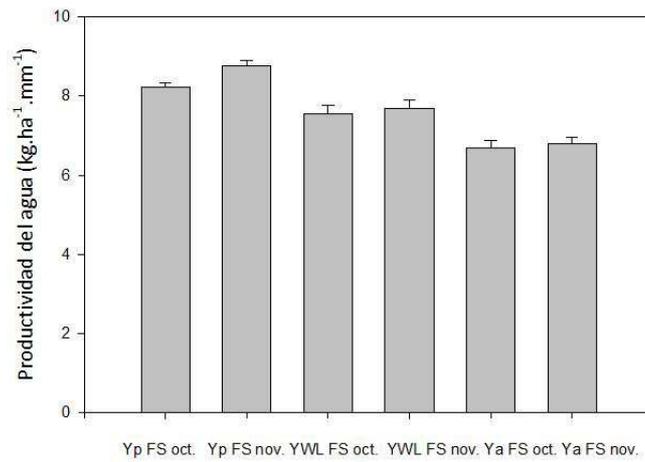


Figura 4.37. Productividad del agua en algodón. El error estándar (EE) se representa por segmentos verticales.

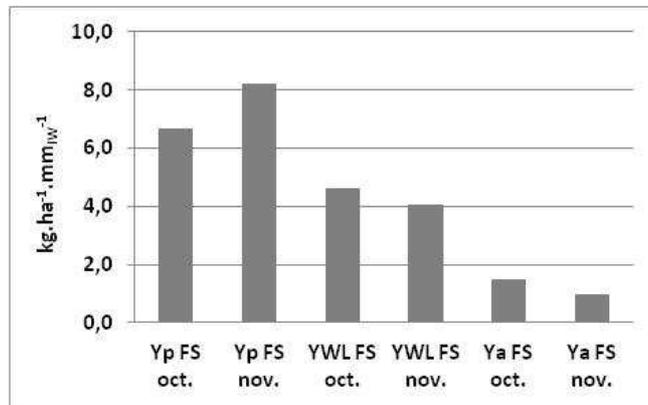
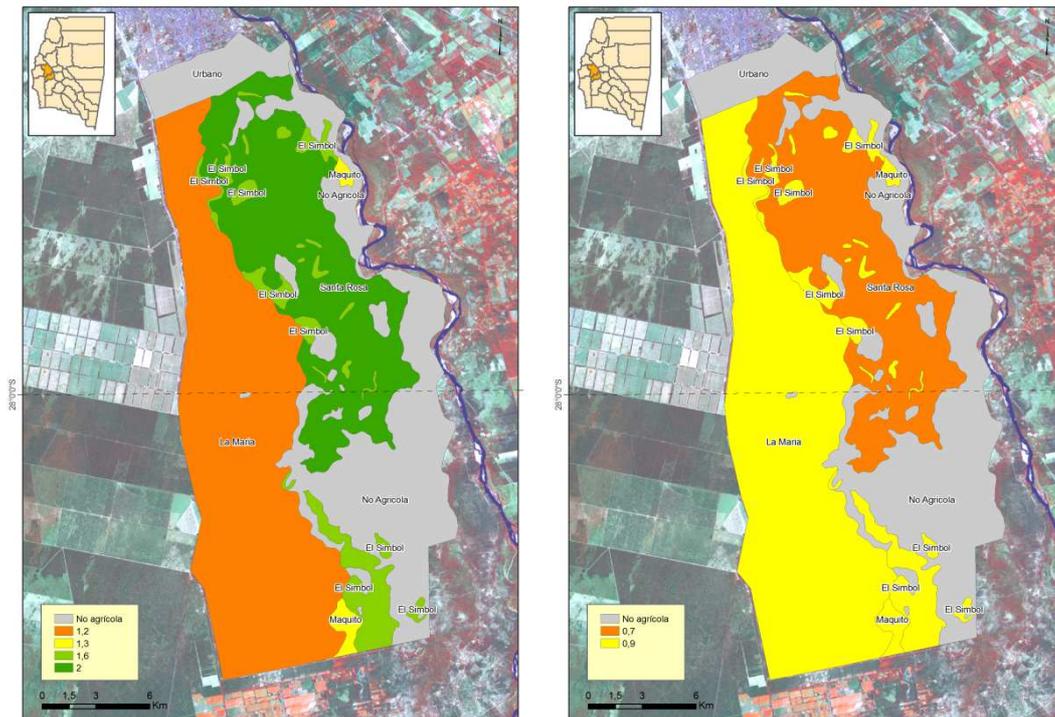


Figura 4.38. Productividad del agua de riego en algodón.

La productividad del agua de Y_{WL} es alrededor de $1 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ menor a Y_p y la de Y_a , $1.5 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ menor a la de Y_p . No hay diferencias remarcables entre fechas de siembra. La figura 4.39a muestra la brecha de la productividad del agua en algodón entre la producción potencial y la real, y la figura 4.39b la brecha entre la producción limitada por el agua y la real, ambas para la fecha de siembra de octubre.



Figuras 4.39a y 4.39b. Brechas de productividad del agua en algodón, entre escenarios Yp-Ya e Y_{WL} -Ya, respectivamente, para la fecha de siembra de octubre.

La IWP promedio de Y_{WL} es alrededor de $3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}_{IW}^{-1}$ menor respecto de Yp y la de Ya, alrededor de $6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}_{IW}^{-1}$ menor. A su vez, la IWP de Ya es $3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}_{IW}^{-1}$ inferior a Y_{WL} . Para el algodón, cambios de manejo del riego permitirían incrementos muy importantes en la IWP. La fecha de siembra cobra cierta importancia en el escenario Yp, ya que en noviembre la IWP es algo mayor que en octubre. Así, desde el punto de vista del uso del agua de riego, la fecha de siembra de noviembre es preferible a la de octubre.

4.5 Conclusiones

Se determinó la brecha de rendimiento y de productividad del agua para maíz y algodón en el Distrito San Martín del Sistema de Riego del Río Dulce (SRRD), Santiago del Estero, mediante el uso conjunto de los modelos AquaCrop y AguaGIS, relevamientos de campo y encuestas.

Los máximos rendimientos de maíz ocurren en el escenario de producción potencial (Yp), en el cual el riego a la demanda permite acompañar las necesidades de agua del cultivo. El rendimiento potencial (Yp) es aproximadamente 1100 kg mayor que el limitado por el agua (Y_{WL}) y 5900 kg mayor que el real (Ya). La brecha entre Y_{WL} y Ya también es importante: el rendimiento es alrededor de 4800 kg más alto en Y_{WL} . Mejorar el actual uso del agua (aún dentro de la restricción impuesta por el método de entrega de agua por turno fijo), permitiría alcanzar muy buenos rendimientos.

En el escenario de manejo actual Ya se producen sustanciales excesos de riego, como lo indican las láminas de drenaje y los índices de drenaje, IDr. Tales excesos superan no sólo los requerimientos de agua del cultivo, sino también las necesidades de lavado. Esto ilustra cómo la combinación de las características del sistema (sistema de turno fijo y baja frecuencia) y los

hábitos de los productores (estrategia habitual de programación de riego) se traduce en significativos excesos de riego que percolan en profundidad.

La productividad del agua (WP) real es de $17 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ y se considera baja para la potencialidad de los híbridos utilizados actualmente. La WP en la producción potencial es $25 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ y en la producción limitada por el agua $23 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$. Por su parte, la actual productividad del agua de riego (IWP) es muy baja, $4.5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$. La IWP en la producción potencial es de $27 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$ y en la producción limitada por el agua, $16 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$. Sencillos cambios en el manejo del riego por parte de los agricultores permitirían lograr relevantes incrementos en la WP e IWP, aún dentro de las restricciones que impone el turno fijo de entrega de agua. Tanto desde el punto de vista productivo como del uso del agua, para el maíz la siembra de diciembre es preferible a la de octubre.

Los máximos rendimientos de algodón ocurren en el escenario de producción potencial (Y_p). En los niveles de producción limitado por el agua (Y_{WL}) y real (Y_a) los rendimientos son, respectivamente, 800 kg y 2000 kg inferiores a Y_p . A su vez, entre Y_{WL} y Y_a , la diferencia es de 1200 kg, lo cual marca la subutilización del sistema de riego respecto a la disponibilidad de agua. Al igual que para el maíz, en la producción limitada por el agua, un riego extra permitiría lograr un importante incremento de la producción respecto de los rendimientos actuales.

Tomando la transpiración del escenario de producción potencial (Y_p) como 100%, la transpiración de la producción limitada por el agua (Y_{WL}) es un 87% de aquella y la del escenario real (Y_a), un 66%. También en el algodón las restricciones hídricas asociadas del manejo del riego afectan la transpiración y, como consecuencia, los rendimientos.

A diferencia del maíz, las láminas de riego son similares en todos los escenarios. A pesar de ello, las diferencias en el drenaje profundo son notables, ya que tanto en Y_{WL} como en Y_a hay considerable percolación, en comparación con Y_p . En el nivel de producción potencial, la necesidad de riego es 70 mm inferior en noviembre respecto de octubre.

La actual productividad del agua en algodón puede considerarse aceptable ($6.7 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$). La WP en la producción potencial es $8.5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ y en la producción limitada por el agua, de $7.6 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$. La actual productividad del agua de riego es muy baja ($1.5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$). La IWP en la producción potencial es $7.2 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$ y en la producción limitada por el agua, $4.3 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$. La combinación de los hábitos de riego de los agricultores con el régimen de lluvias conduce a un uso muy poco eficiente del agua de riego. Cambios en la estrategia de riego permitirían lograr importantes aumentos en la IWP.

Bibliografía

- Angella, G. 1999. *Study of Irrigation Performance in Representative Farms of the Río Dulce Project (PRD), Santiago del Estero, Argentina*. Master of Science Thesis. Wageningen Agricultural University. Irrigation and Water Engineering Group. Wageningen, Holanda.
- Angella, G. y D. Prieto. 2000a. Eficiencia de Riego en el Área de Riego del Río Dulce. Memorias del XVIII Congreso Nacional del Agua, ISBN 987-99083-4-1 (libro y CD ROM). Las Termas de Río Hondo, Santiago del Estero, Argentina, 12 al 16 de junio del 2000.
- Angella, G. y D. Prieto. 2000b. Efecto del Riego Sobre la Capa Freática. Memorias del XVIII Congreso Nacional del Agua ISBN 987-99083-4-1 (libro y CD ROM). Las Termas de Río Hondo, Santiago del Estero, Argentina, 12 al 16 de junio del 2000.
- Angella, G., D. Prieto, R. Salgado, J. Salvatierra, C. Wintten, A. Lozano Coronel, C. Sarria, R. Ybarra. La evaluación del desempeño de los sistemas de riego como una herramienta para la mejora de su gestión. XXIII Congreso Nacional del Agua. ISSN 1853-7685. Resistencia, Chaco, Argentina. 22 al 25 de junio de 2011.
- Angella, G.; D. Prieto, R. Salgado. 2011. Riego, eficiencias, pérdidas y reales posibilidades de mejorar el uso agrícola del agua. XXIII Congreso Nacional del Agua. Resistencia, Chaco, Argentina. ISSN 1853-7685. 22 al 25 de junio de 2011.
- Angella, G. y R. Salgado. 2013. Uso real y "teórico" del agua y su impacto en el funcionamiento de un distrito de riego. XXIV Congreso Nacional del Agua. San Juan, Argentina. ISSN Nº: 1853-7685. 14 al 18 de octubre de 2013.
- Ayers, R.S. and Westcot, D.W. 1985. *Water quality for agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 rev. 1, Rome, 174 pp.
- Angueira, C. y E. Zamora. 2007. Carta de suelos. Oeste del Área de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina. Ed. INTA. ISSN 1850 4086. Serie informes técnicos EEASE Nº40.
- Bessembinder, J.; A. Dhindwal; P. Laffelaar; T. Ponsioen and S. Singh. 2003. Analysis of crop growth. In: Dam, J. C., van and R. S. Malik (eds). 2003. *Water productivity of irrigated crops in Sirsa district, India*. Wageningen UR; Water Watch, Chaudhary Charan Singh Haryana Agricultural University and International Water Management Institute (IWMI).
- Bird, J.D. and Gillot, P.W. 1992. *A Quantitative Review of Adequacy and Equity Indicators for Irrigation System Distribution. Advances in Planning, Design and Management of Irrigation Systems as Related to Sustainable Land Use*. Vol. 3, pp. 901-914. J. Feyen, E. Mwendera y M. Badji (Eds)-Centre of Irrigation Engineering (CIE)-European Committee for Water Resources Management (ECOWARM). Belgium.
- Bos, M. G.; D. Murray-Rust; D. Merrey; H. Johnson; W. Snellen. 1994. Methodologies for Assessing Performance of Irrigation and Drainage Management. *Irrigation and Drainage Systems* 7:231-261. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Bos, M. G. y Nugteren, J. 1990. *On irrigation efficiencies*. ILRI Publication 1990 pp. 117 pp. ISBN 90-70260-875.
- Brim, G.; F. Velez; R. Ferreyra Lesye; M. Bartel. 2011. Proyecto de Desarrollo Agroindustrial y Riego del Sistema de Riego del Río Dulce (PRODAR). Componente 3, Catastro Productivo. Informe final. Santiago del Estero.
- Brim, G.; F. Velez; R. Ferreyra Lesye; M. Bartel. 2010. Proyecto de Desarrollo Agroindustrial y Riego del Sistema de Riego del Río Dulce (PRODAR). Componente 3, Catastro Productivo. Informe de avance. Santiago del Estero.
- Burt, C. M.; A. Clemmens; T. Strelkoff; K. Solomon; R. Bliesner; L. Hardy; T. Howell; D. Eisenhauer. 1997. Irrigation Performance Measures: Efficiency and Uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 123, Nº 6, November/December, pp. 423-442.

- Clemmens, A. J. 1991. Irrigation Uniformity Relationships for Irrigation System Management. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 117, Nº 5, September-October, pp. 682-699.
- Clemmens, A.J. y D. Molden. 2007. Water uses and productivity of irrigation systems. *Irrig. Sci.*, 25: 247-261.
- Dam, J. C., van and R. S. Malik (eds). 2003. *Water productivity of irrigated crops in Sirsa district, India*. Wageningen UR; Water Watch, Chaudhary Charan Singh Haryana Agricultural University and International Water Management Institute (IWMI).
- Hoerberichs, A. 1996. *In search of water users' perspectives of irrigation performance: a participatory research approach*. Mimeo, International Irrigation Management Institute. Lahore.
- Israelsen O.; Criddle W.; Fuhriman D.; Hansen V. 1944. Water application efficiencies in irrigation. *Agr. Exp. Stn. Bull.* 311, Utah State Agr. College, 55 pp.
- Israelsen O. 1950. *Irrigation principles and practices*. Wiley, New York, p 471.
- Israelsen, O. and Hansen, V. 1962. *Irrigation Principles and Practices*. Third edition, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Jensen, M. 1993. Impacts of irrigation and drainage on the environment. In: 5th N.D. Gulhati Lecture, The Hague, The Netherlands. French and English. 8 September 1993, 26 pp.
- Jensen, M. 2007. Beyond irrigation efficiency. *Irrig Sci* (2007) 25:233–245.
- Jurriens, R. 1996. *Assessing Seasonal Irrigation Service Performance*. Working Papers on Irrigation Performance 3. International Food Policy Research Institute. Washington, D. C.
- Kassam, A.; D. Molden; E. Fereres and J. Doorenbos. 2007. Water productivity: science and practice-introduction. *Irrig. Sci.* (2007) 25:185:188.
- Lorite, I.; L. Mateos; E. Fereres. 2004. Evaluating irrigation performance in a Mediterranean environment I. Model and general assessment of an irrigation scheme. *Irrig Sci* (2004) 23: 77–84.
- Lorite, I.; M. García-Vila; M. Ruiz-Ramos; E. Fereres. 2013. AquaData and AquaGIS: Two computer utilities for temporal and spatial simulations of water-limited yield with AquaCrop. *Computers and Electronics in Agriculture* 96 (2013) 227–237.
- Maas, E.V. 1986. Salt tolerance of plants. *Appli. Agric. Res.* 1: 12-26.
- Maas, E.V. & Hoffman, G.J. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. *J. Irrig. and Drainage Div., ASCE* 103 (IR2): 115-134.
- Malano, H. y M. Burton. 2001. Guidelines for benchmarking performance in the irrigation and drainage sector. IPTRID Secretariat. FAO, Rome.
- Mateos, L. 2008. Identifying a new paradigm for assessing irrigation system Performance. *Irrig Sci* (2008) 27:25–34.
- Molden, D. J.; R. Sakthivadivel; C. Perry; C. de Fraiture; W. Kloezen. 1998. *Indicators for Comparing Performance of Irrigated Agricultural Systems*. Research Report 20. International Water Management Institute. Colombo, Sri Lanka.
- Molden, D.; H. Murray-Rust; R. Sakthivadivel and I. Makin. 2003. *A Water-productivity Framework for Understanding and Action*. En: *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement* (eds. J.W. Kijne, R. Barker and D. Molden). 1-18. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.
- Molden, D.; T. Oweis; P. Steduto; P. Bindraban; M. Hanjra; J. Kijne. 2010. Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agricultural Water Management* 97 (2010) 528–535.
- Naroua, I.; L. Rodríguez Sinobas; R. Sánchez Calvo 2014. Water use efficiency and water productivity in the Spanish irrigation district "Río Adaja". *International Journal of Agricultural Policy and Research* Vol.2 (12), pp. 484-491.

- Pereira, L. S.; I. Cordery; I. Iacovides. 2012. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agricultural Water Management* 108 (2012) 39–51.
- Prieto, D.; R. Soppe. y G. Angella. 1994a. Eficiencia de Uso del Agua de Riego en el Proyecto del Río Dulce, Santiago del Estero. Parte I: La Eficiencia Global del Proyecto". Primeras Jornadas Provinciales de Riego, p. 13-18; Santiago del Estero, Argentina, 7 y 8 de julio de 1994.
- Prieto, D.; G. Angella y J. van der Eijk. 1994b. Eficiencia de Uso del Agua en Proyecto del Río Dulce. Parte II: Eficiencia de Distribución en el Canal Terciario CT3. La Experiencia de la Participación de los Usuarios. Primeras Jornadas Provinciales de Riego, p. 19-22; Santiago del Estero, Argentina, 7 y 8 de julio de 1994.
- Prieto, D.; J. van der Eijk y G. Angella. 1994c. Eficiencia de Uso del Agua de Riego en el Proyecto del Río Dulce, Santiago del Estero. Parte III: Eficiencia y Uniformidad de Aplicación. Primeras Jornadas Provinciales de Riego, pg.23-30; Santiago del Estero, Argentina, 7 y 8 de julio de 1994.
- Prieto, D.; J. van der Eijk y G. Angella. 1994d. Eficiencia de Uso de Agua en el Proyecto del Río Dulce. Parte IV: Determinación de las Eficiencias Metas u Objetivos. Primeras Jornadas Provinciales de Riego, pg. 31-38; Santiago del Estero, Argentina, 7 y 8 de julio de 1994.
- Prieto, D. 2006. *Modernization and the Evolution of Irrigation Practices in the Río Dulce Irrigation Project. Una Tarea de Todos*. Tesis Doctoral, Wageningen Agricultural University, Holanda).
- Prieto, D. y G. Angella. 2007. *La Evaluación del Desempeño en la Modernización de la Gestión de los Sistemas de Riego*. En: *Taller Internacional: "Modernización de Riego y Usos de Tecnologías de la Información: síntesis de resultados*. Organizado por PROCISUR, IICA y CYTED. La Paz, Bolivia, Setiembre de 2007. Emilio Ruiz y Luis S. Pereyra (eds). PROCISUR/IICA, 2008. ISBN13: 978-92-9039-881-3.
- Prieto, D y G. Angella. 2008. *Investigando las prácticas de riego a nivel de unidades terciarias utilizando herramientas de la evaluación de desempeño*. Taller *Tecnologías de información y comunicación para la modernización de los sistemas de riego y valoración de riegos ancestrales*. Organizado por la Red de Riego del CYTED y la Red de Riego del PROCISUR. 11 al 14 de Noviembre de 2008, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
- Prieto, D.; G. Angella. 2010. *Uso de herramientas de la evaluación de desempeño en la investigación de las prácticas de riego en unidades terciarias del Sistema de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina*. Em: *Tecnologías para o Uso Sustentável da Água em Regadio*. Pereira L.S.; Victoria F.R.B.; Paredes P.; Garcia M.; Palacios E.; Torrecillas A. (eds). Edições Colibri e CEER, Lisboa, Portugal. Pp: 118-121. ISBN 978-989-689-016-2.
- Raes, D.; P. Steduto; T. C. Hsiao y E. Fereres. 2009. *AQUACROP Reference Manual*. AquaCrop Version 3.0. FAO, Land and Water Division. Rome, Italy. 153 pp.
- Rao, P. S. 1993. *Review of selected literature on indicators of irrigation performance*. IIMI Research Paper. Colombo, Sri Lanka.
- Romanella, C. 1971. Planificación del Riego en el Área del Proyecto de Riego del Río Dulce. AyEE de la Nación.
- Small, L. E. y M. Svendsen. 1992. A framework for assessing irrigation performance. *Irrigation and Drainage Systems* 4(4): 283-312. Revised edition as: Working Paper on Irrigation Performance 1. International Food Policy Research Institute, Washington DC.
- Storie, R. E. 1970. *Manual de evaluación de suelos*. México. UTEHA. 225 pp.
- Till, M.R. y Bos, M.G. 1985. "The Influence of Uniformity and Leaching on the Field Application Efficiency". *ICID Bulletin*, January, 1985, Vol. 34, Nº1 pp. 32-36.

- Vazifedoust M., Van Dam J.C., Feddes R.A., Feizi M. 2008. Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. *Agr. Water Manag.* 95(2):89–102.
- Vuren, G. van. 1992. *Irrigation efficiency coefficients: Anchors or quicksands?* In: Diemer, G. and Slabbers, J. (eds.) p. 97-104. *Irrigators and Engineers*, Thesis Publishers, Amsterdam.
- Walker, W. *Guidelines for Designing and Evaluating Surface Irrigation Systems*. 1989. FAO Irrigation and Drainage Paper 45. FAO, Rome.
- Wolters, W. 1992. *Influences on the Efficiency of Irrigation Water Use*. ILRI-Publication 51-International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen, The Netherlands.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES GENERALES

Capítulo 5

Conclusiones generales

- Se ha demostrado la capacidad del modelo AquaCrop para simular el comportamiento del cultivo de maíz bajo las condiciones climáticas de Santiago del Estero, Argentina. El modelo simuló adecuadamente el comportamiento de dos híbridos, en cuatro fechas de siembra y bajo condiciones de disponibilidad variable de agua, habiéndose calibrado y validado en tres grupos de experimentos de campo realizados entre 2007 y 2012. La mayoría de los parámetros conservadores del cultivo se mantuvieron sin cambios, lo cual es una condición importante para el éxito de la aplicación de AquaCrop, ya que reduce la respuesta principalmente a información sitio-específica.
- El análisis realizado del comportamiento de AquaCrop en las distintas localidades donde se ha validado hasta ahora, confirma la validez del modelo para simular la producción de maíz en muy diversos ambientes, algunos, como el de Santiago del Estero, muy distintos al lugar donde fue calibrado originalmente (Davis, California, EUA).
- En el caso del cultivo de algodón, AquaCrop simuló muy bien el comportamiento de dos cultivares bajo diversas condiciones de humedad del suelo en dos grupos de experimentos realizados entre 2010 y 2013. Se destaca la bondad de las simulaciones bajo un sistema de cultivo muy distinto (alta densidad de siembra e intenso uso de reguladores de crecimiento) al que se utilizó para la calibración y validación original del modelo. Se cambiaron algunos parámetros considerados conservadores a los fines de adaptarlos a las características de las variedades utilizadas en los experimentos, pero no se cambiaron aquellos asociados a la respuesta del cultivo al estrés hídrico, lo que indica la solidez de la formulación del modelo.
- Es destacable la simplicidad del modelo AquaCrop y su capacidad de adaptación a diferentes climas y manejos agronómicos; se considera que su horizonte de utilización es amplio en aspectos tales como: estimación de rendimientos, análisis de riesgos productivos por impacto de sequías, definición de estrategias de riego a nivel de finca para mejorar el uso del agua y como apoyo en la evaluación del desempeño de sistemas de riego.
- La presente tesis constituye el primer abordaje para estudiar, a escala de distrito, las brechas de rendimiento y de la productividad del agua de los cultivos de algodón y maíz en el Sistema de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina.
- Se determinó la brecha de rendimiento para maíz y algodón en el Distrito San Martín del Sistema de Riego del Río Dulce (SRRD), Santiago del Estero. Mediante el uso conjunto de los modelos AquaCrop y AguaGIS, relevamientos de campo y encuestas se cuantificaron las brechas entre rendimiento potencial y real, que fue de $5900 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en maíz y $2000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en algodón. También se cuantificó la brecha entre rendimiento potencial y el alcanzable (limitado por el régimen de riego del distrito) que se estimó en $1100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para maíz y $800 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para algodón. Se concluye que la ausencia habitual de abonado, en especial abonado nitrogenado, es un factor co-limitante, junto con el agua, que determina la brecha de rendimiento en el SRRD.

- En la situación de manejo actual se producen sustanciales excesos de riego, que superan no sólo los requerimientos de agua del cultivo, sino también las necesidades de lavado de sales.
- En maíz, la productividad del agua (WP) real es de $17 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ y se considera baja para la potencialidad de los híbridos utilizados actualmente. La WP en la producción potencial es $25 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ y en la producción limitada por el agua, $23 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$. Por su parte, la actual productividad del agua de riego (IWP) es muy baja, $4.5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$. La IWP en la producción potencial es $27 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$ y en la producción limitada por el agua, $16 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$. Sencillos cambios en el manejo del riego por parte de los agricultores permitirían lograr relevantes incrementos en la WP e IWP, aún dentro de las restricciones que impone el turno fijo de entrega de agua.
- La actual productividad del agua en algodón puede considerarse aceptable ($6.7 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$). La WP en la producción potencial es $8.5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ y en la producción limitada por el agua, $7.6 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$. La actual productividad del agua de riego es muy baja ($1.5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$). La IWP en la producción potencial es $7.2 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$ y en la producción limitada por el agua, $4.3 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}_{\text{IW}}^{-1}$. La combinación de los hábitos de riego de los agricultores con el régimen de lluvias conduce a un uso muy poco eficiente del agua de riego. Cambios en la estrategia de riego permitirían lograr importantes aumentos en la IWP.
- El destino del agua de riego que se aplica en exceso (su mayor o menor reúso) es una tarea pendiente de investigación en el SRRD, para así cuantificar a nivel hidrológico el uso del agua. Para ello, se requiere realizar investigación a nivel de sistema de riego y de cuenca y contar con mayor disponibilidad de información base, como por ejemplo datos de evolución en el tiempo y en el espacio de la profundidad de la capa freática.
- El desarrollo de esta tesis demuestra la utilidad de combinar la experimentación, los relevamientos de campo de productores y los modelos de simulación para estimar la brecha de rendimiento y caracterizar el uso del agua ante diversas opciones de manejo agronómico. Esta estrategia resulta particularmente apta cuando, como en el caso del SRRD la disponibilidad de información básica no es lo suficientemente adecuada.

ANEXO 1 - FIGURAS



Figura 1. Ubicación de Argentina en Sudamérica.



Figura 2. Ubicación de Santiago del Estero en Argentina.



Figura 3. Precipitación media anual en Santiago del Estero, Argentina (mm).

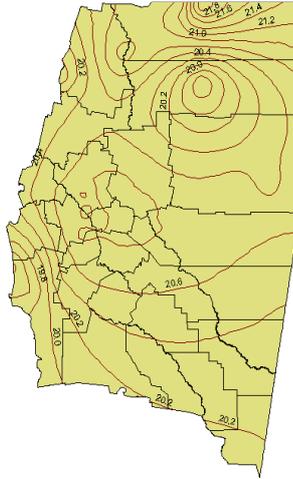


Figura 4. Temperatura media en Santiago del Estero ($^{\circ}\text{C}$)



Figura 5. ETo media anual en Santiago del Estero (mm).

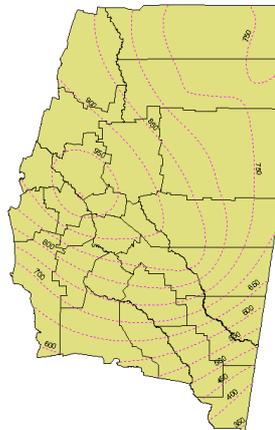


Figura 6. Déficit hídrico medio anual en Santiago del Estero (mm).

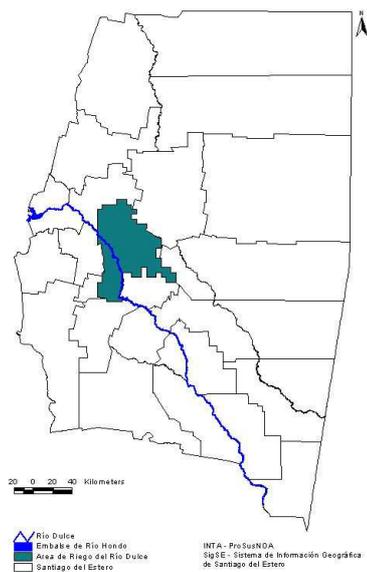


Figura 7. Área de Riego del Río Dulce - Sistema Los Quiroga (en verde).

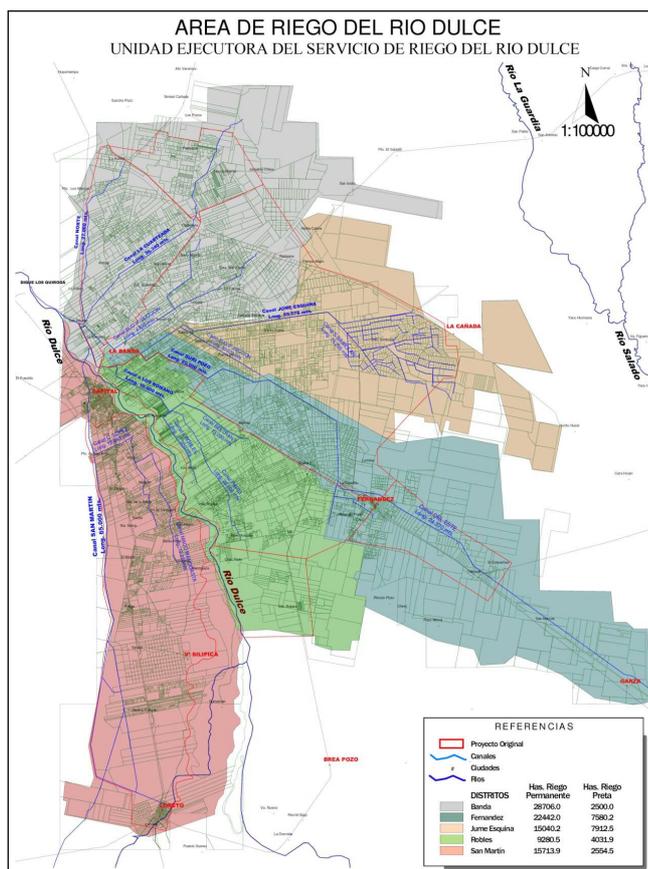


Figura 8. Distritos del Sistema de Riego del Río Dulce-Sistema Los Quiroga. Fuente: UER.

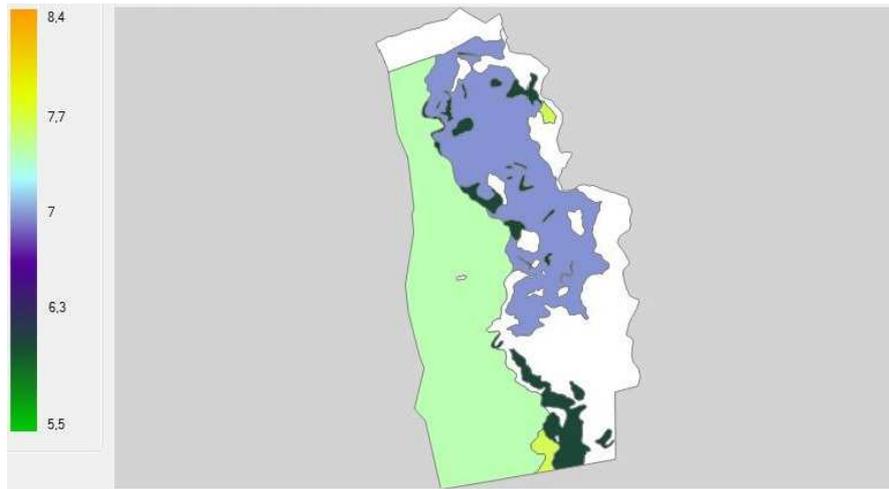


Figura 9. Rendimientos ($t.ha^{-1}$) de maíz en el nivel de producción Ya, fecha de siembra de octubre. Serie climática 1988-2013.

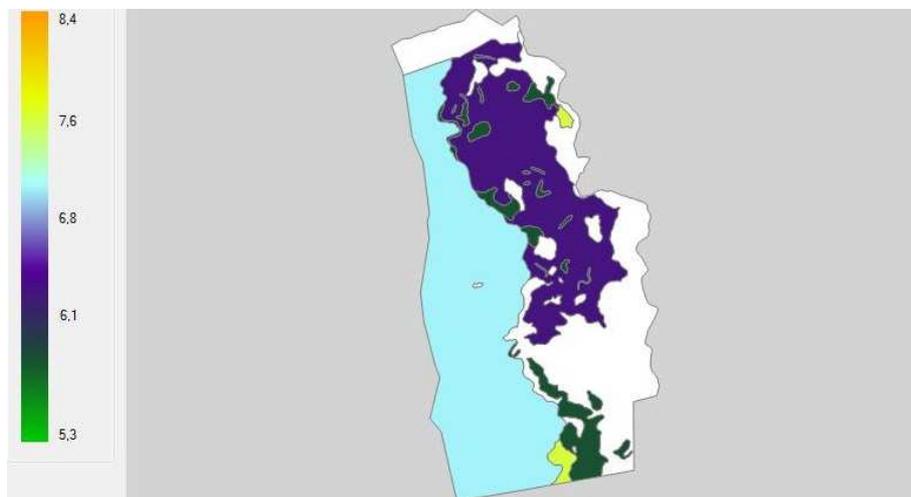


Figura 10. Rendimientos ($t.ha^{-1}$) de maíz en el nivel de producción Ya, fecha de siembra de diciembre. Serie climática 1988-2013.

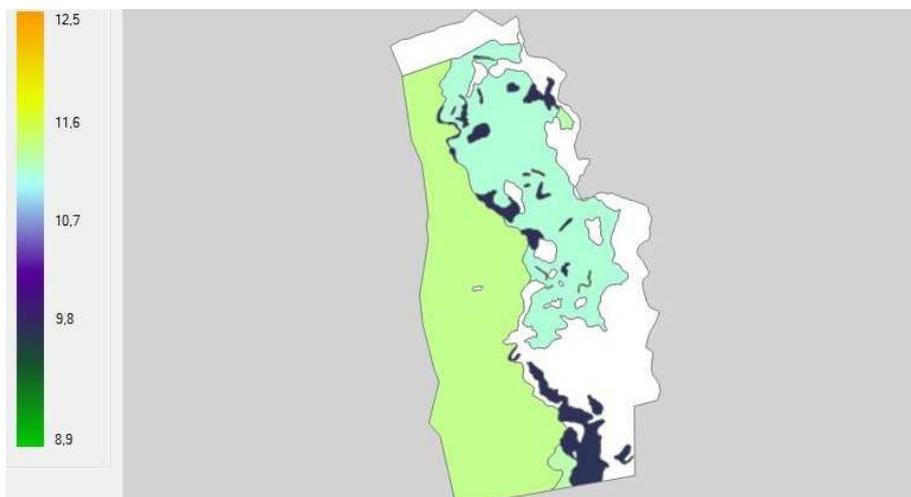


Figura 11. Rendimientos ($t.ha^{-1}$) de maíz en el nivel de producción Y_{wL} , fecha de siembra de octubre. Serie climática 1988-2013.

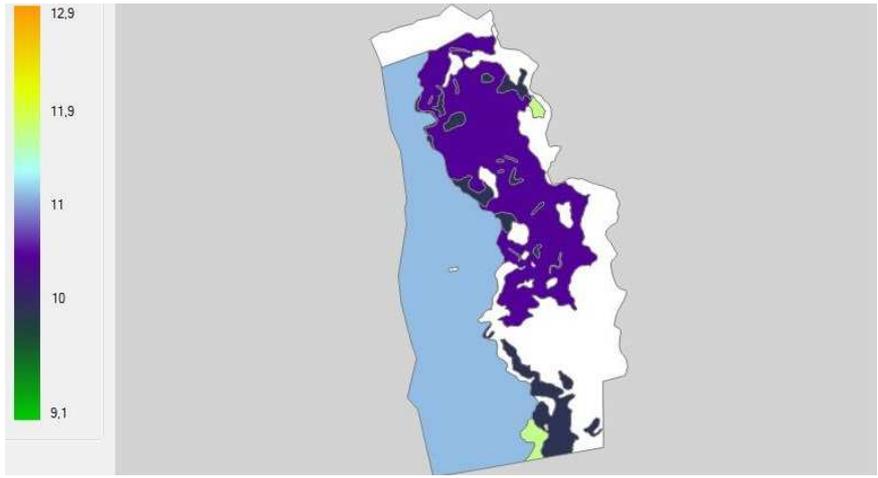


Figura 12. Rendimientos ($t.ha^{-1}$) de maíz en el nivel de producción Y_{wL} , fecha de siembra de diciembre. Serie climática 1988-2013.

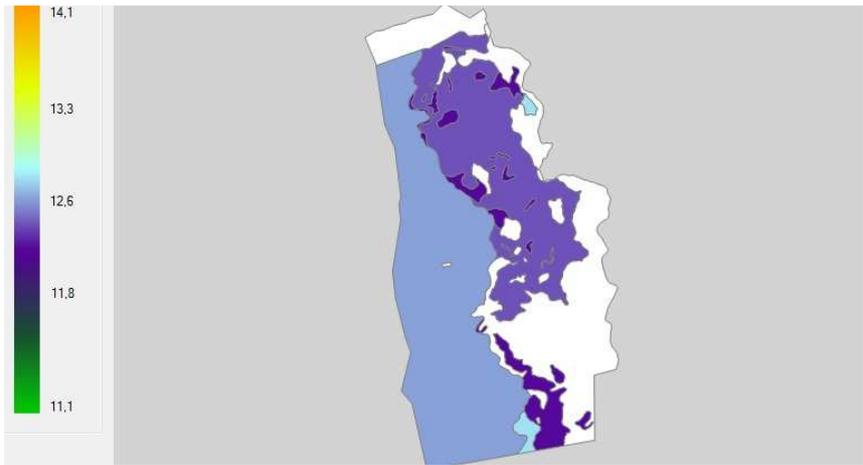


Figura 13. Rendimientos ($t.ha^{-1}$) de maíz en el nivel de producción Y_p , fecha de siembra de octubre. Serie climática 1988-2013.

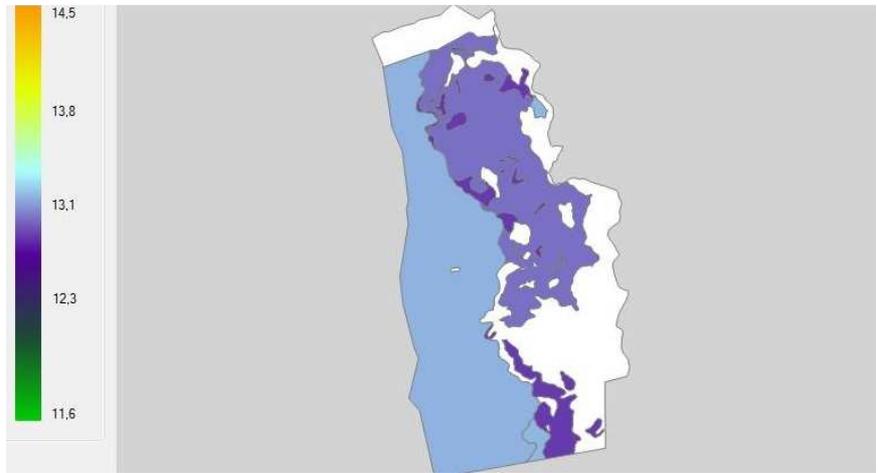


Figura 14. Rendimientos ($t.ha^{-1}$) de maíz en el nivel de producción Y_p , fecha de siembra de diciembre. Serie climática 1988-2013.

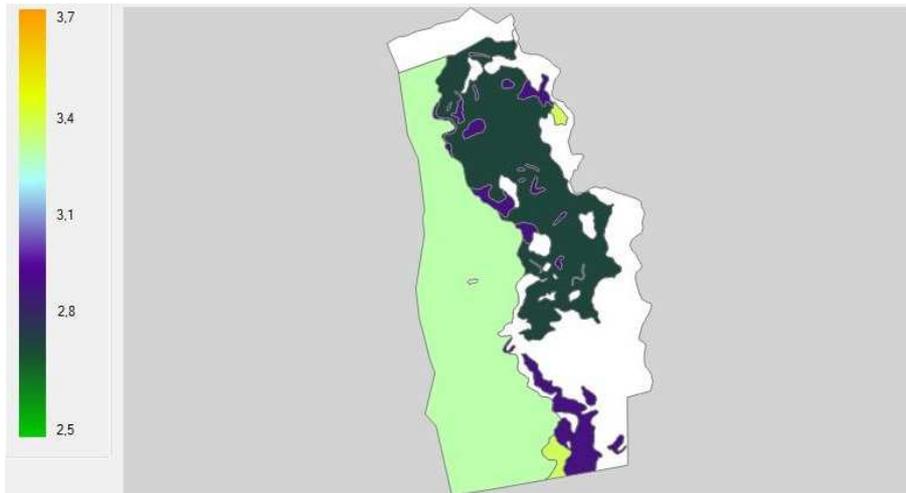


Figura 15. Rendimientos ($t.ha^{-1}$) de algodón en el nivel de producción Ya, fecha de siembra de octubre en el distrito San Martín. Serie climática 1988-2013.

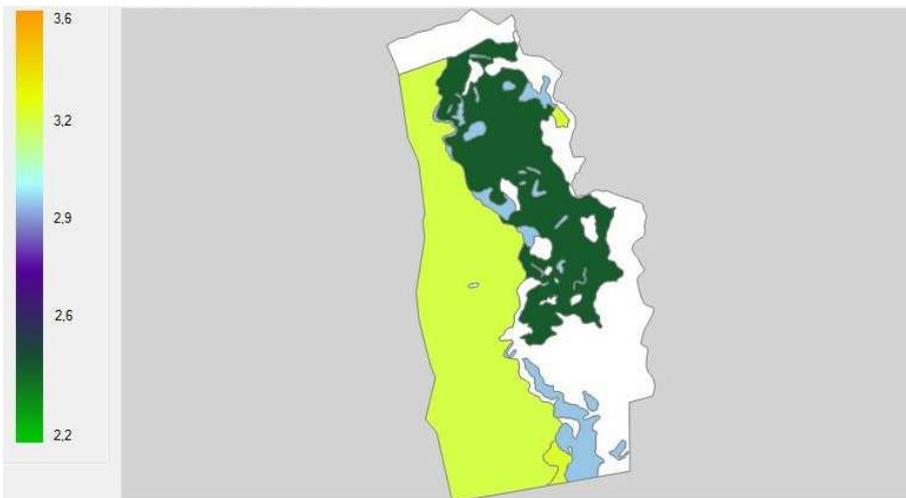


Figura 16. Rendimientos ($t.ha^{-1}$) de algodón en el nivel de producción Ya, fecha de siembra de noviembre en el distrito San Martín. Serie climática 1988-2013.

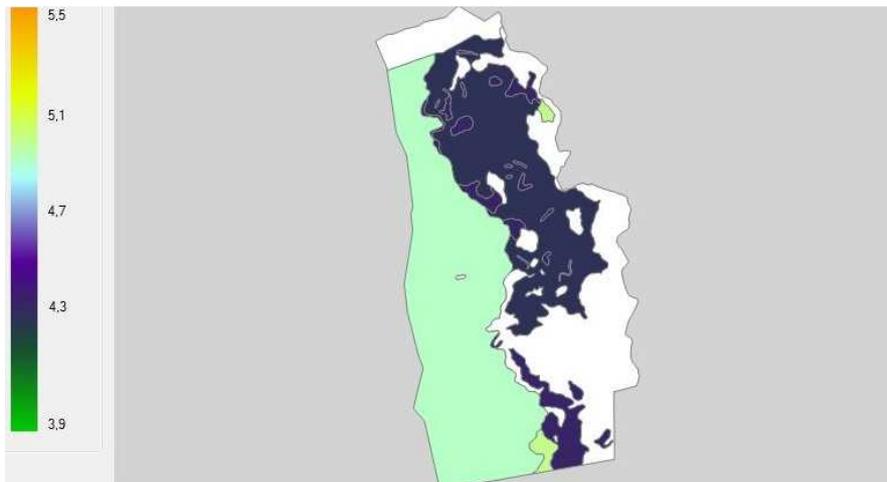


Figura 17. Rendimientos ($t.ha^{-1}$) de algodón en el nivel de producción Y_{wL} , fecha de siembra de octubre en el distrito San Martín. Serie climática 1988-2013.

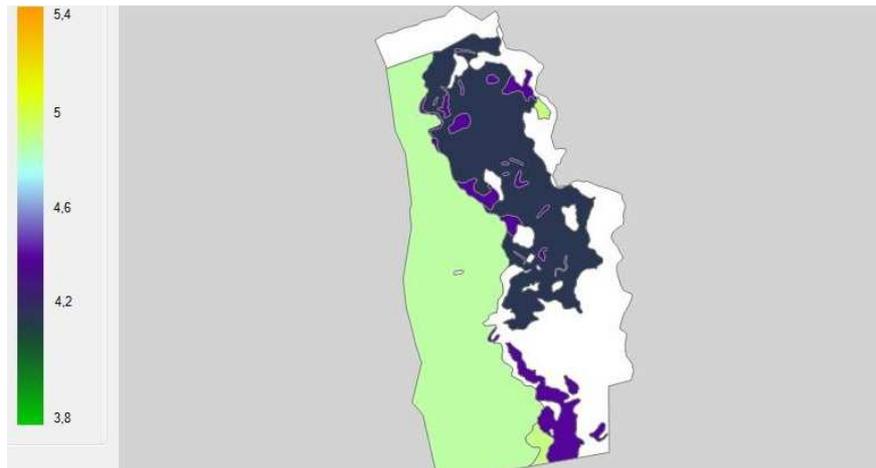


Figura 18. Rendimientos ($t.ha^{-1}$) de algodón en el nivel de producción Y_{WL} , fecha de siembra de noviembre en el distrito San Martín. Serie climática 1988-2013.

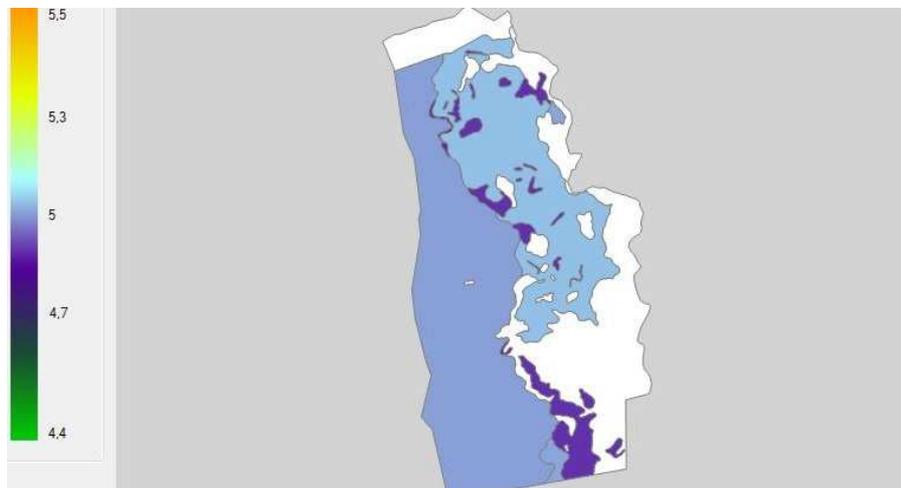


Figura 19. Rendimientos ($t.ha^{-1}$) de algodón en el nivel de producción Y_p , fecha de siembra de octubre en el distrito San Martín. Serie climática 1988-2013.

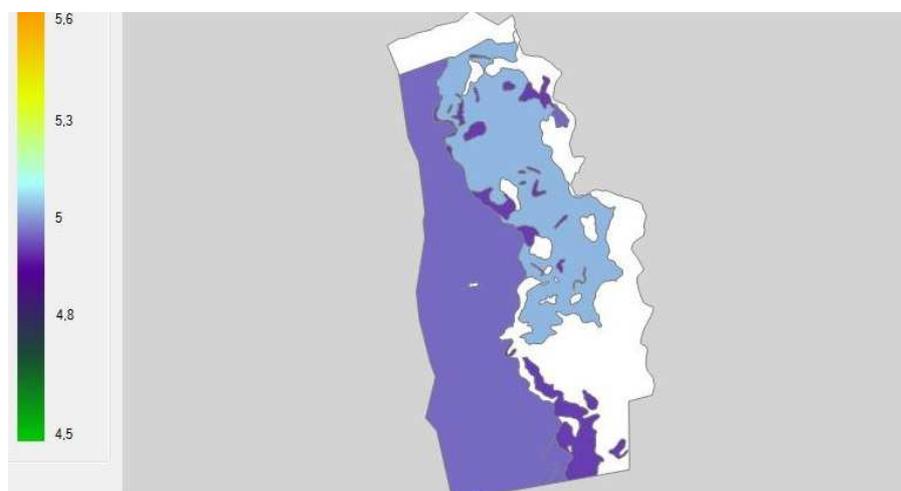


Figura 20. Rendimientos ($t.ha^{-1}$) de algodón en el nivel de producción Y_p , fecha de siembra de noviembre en el distrito San Martín. Serie climática 1988-2013.