

Estrategias para minimizar el consumo de agua del cultivo de arroz en Uruguay manteniendo su productividad

Ricchetto Sara¹, Capurro María Cristina², Roel Álvaro¹

¹ Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) Treinta y Tres. Ruta 8, Km 282 / Universidad de Illinois Urbana-Champaign. Correo electrónico: sararicchetto@gmail.com

² Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) La Estanzuela. Ruta 50, Km. 11, Colonia

Recibido: 2016-03-06 Aceptado: 2016-11-23

Resumen

El agua es un factor limitante para la expansión del cultivo de arroz en Uruguay. Durante las zafas 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013 se evaluaron diferentes alternativas de manejo del riego durante la etapa vegetativa del cultivo de arroz y su efecto sobre el rendimiento y el consumo de agua. El objetivo del estudio fue hacer un uso más eficiente del agua y aumentar su productividad. Se evaluaron tres alternativas de riego con inundación continua: inundados a los 15, 30 (testigo) y 45 días después de la emergencia (IC15, IC30 e IC45); y dos alternativas de riego controlado: lámina variable (LV) y riego restringido (RR). Los mayores rendimientos se registraron en los tratamientos IC15, IC30 y LV (10592, 10454 y 10189 kg ha⁻¹, respectivamente) seguidos por los tratamientos IC45 y RR (9653 y 9287 kg ha⁻¹, respectivamente). El menor consumo de agua de riego se obtuvo en el tratamiento RR (6568 m³ ha⁻¹). La productividad del agua de riego osciló entre 1,18 (IC45) y 1,46 kg m⁻³ (RR). Este estudio demuestra que hay estrategias de manejo del riego en arroz que pueden reducir significativamente los consumos de agua logrando una alta productividad de la misma. Sin embargo, los rendimientos obtenidos determinan la necesidad de profundizar los estudios en alternativas de riego controlado, de manera que las restricciones hídricas generadas no impliquen una disminución en la productividad del cultivo.

Palabras clave: productividad del agua, riego controlado, arroz

Strategies to Minimize Water Consumption while Maintaining Productivity in Uruguayan Rice Production

Summary

Water is a limiting factor for the expansion of rice crop in Uruguay. During the seasons 2010-2011, 2011-2012 and 2012-2013 the effect of different irrigation management alternatives during the vegetative stage of rice on yield and water use were evaluated. The objective of this study was to improve water use efficiency and increase crop water productivity. Three continuous flooding treatments: flooding 15, 30 (control) and 45 days after emergence (CF15, CF30 and CF45), and two controlled irrigation treatments: intermittent irrigation (II) and alternate wetting and drying (AWD) were evaluated. Higher yields were obtained in treatments CF15, CF30 and II (10592, 10454 y 10189 kg ha⁻¹, respectively), followed by CF45 and AWD (9653 y 9287 kg ha⁻¹, respectively). AWD treatment had the lowest irrigation water use (6568 m³ ha⁻¹). Mean irrigation water productivity ranged from 1.18 (CF45) to 1.46 kg m⁻³ (AWD). This study demonstrates that there are irrigation strategies that can significantly reduce irrigation water use while reaching high water productivity values. However, the yields obtained determine the need to deepen the studies in controlled irrigation alternatives, so that the water restrictions generated do not imply a decrease in crop productivity.

Keywords: water productivity, AWD, rice

Introducción

El agua dulce es un recurso cada día más escaso en el mundo. La pérdida de su calidad, así como la creciente competencia de los sectores urbano e industrial, determinan una marcada disminución de su disponibilidad. Si bien Uruguay es un país rico en recursos hídricos, tanto en calidad como en cantidad, hoy en día la expansión del cultivo de arroz se ve limitada por este recurso (Cantou y Roel, 2010). Ríos y represas constituyen la principal fuente de agua para riego de arroz en Uruguay, donde el 56 % del área regada requiere bombeo (levante eléctrico mayormente) (DIEA, 2014). La disponibilidad de agua para el riego del cultivo es un factor determinante para definir el área de siembra en cada zafra, y esto sumado al alto costo que implica la construcción de nuevas fuentes de captación de agua, así como también el alto costo de la energía para el bombeo, han hecho que el uso eficiente del agua y la optimización de su productividad se conviertan en un tema prioritario y estratégico para el sector arrocero. En este sentido, resulta cada vez más importante adoptar estrategias de manejo que contribuyan al uso racional de este recurso.

Desde la década de los 80 se han llevado a cabo diversos estudios en la Estación Experimental del Este (INIA Treinta y Tres) evaluando el manejo del agua del cultivo. Dichos estudios se dirigieron principalmente a evaluar el efecto del déficit hídrico en diferentes etapas fenológicas del cultivo sobre el rendimiento y la calidad industrial. En estos trabajos se determinó que el grado de impacto económico (dadas las pérdidas de rendimiento y calidad) depende del momento en que se produzca el déficit hídrico. Los mayores daños asociados a la restricción hídrica se registraron en las etapas reproductivas tempranas (primordio a floración y floración a grano lechoso) (Blanco, 1987). Posterior-

mente se realizaron trabajos similares que se enfocaron no solamente en el impacto sobre el rendimiento del cultivo sino también en su efecto sobre el consumo (Roel, 1998, 1999) y productividad del agua (Cantou y Roel, 2010).

De la información generada anteriormente se puede concluir que en la fase vegetativa habría cierto margen para ajustar el manejo de agua tradicional (baño-inundación), sin afectar el rendimiento, reduciendo el consumo de agua y por ende aumentando la productividad de la misma (kg m^{-3}). El presente trabajo se enmarca en el concepto anterior y tiene como objetivo evaluar manejos alternativos del agua que permitan aumentar la productividad del agua, haciendo un uso más eficiente del recurso.

Materiales y métodos

Descripción del sitio experimental

El trabajo se llevó a cabo durante las zafas 2010-2011 (Zafra 1), 2011-2012 (Zafra 2) y 2012-2013 (Zafra 3) en la Unidad Experimental Paso de la Laguna (UEPL), ubicada en el departamento de Treinta y Tres a $33^{\circ}16' \text{ S}$ y $54^{\circ}10' \text{ O}$ a 25 metros sobre el nivel del mar. Los experimentos se instalaron sobre Brunosoles subéutricos típicos de textura franca. Estos suelos pertenecen a la unidad «La Charqueada» de la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (escala 1:1000000) (Altamirano et al., 1976). Los parámetros del análisis físico-químico de los suelos se detallan en el Cuadro 1.

La capacidad de almacenaje de agua disponible (CAAD) para este suelo se determinó mediante la diferencia entre la humedad volumétrica a capacidad de campo (CC) y la humedad volumétrica en el punto de marchitez permanente (PMP). La CC y PMP se obtuvieron de la curva de

Cuadro 1. Análisis químico y textura de los suelos en las tres zafas evaluadas.

Parámetro del suelo	Zafra 1	Zafra 2	Zafra 3
pH (agua)	6,0	5,5	6,3
Materia Orgánica (%)	2,2	1,9	2,3
Fósforo - Bray I (ppm)	5,0	5,0	2,2
Fósforo – Ácido Cítrico (ppm)	4,0	5,0	11,8
Potasio Intercambiable (meq.K/100g)	0,11	0,18	0,16
Textura			
Arena (%)	25	33	33
Limo (%)	48	38	38
Arcilla (%)	27	29	29

tensión-humedad de este suelo, la cual fue previamente caracterizada utilizando el método de Olla de Richards (Richards, 1948).

Manejo del cultivo

El estudio se realizó en la variedad de arroz (*Oryza sativa*) El Paso 144, de tipo índica, principal variedad sembrada en el país (DIEA, 2014). Los ensayos se sembraron el 8, 22 y 19 de octubre en las zafras 1, 2 y 3, respectivamente. La siembra se realizó mediante siembra directa con una sembradora comercial (Semeato) de 13 líneas, estableciendo una distancia entre hileras de 0,17 m. La densidad difirió entre las zafras de acuerdo al peso de mil semillas y el porcentaje de germinación, de manera de asegurar una población objetivo de 490 semillas viables m^{-2} .

El manejo de la fertilización del cultivo consistió en una aplicación basal de nitrógeno (16 kg ha^{-1} de N), fósforo (66 kg ha^{-1} de P_2O_5) y potasio (18 kg ha^{-1} de K_2O) a la siembra y dos aplicaciones de nitrógeno en cobertura en las etapas de macollaje previo a la inundación y primordio ($12,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de nitrógeno en cada una). El control de malezas varió entre zafras de acuerdo a su grado de incidencia. En caso que hubiera escape de malezas las mismas fueron controladas manualmente. En cuanto al manejo de enfermedades y plagas, no fue necesario realizar aplicaciones de fitosanitarios para su control.

Caracterización climática

Los datos climáticos de cada zafra se obtuvieron de los registros de la estación meteorológica de la UEPL, ubicada a 200 m de los experimentos.

Determinación de consumo de agua y contenido de agua en el suelo

El volumen de agua utilizado se determinó mediante el uso de caudalímetros de hélice (ARAD, WMR), instalados a la entrada de cada parcela para permitir el manejo independiente del riego en cada una de ellas y las mediciones de agua correspondientes.

El contenido de humedad en el suelo se determinó en el tratamiento RR y en el tratamiento IC45. Los métodos utilizados fueron el gravimétrico, con medidas semanales a una profundidad de 0-15 y 15-30 cm, y mediante sondas de capacitancia FDR (Decagon Devices, EC-5) con medidas continuas, instalados a una profundidad de 0-10 cm.

Determinación de parámetros del cultivo

En cada zafra, la cosecha se realizó manualmente una vez que el cultivo presentó porcentajes de verde promedio inferiores a 8 %. El área cosechada en cada parcela para determinar el rendimiento fue de $6,12 \text{ m}^2$, dejando al menos cuatro hileras y 50 cm de borde. Una vez cosechadas las parcelas se hizo la trilla mecánica y se midió el porcentaje de humedad de las muestras para determinar el rendimiento seco (corregido a 14 % de humedad).

Para determinar los componentes del rendimiento se cosecharon dos muestras adicionales de 0,60 cm lineales cada una para determinar panojas/ m^2 , n° granos totales/panoja, n° granos llenos/panoja, n° granos chuzos/panoja y peso de mil granos (PMG).

Para caracterizar la fenología se determinó la cantidad de días desde la emergencia a primordio floral y cantidad de días de emergencia a 50 % de floración. En cada tratamiento se determinó el período de riego, considerado desde el inicio del tratamiento de riego hasta fin de riego.

Determinación de productividad del agua de riego y productividad total del agua

La productividad del agua de riego (kg m^{-3}) se determinó mediante la relación entre el rendimiento de arroz seco obtenido (kg) y el volumen de agua total utilizado en los riegos (m^3). Para el cálculo de la productividad del agua total (kg m^{-3}) se tomó el aporte total (volumen de agua de riego y volumen de agua proveniente de las precipitaciones).

Diseño experimental y descripción de los tratamientos

El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar, con cuatro repeticiones. Se realizaron cinco tratamientos de riego agrupados en dos sistemas de riego: inundación continua y riego controlado.

Inundación continua

IC15: se estableció la lámina de agua 15 días después de la emergencia del cultivo.

IC30 (Testigo): se estableció la lámina de agua 30 días después de la emergencia del cultivo.

IC45: se estableció la lámina de agua 45 días después de la emergencia del cultivo.

Riego controlado

LV: se estableció una lámina de agua de 5 cm de profundidad y se dejó resumir hasta suelo saturado, momento en el cual se restableció la lámina de agua.

RR: el criterio de riego en este tratamiento consistió en permitir un porcentaje de agotamiento del 50 % del agua disponible del suelo en los primeros 30 cm de profundidad (25 mm de agua para esta profundidad), determinado mediante balance hídrico. Para el balance hídrico se tomaron como entradas las precipitaciones y la variación del almacenaje de agua disponible en el suelo. Como salida se tomó la evapotranspiración del cultivo, la cual se estimó utilizando la ecuación Penman-Monteith de la FAO N° 56 (Allen et al., 1998), utilizando los valores de coeficiente del cultivo de la FAO (kc) (Allen et al., 1998). Una vez alcanzado este porcentaje de agotamiento se regó nuevamente hasta alcanzar la condición de suelo saturado (encharcado). De esta manera se alternaron períodos de suelo seco y húmedo.

Los tratamientos de inundación continua difirieron en el momento en que se estableció la inundación permanente. Una vez establecida esta, el criterio de riego utilizado fue el mismo para todos los tratamientos y consistió en mantener una lámina de agua continua de 10 cm de profundidad, a excepción del tratamiento inundado a los 15 días después de la emergencia, en que se manejó una lámina de 5 cm de altura durante la primera semana luego de establecida la inundación (dado por el tamaño de las plantas-estado de 3-4 hojas).

Los tratamientos de riego controlado se aplicaron durante el período vegetativo del cultivo, a partir de los 30 días después de la emergencia hasta primordio floral, momento a partir del cual se estableció la inundación permanente.

Siempre que fue necesario, se realizaron baños de manera de cubrir los requerimientos de agua del cultivo durante la etapa previa al inicio de los tratamientos de riego. El criterio de finalización del riego para todos los tratamientos consistió en discontinuar los riegos 15 días después de alcanzar el 50 % de floración.

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizó un modelo lineal mixto en SAS® (SAS Institute Inc., 2004) utilizando el procedimiento PROC MIXED. Los tratamientos y la zafra se consideraron efectos fijos, así como también sus interacciones. Los bloques y sus interacciones se consideraron como efectos aleatorios. Se estableció un nivel de significancia $p < 0,05$.

Resultados y discusión

Caracterización climática de las tres zafras

Las tres zafras evaluadas presentaron condiciones climáticas diferentes, dadas principalmente por las variaciones en el régimen hídrico (Cuadro 2).

La zafra 1 presentó la mayor demanda atmosférica durante el período emergencia-fin del riego, estimada a través del tanque A (Allen et al., 1998). Durante este período se registraron 349 mm de precipitaciones promedio de todos los tratamientos. Aproximadamente el 30 % de las precipitaciones se registraron en la etapa previa al comienzo de los tratamientos de riego.

Cuadro 2. Precipitaciones (pp) y evaporación del Tanque A (TA) para los diferentes tratamientos de riego en las zafras 1, 2 y 3.

	Zafra 1			Zafra 2			Zafra 3		
	pp total* (mm)	pp em- inicio trat (mm)	TA* (mm)	pp total* (mm)	pp em- inicio trat (mm)	TA* (mm)	pp total* (mm)	pp em-o inicio trat (mm)	TA* (mm)
IC 15	287	83	843	233	12	777	335	15	732
IC 30	364	95	907	267	54	807	446	32	781
IC 45	364	129	981	278	133	830	446	137	812
LV	364	95	981	278	54	807	446	32	788
RR	364	95	981	278	54	830	446	32	796
Prom	349	99	938	267	62	810	424	50	782

*Período desde la emergencia hasta la finalización del riego.

La segunda zafra registró el menor volumen de precipitaciones durante todo el ciclo (267 mm), con precipitaciones durante la etapa previa al inicio de los tratamientos que alcanzaron los 62 mm.

La tercera zafra se caracterizó por ser la más lluviosa, registrando 424 mm durante todo el ciclo del cultivo. El 88 % de las precipitaciones se dio una vez que comenzaron los tratamientos de riego, presentando un período más seco previo al inicio de los tratamientos de riego (50 mm). El mayor registro de precipitaciones durante esta zafra se vio acompañado de una menor demanda atmosférica (TA), siendo esta la menor en las tres zafras.

La primera zafra presentó condiciones climáticas que le permitieron desarrollar un mayor potencial de rendimiento. En esta zafra se dio la mayor tasa de evaporación (estimada a través del tanque A) durante todo el ciclo. Además hubo una etapa previa al inicio de los tratamientos de riego donde el agua no fue limitante, mientras que las precipitaciones en la etapa donde el cultivo se encuentra inundado no fueron excesivas.

Efecto de los tratamientos sobre la fenología

En acuerdo con Borre, Garside y Fukai (1997), el método de riego tiene un considerable impacto en la fenología del cultivo. El Cuadro 3 muestra la duración promedio de las etapas fenológicas del cultivo, para cada tratamiento.

Tanto el largo total del ciclo como la duración de las etapas fenológicas del cultivo se vieron afectados por los tratamientos de riego.

La etapa de emergencia-primordio fue la más afectada por los tratamientos de riego. El tratamiento de inundación más temprana (IC15) produjo un desarrollo del cultivo más acelerado que el resto de los tratamientos,

donde esta etapa se alcanza siete días antes con respecto al testigo IC30. Esta diferencia se mantiene relativamente constante durante todo el ciclo del cultivo. Estos resultados concuerdan con los encontrados por Cantou et al. (2008, 2009), quienes determinaron que el manejo del riego tiene un efecto significativo en la fenología del cultivo.

Los tratamientos con mayores deficiencias hídricas (IC45 y RR), en cambio, tendieron a presentar un período emergencia-primordio y primordio-floración superior al promedio, resultando en un mayor largo de ciclo para estos tratamientos.

Si bien el establecimiento de la inundación para el tratamiento IC15 presentó el mayor período de riego (88), este incremento del período de riego no fue proporcional a los días de anticipación de la inundación (15 días con respecto al testigo), ya que fue compensado por un menor largo de ciclo.

Efecto de los tratamientos sobre el rendimiento y sus componentes

El rendimiento promedio del ensayo en las tres zafas evaluadas fue de 10035 kg ha⁻¹, siendo significativamente diferente entre zafas ($P < 0,05$) reportando valores de 10783 (a), 10090 (b) y 9232 (c) kg ha⁻¹ en las zafas 1, 2 y 3, respectivamente. Los tratamientos de riego analizados afectaron significativamente el rendimiento, no siendo significativa la interacción zafra*tratamiento (Cuadro 4).

Los tratamientos IC15 (10592 kg ha⁻¹) e IC30 (10454 kg ha⁻¹) lograron obtener los mayores rendimientos. Esto concuerda con los trabajos de Blanco y Roel (1993, 1996), los cuales reportan un aumento de la productividad del

Cuadro 3. Duración de las etapas fenológicas y período de riego para cada tratamiento, promedio de los tres años.

Tratamiento	Días emergencia-primordio	Días primordio-50 % floración	Días emergencia-50 % floración	Total de ciclo*	Período de riego**
IC 15	49	39	88	132	88
IC 30	56	40	96	144	81
IC 45	66	37	103	151	72
LV	58	39	97	144	82
RR	68	31	99	150	84
Promedio	59	38	97	144	81

* Días desde emergencia a cosecha. ** Días desde comienzo de tratamiento de riego hasta fin de riego.

Cuadro 4. Rendimiento y sus componentes, promedio de las tres zafras.

Tratamiento	Rendimiento (kg/ha)	Panojas/m ²	Granos totales/panoja	Esterilidad (%)	Granos llenos/panoja	PMG (g)
Inundación continua						
IC 15	10592 a	493 b	122 ab	14,4 a	104 ab	26,7 ab
IC 30	10454 a	560 a	131 a	13,1 a	114 a	26,2 c
IC 45	9653 bc	447 b	126 a	11,6 ab	111 a	26,4 abc
Riego controlado						
LV	10189 ab	584 a	113 bc	12,8 a	99 bc	26,4 bc
RR	9287 c	484 b	101 c	9,7 b	92 c	26,8 a
Media	10035	514	118	12,3	104	26,5
CV (%)	7,0	14,7	13,2	26,5	14,1	1,9
p>F (trat)	0,0002	0,0003	0,0003	0,0238	0,0026	0,018
p>F (zafra)	0,0005	0,019	0,0019	0,1062	0,0042	<0,0001
p>F (zafra*trat)	ns	ns	ns	0,0087	ns	0,0015

* Letras diferentes difieren estadísticamente entre sí ($p < 0,05$)

arroz en la medida que se adelanta la inundación. En una posición intermedia se comportaron los tratamientos LV (10189 kg ha⁻¹) e IC45 (9653 kg ha⁻¹).

El tratamiento de riego más restrictivo (RR) obtuvo un rendimiento 11 % inferior al testigo. Esto concuerda con resultados obtenidos por Bouman y Tuong (2001), Bueno et al. (2010) y Sudhir-Yadav et al. (2011), quienes evaluaron tratamientos con alternancia de suelo seco y húmedo en comparación con tratamientos de inundación continua y obtuvieron reducciones del rendimiento de hasta 70 %.

Sin embargo, también existen numerosos estudios que han demostrado que no siempre se producen reducciones del rendimiento al aplicar un manejo del riego más restrictivo (Borrel et al., 1997; Gun Won et al., 2005; Rejesus et al., 2011; Yao et al., 2012; Avila et al., 2015).

La disparidad de los resultados que se encuentran en la bibliografía reflejan los diferentes grados de restricción hídrica aplicados. Mayores grados de restricción se asocian a mayores disminuciones en el rendimiento. En el caso del presente estudio, el rendimiento obtenido en el tratamiento RR puede reflejar que las asunciones referentes a la disponibilidad de agua en el suelo y/o a los criterios utilizados en los cálculos del balance hídrico para definir cuándo regar, determinaron condiciones de humedad del suelo excesivamente reducidas.

Por otro lado es sabido que la lámina de riego no solo cumple un papel asociado a la regulación del déficit hídri-

co sino que también contribuye a la termo-regulación con la que la planta opera (Roel et al., 2005), el control de malezas (Radosevich, 1997) y la disponibilidad de nutrientes (Goswami y Banerjee, 1978; Tuong, Bouman y Mortimer, 2005). El tratamiento RR que carece de lámina de agua durante la fase vegetativa junto con el tratamiento IC45, que presenta un período más largo hasta establecer la inundación permanente, tuvieron mayor dificultad en el control de malezas, siendo necesario un mayor control manual de las mismas. La lámina de agua sobre la superficie actúa como barrera física que previene la germinación y el subsecuente crecimiento de malezas al reducir el oxígeno disponible (Borrel, Garside y Fukai, 1997; Villa et al., 2006).

Los componentes de rendimiento asociados a los niveles de productividad descritos anteriormente, si bien tuvieron diferencias significativas asociadas a los manejos de riego, no tuvieron una relación clara y estable a lo largo de las zafras (interacción año x tratamiento significativa) que puedan explicar las diferencias productivas encontradas. Se evidencia de esta manera que ha existido una compensación entre los valores de los diferentes componentes de rendimiento en la expresión del mismo y que esta compensación ha cambiado en las diferentes zafras. De todas formas el manejo de riego RR, el cual presentó los menores rendimientos, estuvo asociado al menor número de panojas m⁻², granos totales y granos llenos por panoja, reflejando un menor número

Cuadro 5. Consumo ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) y productividad del agua (kg m^{-3}) promedio de las tres zafas.

Tratamiento	Aporte de agua total ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	Consumo total de agua de riego ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	Consumo de agua en baños ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	Productividad del agua de riego (kg m^{-3})	Productividad del agua total (kg m^{-3})
Inundación continua					
IC 15	11837 a	8969 a	420 c	1,25 bc	0,92 a
IC 30	12114 a	8492 ab	958 b	1,30 abc	0,88 ab
IC 45	12026 a	8374 ab	1564 a	1,18 c	0,81 b
Riego controlado					
LV	11544 a	7922 b	997 b	1,36 ab	0,90 a
RR	10220 b	6568 c	959 b	1,46 a	0,92 a
Media	11508	8044	980	1,31	0,89
CV (%)	8,1	11,6	16,8	12,9	10,4
p>F (Trat)	0,0002	<0,0001	<0,0001	0,0105	0,0427
p>F (zafra)	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0018	0,0330
p>F (zafra*trat)	0,0015	0,0022	<0,0001	0,0456	0,0247

* Letras diferentes difieren estadísticamente entre sí ($p < 0,05$).

de granos m^{-2} que no pudo ser compensado por el peso de mil granos.

Efecto de los tratamientos sobre el consumo y productividad del agua

En una situación donde el recurso hídrico pasa a ser cada vez más limitante tanto por cantidad como por competencia de otros rubros, es cada vez más relevante poder asociar los niveles de productividad obtenidos con los consumos de agua requeridos. En el Cuadro 5 se presentan los resultados del aporte de agua total (riego y precipitaciones), consumo total de agua de riego (baños y mantenimiento de lámina de agua), consumo de agua correspondiente a baños (baños previos al establecimiento de los tratamientos de riego), productividad del agua de riego y productividad del agua total, promedio de las tres zafas.

El aporte de agua total promedio de las tres zafas fue de $11508 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ de los cuales $8044 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ correspondieron al riego. Estas cifras coinciden con los valores reportados para estas condiciones donde se estima necesidades de agua (para manejos del riego convencionales -IC 30) entre 11000 a $14000 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ (ACA et al., 2009), ya que el aporte de las precipitaciones puede ser muy variable. Del consumo total del agua de riego el correspondiente a baños significó un 12 % ($980 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$). Los

tratamientos de inundación continua más temprana y más tardía son los que registraron las mayores diferencias en el volumen de agua utilizado en baños. Esto concuerda con los valores reportados por Roel (1999), quien estimó un volumen de agua promedio para baños de $372 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ y $1753 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ para los tratamientos IC15 e IC45 respectivamente.

La productividad del agua de riego promedio de las tres zafas fue de $1,31 \text{ kg m}^{-3}$ y la productividad del agua total fue de $0,89 \text{ kg m}^{-3}$, la cual se ubica dentro de los valores reportados para estas condiciones (Cantou y Roel, 2010). Estos valores de productividad del agua a su vez se ubican en los rangos de valores más altos reportados a nivel internacional. Valores típicos de productividad del agua en ensayos experimentales son de $0,2$ - $0,4 \text{ kg m}^{-3}$ en el centro y norte de India, $0,3$ - $1,1 \text{ kg m}^{-3}$ (Bouman y Tuong, 2001) y $0,5$ - $1,34 \text{ kg m}^{-3}$ (Lampayan et al., 2013) en Filipinas y $0,82$ - $2,32 \text{ kg m}^{-3}$ en China (Hong et al., 2000).

En términos generales se constató que los valores de consumo y productividad del agua fueron afectados significativamente por los tratamientos de riego evaluados y por la zafra. A su vez esta afectación fue diferente entre zafas (interacción zafra x tratamiento). Dado que la interacción zafra por tratamiento fue significativa, tomando en cuenta solamente el volumen de agua que es manejable (riego) y dejando de lado el aporte de las precipitaciones que puede

Cuadro 6. Consumo ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) y productividad (kg m^{-3}) del agua de riego para las zafras 1, 2 y 3.

Tratamiento	Consumo de agua de riego ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)			Productividad del agua de riego (kg m^{-3})		
	Zafra 1	Zafra 2	Zafra 3	Zafra 1	Zafra 2	Zafra 3
Inundación continua						
IC 15	11854 a	8686 a	6367 ab	0,95 b	1,31 a	1,50 ab
IC 30	11261 ab	8001 ab	6212 ab	1,00 b	1,32 a	1,59 a
IC 45	8981 c	9367 a	6778 a	1,18 ab	1,06 a	1,29 b
Riego controlado						
LV	10279 bc	8024 ab	5464 ab	1,06 b	1,29 a	1,74 a
RR	7411 d	6913 b	5380 b	1,41 a	1,27 a	1,72 a
Media	9957 a	8198 b	6040 c	1,12 b	1,25 b	1,57 a

* Letras diferentes difieren estadísticamente entre sí ($p < 0,05$)

ser errático y no controlable, se presentan los valores correspondientes a estas variables en cada una de las tres zafras (Cuadro 6).

El valor máximo de consumo de agua se registró en la primera zafra ($9957 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$), coincidentemente con los mayores valores acumulados de evaporación (938 mm, Cuadro 2) y un aporte acumulado de las precipitaciones intermedio (349 mm, Cuadro 2). En el otro extremo los valores mínimos de consumo de agua de riego se registraron en la zafra 3 de $6040 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$, coincidiendo con los mayores aportes de precipitación en la zafra (Cuadro 2). Los valores de productividad del agua de riego promedio en cada zafra registraron un comportamiento inverso al consumo del agua, siendo esta mayor en la zafra con mayor aporte de precipitaciones y menor consumo de agua. A su vez esto determinó que en términos relativos la disminución del consumo de agua fuera mayor que la disminución de rendimiento, lo que resulta por ende en un mayor valor de productividad del agua.

La existencia de una interacción significativa del efecto de los tratamientos con la zafra, tanto en consumo como productividad del agua de riego, determina la no existencia generalizada de un patrón de comportamientos a lo largo de las tres zafras. No obstante esto, se pueden visualizar algunas tendencias.

El tratamiento IC45 presenta valores elevados de consumo de agua de riego en las zafras 2 y 3 fundamentalmente debido al componente baños. Contrariamente, IC45 en la zafra 1 fue uno de los tratamientos con menor consumo de agua dado el aporte de las precipitaciones recibidas durante esta etapa del ciclo del cultivo (Cuadro 2). Esto demuestra que si bien el atraso en el momento de inundación de este

tratamiento representó un menor largo del período de riego comparado con el testigo (72 vs 81, Cuadro 3), esto no conlleva necesariamente un menor consumo de agua.

Avila et al. (2015), en Rio Grande, Brasil, llevaron a cabo un estudio muy similar al presente donde cuantificaron las pérdidas de agua de diferentes tratamientos de riego en arroz, y entre estos un tratamiento muy similar al LV. Este estudio reporta para este tratamiento reducciones en el volumen de agua utilizado entre 22 y 76 %, difiriendo entre zafras según el aumento en la capacidad de captar excesos de agua proveniente de las precipitaciones en comparación con tratamientos de inundación continua.

En este estudio, el tratamiento LV no logró reducir ni aumentar significativamente el volumen de agua de riego utilizado por el cultivo en comparación con el tratamiento testigo IC30. El tratamiento de riego RR fue el que presentó los menores niveles de consumo de agua de riego y los mayores niveles de productividad del agua. En las tres zafras evaluadas el menor consumo de agua de riego se registró en este tratamiento, siendo 34, 14 y 13 % inferior al testigo (IC30) para las zafras 1, 2 y 3, respectivamente. Estos resultados coinciden con los reportados por Borrell, Garside y Fukai (1997), Tabbal et al. (2002), Gun Won et al. (2005), Sudhir-Yadav et al. (2011), Yao et al. (2012), Lampayan et al. (2013), quienes mencionan reducciones del 13-54 % en la cantidad de agua aplicada en estos sistemas. Reducciones en el volumen de agua utilizado en tratamientos de riego controlado son explicadas además por menores pérdidas por filtración y percolación (Bouman y Tuong, 2001; Cabangon et al., 2004; Sudhir-Yadav et al., 2011)

y la menor evaporación de la lámina de agua (Bueno et al., 2010).

Sumados a las reducciones en el consumo de agua de riego, tratamientos que alternan períodos de suelo seco y húmedo cuentan con la potencialidad de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Yagi et al., 1996; Towprayoon, Smakgahn y Poonkaew, 2005; Minamikawa y Sakai, 2006; Shiratori et al., 2007). Paralelamente al presente estudio se llevó a cabo un experimento donde se cuantificaron las emisiones de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) en los tratamientos RR e IC30. Los resultados demostraron que el tratamiento RR fue eficaz en reducir significativamente las emisiones de GEI y por tanto el potencial de calentamiento global (PCG). EL PCG en el tratamiento RR, medido en kg CO_2 equivalente, fue casi un 50 % inferior comparado al testigo IC30 (Capurro et al., 2015).

Los tratamientos IC45, LV y RR, si bien tienen una mayor dependencia de las precipitaciones, logran un mejor aprovechamiento de las mismas. En el caso del IC45 las precipitaciones ocurridas en el período no inundado determinan las necesidades de baño; en el caso de LV cualquier aporte de precipitaciones una vez establecida la lámina de riego significa una reducción en la necesidad de regar, y en el caso de RR la dinámica del riego está basada en un balance hídrico que tiene como entrada las precipitaciones.

Si se consideran de forma simultánea la productividad del cultivo, el consumo de agua de riego y la productividad de la misma (Cuadros 5 y 6), el manejo de riego LV es el que contempla de mejor forma este triple balance. El tratamiento LV presentó valores de rendimiento similares al testigo (Cuadro 4), logró mantener niveles de consumo de agua de riego y valores de productividad de agua también similares, y cuenta con la potencial ventaja de mayor aprovechamiento del aporte de agua de lluvia. En el tratamiento RR, si bien se reportan los menores volúmenes de agua de riego y mayores niveles de productividad de agua, las pérdidas de rendimiento comparando con el testigo son significativas, en promedio un 11 % (Cuadro 4). Esto sugiere que los niveles de reducción de la disponibilidad del agua en el suelo a los que se llegó en este tratamiento fueron muy severos y por lo tanto sería necesario evaluar tratamientos de riego con déficit menores (por ejemplo 25 % de reducción de disponibilidad de agua en el suelo en vez de 50 %). Al igual que el tratamiento RR, el tratamiento con una inundación más retrasada IC45 presenta también reducciones del rendimiento, en promedio un 8 % (Cuadro 4). Por otro lado inundaciones más tempranas (IC15) que las recomen-

dadas no lograron reducciones significativas en el consumo de agua de riego, así como tampoco aumentos significativos de rendimiento ni aumentos de la productividad del agua.

Enmarcados en la realidad actual, en la que el pago por el recurso agua es mayoritariamente en base a un costo fijo por hectárea regada, no se generan condiciones de incentivo para implementar estrategias de ahorro. Sumado a esto, instrumentar un manejo del agua más restrictivo tiene importantes implicancias en los diseños de los sistemas de riego, ya que el agua de riego debe ser entregada en la chacra de forma rápida, regular y precisa. Para el rediseño de estos sistemas debería existir un incentivo económico que haga redituables las inversiones para la optimización y genere un beneficio por la aplicación de tecnologías de ahorro de agua, incluso cuando sus rendimientos pudieran verse mínimamente disminuidos.

Conclusiones

Este trabajo verifica que momentos de inundación previos al recomendado, como es el caso de IC15, no determinan reducciones en los consumos de agua de riego ni aumento del rendimiento, por ende tampoco se produce un aumento en la productividad del agua. Sin embargo hay una reducción importante del largo de ciclo del cultivo, que determina una ventaja al reducir el período de tiempo donde el cultivo puede ser más vulnerable a eventos climáticos adversos.

El manejo de riego de inundación tardía (IC45), al igual que el tratamiento RR, puede tener un impacto en la reducción del rendimiento. La diferencia es que el primero no logra reducciones significativas en los consumos de agua de riego y por lo tanto no se produce el consecuente aumento de la productividad del agua.

Tratamientos de riego controlados como el LV permiten no aumentar significativamente el consumo de agua de riego con respecto al manejo tradicional, y potencialmente capitalizar una mayor proporción de las precipitaciones, no afectando el rendimiento del cultivo.

El manejo del riego RR puede ser una opción efectiva para reducir el consumo de agua y obtener una alta productividad de la misma en sistemas arroceros del Uruguay. Sin embargo, este manejo más restringido del agua requiere de una sistematización y monitoreo del riego mucho más controlados para que las condiciones de déficit hídrico generadas no sean lo suficientemente restrictivas como para deprimir significativamente los rendimientos del cultivo, tal cual se observó en este trabajo.

Para las condiciones prevalentes en el sector arroz uruguayo, donde el pago por agua es mayoritariamente en base a un costo fijo por hectárea a regar y no por volumen utilizado, el actual tratamiento testigo IC 30, mayormente adoptado por los productores, y el manejo IC 15, serían los más adecuados. Estos manejos mantienen los mejores niveles de rendimiento, y si bien puede estar desperdiciando cierto aporte del agua de lluvia en comparación con LV, también poseen un seguro operativo al tener la presencia de una lámina de riego en las chacras.

En definitiva no existe un manejo de riego superior, ya que la viabilidad de las diferentes alternativas dependerá del incentivo económico que el productor pueda recibir por la aplicación de estrategias de riego que reduzcan el consumo de agua.

Agradecimientos

A Néstor Saldain por la colaboración en los análisis estadísticos, a Sebastián Martínez por el seguimiento y monitoreo de enfermedades y a los funcionarios de la sección: Adán Rodríguez, Alexander Bordagorri, Irma Furtado, Matías Oxley, Gustavo Rodríguez y Juan González.

Bibliografía

- ACA, Gremial de Molinos Arroceros, Facultad de Agronomía, INIA y LATU. (2009). *Guía de buenas prácticas en el cultivo de arroz en Uruguay*. Montevideo: ACA.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Roma: FAO. (Estudio FAO. Riego y drenaje, 56).
- Altamirano, A., Da Silva, H., Durán, A., Echeverría, A., Panario, D. y Puentes, R. (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay*. (Tomo I: Clasificación de suelos). Montevideo: MAP.
- Avila, L. A., Martini, D. L. F., Mezzomo, R. F., Reffatti, J. P., Campos, D. M., Cezimbra, S. L., ... y Marchesan, E. (2015). Rice water efficiency and yield under continuous and intermittent irrigation. *Agronomy Journal*, 107(2), 442-448.
- Blanco, F. (1987). Riego y Drenaje. En *Arroz-soja-maíz: Resultados de la experimentación regional en cultivos 1986-87* (pp. 107-114). Montevideo: CIAAB. (CIAAB: Serie Resultados Experimentales, 10).
- Blanco, F. y Roel, A. (1993). Riego. En *Arroz: Resultados experimentales 1992-1993*. Treinta y Tres: INIA Treinta y Tres.
- Blanco, F. y Roel, A. (1996). Riego. En *Arroz: Resultados experimentales 1995-1996* (10p.). Montevideo: INIA. (Actividades de Difusión, 103).
- Borrel, A., Garside, A. y Fukai, S. (1997). Improving efficiency of water use for irrigated rice in a semi-arid tropical environment. *Field Crops Research*, 52(3), 231-248.
- Bouman, B. A. M. y Tuong, T. P. (2001). Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. *Agricultural Water Management*, 49(1), 11-30.
- Bueno, C. S., Bucourt, N., Nobayashi, N., Inubushi, K. y Lafarge, T. (2010). Water productivity of contrasting rice genotypes grown under water saving conditions in the tropics and investigation of morphological traits for adaptation. *Agricultural Water Management*, 98(2), 241-250.
- Cabangon, R. J., Tuong, T. P., Castillo, E. G., Bao, L. X., Lu, G., Wang, G., ... y Wang, J. (2004). Effect of irrigation method and N-fertilizer management on rice yield, water productivity and nutrient-use efficiencies in typical lowland rice conditions in China. *Paddy Water Environment*, 2, 195-206.
- Cantou, G. y Roel, A. (2010). Manejo del riego: Productividad del agua. En *Arroz: Resultados experimentales 2009-2010*. Montevideo: INIA. (Actividades de Difusión, 611).
- Cantou, G., Roel, A., Castiglioni, J. I. y Ugarte, J. M. (2009). Efecto del momento de inundación en INIA Olimar y El Paso 144. En *Arroz: Resultados experimentales 2008-2009*. Montevideo: INIA. (Actividades de Difusión, 571).
- Cantou, G., Roel, A., Molina, F., Avila, S. y Casales, L. (2008). Efecto del momento de la inundación en INIA Olimar y El Paso 144, con y sin aplicación de fungicida. En *Arroz: Resultados experimentales 2007-2008*. Montevideo: INIA. (Actividades de Difusión 545).
- Capurro, M. C., Tarlera, S., Irisarri, P., Cantou, G., Riccetto, S., Fernández, A. y Roel, A. (2015). *Cuantificación de emisiones de metano y óxido nítrico bajo dos manejos del riego contrastantes en el cultivo de arroz*. Montevideo: INIA. (Serie Técnica, 220).
- DIEA. (2014). *Encuesta de Arroz: Zafra 2013/2014*. Montevideo: MGAP. (Serie encuestas, 322). Recuperado de http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/encuesta_arroz_zafra_-_2013_-_14.pdf
- Goswami, N. N. y Banerjee, M. K. (1978). Phosphorus, potassium and other macroelements. En *Soils and Rice* (pp. 561-580). Los Baños: International Rice Research Institute.
- Gun Won, J., Soo Choi, J., Phil Lee, S., Ho Son, S. y Ok Chung, S. (2005). Water saving by shallow intermittent irrigation and growth of rice. *Plant Production Science*, 8(4), 487-492.
- Hong, L., Li, Y. H., Deng, L., Chen, C. D., Dawe, D., Loefer, R. y Barker, R. (2000). Impact of water-saving irrigation techniques in China: Analysis of changes in water allocations and crop production in the Zhanghe Irrigation System and District, 1996 to 1998. En *IWMI Annual Report 1999-2000* (pp. 27-35). Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- Lampayan, R. M., Samoy-Pascual, K. C., Sibayan, E. B., Ella, V. B., Jayag, O. P., Cabangon, R. J., ... y Tuong, T. P. (2013). Mitigation of nutrient losses via surface runoff from rice cropping systems with alternate wetting and drying irrigation and site-specific nutrient management practices. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 6980-6991.
- Minamikawa, K. y Sakai, N. (2006). The practical use of water management based on soil redox potential for decreasing methane emissions from a paddy field in Japan. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 116, 181-188.
- Radosevich, S. (1997). Weed and invasive plant management approaches, methods, and tools. En S. Radosevich, J. Holt, C. Ghera (Eds.). *Weed ecology implications for managements* (3er ed., pp. 259-305). New York: John Wiley and Sons.
- Rejesus, R. M., Palis, F. G., Rodriguez, D. G. P., Lampayan, R. M. y Bouman, B. A. M. (2011). Impact of the alternate wetting and drying (AWD) water-saving irrigation technique: Evidence from rice producers in the Philippines. *Food Policy*, 36(2), 280-288.
- Richards, L. A. (1948). Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Science*, 66(2), 105-110.

- Roel, A. (1998). Riego. En: *Arroz: Resultados experimentales 1997-1998* (32p.). Montevideo: INIA. (Actividades de Difusión, 166).
- Roel, A. (1999). *Riego en arroz: Manejo eficiente de la inundación*. Montevideo: INIA. (Boletín de Divulgación, 67).
- Roel, A., Mutters, R. G., Eckert, J. W. y Plant, R. E. (2005). Effect of low water temperature on rice yield in California. *Agronomy Journal*, 97, 943-948.
- Shiratori, Y., Watanabe, H., Furukawa, Y., Tsuruta, H. y Inubushi, K. (2007). Effectiveness of a subsurface drainage system in poorly drained paddy fields on reduction of methane emissions. *Soil Science and Plant Nutrition*, 53(4), 387-400.
- Sudhir-Yadav, Humphreys, E., Kukal, S. S., Gill, G. y Rangarajan, R. (2011). Effect of water management on dry seeded and puddled transplanted rice: Part 2 water balance and water productivity. *Field Crops Research*, 120, 123-132.
- Tabbal, D. F., Bouman, B. A. M., Bhuiyan, S. I., Sibayan, E. B. y Sattar, M. A. (2002). On farm strategies for reducing water input in irrigated rice: Case studies in the Philippines. *Agricultural Water Management*, 56(2), 93-112.
- Towprayoon, S., Smakgahn, K. y Poonkaew, S. (2005). Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields. *Chemosphere*, 59, 1547-1556.
- Tuong, T. P., Bouman, B. A. M. y Mortimer, M. (2005). More rice, less water- Integrated approaches for increasing water productivity in irrigated rice-based systems in Asia. *Plant Production Science*, 8(3), 231-241.
- Villa, S. C. C., Marchesan, E., Avila, L. A., Massoni, P. F. S., Telo, G. M., Machado, S. L. O. y Camargo, E. R. (2006). Imidazolinone tolerant rice: Red rice control, out-crossing and herbicide carryover to non tolerant crops. *Planta Daninha*, 24(4), 761-768.
- Yagi, K., Tsuruta, H., Kanda, K. y Minami, K. (1996). Effect of water management on methane emission from a Japanese paddy field: Automated methane monitoring. *Global Biogeochemical Cycles*, 10(2), 255-267.
- Yao, F., Huang, J., Cui, K., Nie, L., Xiang, J., Liu, X., ... y Peng, S. (2012). Agronomic performance of high-yielding rice variety grown under alternate wetting and drying irrigation. *Field Crops Research*, 126, 16-22.