

Capítulo 22. Visión mundial del uso del agua en el cultivo de arroz

*Gonzalo Carracelas G., Gabriel Donoso Ñ., Viviana Becerra V.,
Mario Paredes C., Hamil Uribe C.*

En el mundo, el agua es un recurso cada vez más escaso, lo que se debe principalmente al cambio climático y competencia con otros sectores por su uso (Tuong y Bouman, 2003; Gaydon et al., 2010; Mekonnen y Hoekstra, 2016). A nivel mundial, el 96 % del arroz cultivado utiliza riego continuo de siembra a cosecha hasta 7 o 10 d antes de la cosecha, requiriendo mucha más agua para su correcto desarrollo, en comparación con otros cereales (Pimentel et al., 2004; Tuong et al., 2005).

Los principales beneficios de la inundación continua en el cultivo de arroz están relacionados con el control más efectivo de las malezas (Marchesi y Chauhan, 2019), aumento en la disponibilidad de nutrientes (Dunn y Gaydon, 2011), menor incidencia de enfermedades (Cartwright y Lee, 2001) y protección contra el frío durante la etapa de microsporogénesis (Williams y Angus, 1994). La presencia de una lámina de agua en el cultivo de arroz cumple un rol muy importante en el control de malezas, sin afectar el crecimiento de arroz, ya que esta planta posee estructuras especializadas, denominadas aerénquimas, que le permiten sobrevivir en medio acuático (Nishiuchi et al., 2012).

El alto consumo de agua durante el cultivo del arroz hace necesario el desarrollo e implemento de nuevas técnicas de riego que sean más eficientes en el uso del agua, sin disminuir significativamente el rendimiento y la calidad de grano (Bouman et al., 2007a; Datta et al., 2017). Estas medidas de racionalización del uso del agua pueden ayudar también a lograr otros efectos positivos que se asocian, principalmente, a una menor emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (Linguist et al., 2015; Tarlera et al., 2016) y a la menor absorción de algunos metales pesados, como el arsénico, entre otros (Linguist et al., 2015; Carrijo et al., 2018; Carracelas et al., 2019c).

Las principales dificultades agronómicas que genera la implementación de sistemas que utilizan una menor cantidad de agua son, un menor control de malezas, la aparición de malezas diferentes a las habituales, problemas operativos de uniformidad del riego y pérdida de rendimientos de grano (Stevens et al., 2012; Datta et al., 2017). Para contrarrestar este problema, en U.S.A. se ha recomendado un mayor uso de herbicidas residuales y herbicidas para el control de malezas de hoja ancha.

Otro problema que se debe considerar en la reducción del uso del agua en este cultivo, es la etapa fenológica del cultivo más sensible al déficit hídrico, por su mayor impacto en el rendimiento. En este sentido, la falta de agua de riego durante el periodo reproductivo, disminuye la fertilidad de la espiga, reduciendo la producción de grano hasta en un 30 % (Garrity y O'Toole, 1994; Praba et al., 2009).

Consumo de agua en el cultivo del arroz

En general, el arroz es cultivado en condiciones de inundación continua (RKB, 2020), requiriendo cerca de 1.432 litros de agua para producir un kilogramo de arroz en condiciones de riego. El cultivo del arroz utiliza aproximadamente entre 34 a 43 % del total de agua para riego a nivel mundial, y alrededor de un 24 a 30 % de los recursos mundiales de agua dulce (FAO, 2018). Por ejemplo, en Asia se utilizan alrededor de 13.000 a 15.000 m³ ha⁻¹ para regar este cultivo.

Balance hídrico en el cultivo del arroz

El balance hídrico es el equilibrio entre los aportes de todos los recursos hídricos y las salidas de esos aportes del sistema (Kool et al., 2014). Los principales aportes son el riego (R, mm) y las precipitaciones (P, mm), mientras que las salidas corresponden a la evapotranspiración del cultivo (ETc, mm), escurrimiento superficial (E, mm), percolación profunda (Pe, mm) y el cambio en el almacenamiento agua del suelo (ΔS , mm) (Bouman et al., 2007a; Grassi et al., 2009; Kool et al., 2014) (Figura 1).

Esto se puede describir de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$P + R = E + Pe + \Delta S + ETc$$

Sin embargo, el cultivo de arroz presenta diferentes aportes y salidas del balance hídrico general, por lo que un arreglo a la ecuación anterior debe ser considerada (Bouman et al., 2007b; Herrera-Puebla et al., 2019).

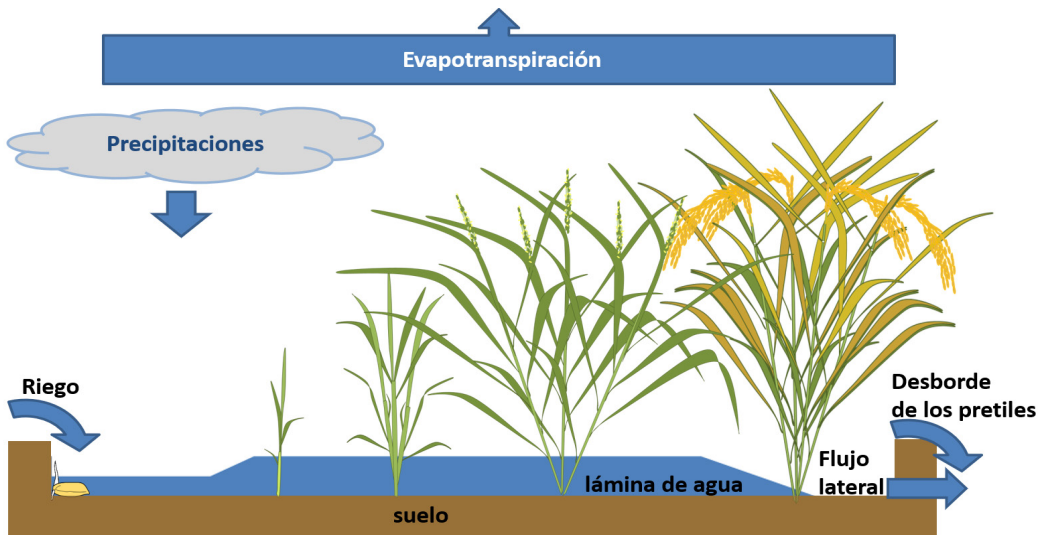


Figura 1. Balance hídrico en el cultivo del arroz (Adaptado: Bouman et al., 2007a).

El concepto de escurrimiento superficial debe ser reemplazado por desborde de los pretilos (O, mm) y flujo lateral (S, mm). Así, la nueva ecuación puede ser descrita como sigue:

$$P + R = (O + S) + Pe + \Delta S + ETc$$

Se estima que las salidas de agua, debido a la percolación durante la preparación de suelo para el cultivo del arroz, pueden ser de hasta 25 mm d^{-1} (Tuong et al., 1996). Otras estimaciones de percolación profunda en suelos pesados, realizadas durante el periodo de crecimiento de las plantas pueden alcanzar valores entre 1 a 5 mm d^{-1} y 25 a 30 mm d^{-1} , en suelo más arenosos (Datta et al., 2017). Estimaciones de evapotranspiración en algunos países de Asia alcanzan entre 4 a 7 mm d^{-1} y la evapotranspiración asociada a un óptimo crecimiento y desarrollo del cultivo, puede fluctuar entre 4.000 a $7.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (Tabbal et al., 2002; Bouman et al., 2007b; Massey et al., 2014; Carracelas et al., 2019b).

Otras estimaciones de uso de agua en suelos arcillosos con napas poco profundas alcanzan a sólo 4.000 m³ ha⁻¹ de agua durante la temporada, comparados con los 20.000 m³ ha⁻¹ observados en suelos arenosos con napas profundas (Cabangon et al., 2004). En Uruguay, el agua de riego usada en sistemas tradicionales continuos, dependiendo de las condiciones edafo-topo-climáticas, va desde 11.000 a 14.000 m³ ha⁻¹, con un valor promedio de 12.500 m³ ha⁻¹ (Battello et al., 2009). Estas informaciones concuerdan con datos obtenidos en Uruguay, donde se determinó un uso del agua de 13.300 m³ ha⁻¹, con una evapotranspiración del cultivo cercana a un 45 %, es decir, 6.000 a 7.000 m³ ha⁻¹, pérdidas asociadas al sistema de riego de 13 %, escurrimiento superficial y pérdidas laterales de 35 %, y percolación de 7 % del total de agua utilizada (Blanco et al., 1984). De toda el agua que ingresa al campo de arroz, la fracción que se pierde debido a la transpiración de la planta, es la única que incide directamente en el rendimiento en grano. El resto del agua utilizada tiene sólo la función de reponer el agua perdida por percolación profunda, escorrentía y evaporación.

Efectos del estrés hídrico en la planta de arroz

El cultivo de arroz es muy sensible al estrés hídrico, debido a su sistema radicular poco profundo (Tuong et al., 2005; Bouman et al., 2007b; Parent et al., 2010). El estrés hídrico en el período reproductivo, reduce el rendimiento a través de un menor número de espiguillas, peso de grano, mayor esterilidad y una disminución del número de granos llenos por panícula (Bouman y Tuong, 2001). Los efectos del estrés hídrico se hacen presentes en la planta de arroz cuando el suelo se encuentra bajo el punto de saturación. Frente a esta condición, la planta responde cerrando los estomas y disminuyendo la división celular, y la elongación de las células, lo cual tiene como consecuencia directa la reducción del crecimiento foliar y la tasa de transpiración y fotosíntesis (Bouman and Toung, 2001; Bouman et al., 2007b; Luo, 2010). Además, el estrés hídrico induce senescencia foliar, disminución de altura de la planta, número de macollas y enrollamiento de la hoja, lo que contribuye a reducir la captación de radiación solar, atrasando la floración e incrementando el crecimiento de las raíces en número y su profundidad de enraizamiento.

Productividad del agua

El concepto de productividad del agua es importante, debido a que, al optimizarse el uso del agua, se puede redestinar este recurso para sembrar una mayor superficie de arroz u otros cultivos, reducir el costo de riego y mano de obra, la huella del agua del cultivo, el impacto ambiental y abrir nuevas posibilidades de mercados para la exportación de arroz. La productividad de agua corresponde a la cantidad de kilogramos de arroz producidos por m³ de agua utilizada. De acuerdo con Bouman et al. (2007b), existen diferentes formas de determinar la productividad del agua de acuerdo con el tipo de agua utilizada que incluye la productividad asociada a: agua transpirada (WP_T), agua de riego evapotranspirada (WP_{ET}), agua de riego (WP_R), agua de riego más precipitaciones (WP_{RP}) y la productividad total de agua (WP_{Tot}).

$$WP_T = (\text{kg de arroz ha}^{-1}) / (\text{m}^3 \text{ de agua transpirada})$$

$$WP_{ET} = (\text{kg de arroz ha}^{-1}) / (\text{m}^3 \text{ de agua evapotranspirada})$$

$$WP_R = (\text{kg de arroz ha}^{-1}) / (\text{m}^3 \text{ de agua de riego})$$

$$WP_{R+P} = (\text{kg de arroz ha}^{-1}) / (\text{m}^3 \text{ de agua de riego} + \text{m}^3 \text{ agua precipitaciones})$$

$$WP_{Tot} = (\text{kg de arroz ha}^{-1}) / (\text{m}^3 \text{ de agua de riego} + \text{m}^3 \text{ agua precipitaciones} + \text{agua capilar})$$

La productividad del agua se puede mejorar a través de: a) sistemas de riego con déficit controlado (lámina variable-intermitente), sistematización del riego en el campo, reducción del periodo

de riego – inundación – retiro del agua, uso de mangas o politubos, construcción de taipas o pretilas con anticipación, realización de las labores del campo con anticipación (verano), reducción de las pérdidas por escurrimiento superficial y percolación; b) uso de variedades de ciclo corto o que posean una estructura que le permita utilizar de mejor forma el agua disponible; c) mejoramiento y sistematización de los sistemas de conducción de agua hacia el campo.

Sistemas de riego en el cultivo de arroz en el mundo

El uso del agua en el cultivo del arroz depende del sistema productivo en el cual se desarrolla la planta (Boumann et al., 2007a; Seck et al., 2012). A nivel mundial se han reportado distintas formas de producir arroz: 1) arroz de riego, el cual representa cerca del 75 % de la producción mundial de arroz, con medias de rendimiento de $5,4 \text{ t ha}^{-1}$; 2) arroz de secano de tierras bajas, el cual corresponde a un 56 % de la producción de Asia con rendimientos de $1,0$ a $2,5 \text{ t ha}^{-1}$; 3) arroz de secano de tierras altas que representa alrededor del 1 % de la producción de Asia con rendimientos cercanos a $1,0 \text{ t ha}^{-1}$; y 4) arroz flotante, el cual crece bajo inundación de un metro de agua y corresponde a variedades especialmente adaptadas para esas condiciones. Dentro de este contexto, diferentes países han implementado diversas estrategias de manejo de riego, con el fin de mejorar la productividad del agua y sostener o aumentar el nivel de producción del cultivo, utilizando una menor cantidad de agua.

Experiencia y recomendaciones de manejo del riego y uso del agua a nivel global

El Instituto Internacional de Investigación del Arroz (IRRI) ha desarrollado diversas prácticas de manejo y recomendaciones que permiten aumentar la productividad del agua en el cultivo de arroz (RKB, 2020). Para asegurar rendimientos máximos y un uso efectivo y eficiente del agua, recomiendan el uso de algunas prácticas agronómicas como: a) contar con canales de avance dentro del campo que permitan controlar la entrada del agua en varios sectores a la vez. Esta situación favorece la velocidad de llenado de los cuadros y las labores de control de malezas; b) preparar el suelo con el objetivo de minimizar las pérdidas de agua, evitando romper el pie de arado ubicado bajo el suelo utilizable, ya que se pueden producir grandes pérdidas de agua producto de la presencia de grietas bajo la zona donde están las raíces; c) preparar el suelo seco, ya que permite un importante ahorro de agua. La preparación de suelo húmedo puede llegar a consumir hasta un tercio del total de agua requerida para el crecimiento del arroz, en un sistema de arroz irrigado. En el caso de la preparación de suelo húmedo, puede que sea necesario incluir un segundo rastraje que se debería realizar manteniendo el agua en el campo para definir las áreas altas y bajas, preocupándose de la construcción de pretilas y/o taipas, reparando fracturas y orificios; d) revisar la nivelación, ya que un suelo mal nivelado requiere entre 80 a 100 mm más de agua, lo que equivale a un 10 % del total utilizado en el cultivo; e) considerar una altura de agua de 3 cm al momento del trasplante, debiendo incrementarse entre 5 y 10 cm en la medida que el cultivo aumenta su altura; f) realizar la inundación una vez que las plantas tienen 3 a 4 hojas, en el caso de realizar siembra directa; y g) mantener un nivel del agua de al menos 5 cm entre la excursión de la panícula y la floración, ya que la planta de arroz es muy sensible a la falta de agua (bajo saturación) en la etapa de floración, lo que se puede traducir en considerables pérdidas en el rendimiento por un aumento en la esterilidad floral.

En el caso que el agricultor no tenga una buena disponibilidad de agua en su predio, una manera de enfrentarlo podría ser la utilización de métodos de riego intermitente (Alternating wetting and drying; AWD), combinado con el sistema de siembra directa. Este sistema permite que el nivel del agua llegue hasta 15 cm bajo la superficie del suelo lo cual se puede medir mediante un piezómetro. Una vez que esto sucede se re-inunda a una profundidad de entre 5 a 10 cm sobre el nivel del suelo, para, posteriormente, permitir que el nivel del agua disminuya entre 5 hasta 15 cm bajo el nivel del suelo. Este procedimiento se puede repetir hasta antes de la floración.

En el caso de aparición de muchas malezas, se puede suprimir el sistema por dos a tres semanas para utilizar un control químico. En el caso de la siembra directa, el sistema AWD se puede aplicar desde la aparición de la tercera y cuarta hoja.

China

China es el mayor productor de arroz en el mundo, con un 28 % de la producción global (FAO, 2018). El cultivo del arroz en China se desarrolla en tres fechas diferentes: temprano desde abril, media que corresponde a mayo y tardía en julio. La principal forma de establecimiento del cultivo en China es a través de trasplante manual y mecánico (Nie y Peng, 2017). Sin embargo, el sistema de siembra directa ha aumentado en superficie, debido a que disminuye el uso de agua, labores y personal. Existe una gran variedad de sistemas productivos y climas (sub-tropical cálidos a templados). En China más del 90 % de la superficie de este cultivo se realiza bajo riego. La cantidad media de agua de riego utilizada por agricultores arroceros de China oscila entre 1.026 mm (zona norte) y 736 mm (zona sur) (He et al., 2020). La agricultura en China es intensiva con baja disponibilidad hídrica y depende en gran parte del riego. Por ello, se han implementado soluciones relacionadas con la mejora en el uso del agua a través del riego intermitente, debido a la disminución del recurso hídrico por competencia con otros usos. China es pionero en la implementación de políticas asociadas a un menor uso de agua y en investigaciones de riego intermitente. La investigación de técnicas asociadas al ahorro de agua comenzó en 1985 (Li y Barker, 2004). Como resultado se ha determinado que se puede ahorrar agua en el cultivo del arroz sin disminuir los rendimientos, manteniendo un contenido de agua en el suelo a nivel radicular, entre un 70 % y 80 % de contenido de humedad saturada. El año 2002, cerca del 40% de la producción de arroz de China (12 millones ha) fueron regadas mediante riego intermitente, con un incremento en los rendimientos que van desde 5 % a un 25%.

India

En la India se estima que el área regada para el cultivo del arroz es de 25,1 millones ha. Dentro de los métodos de siembra utilizados en India están el trasplante, siembra al voleo y siembra directa. En India, la cantidad de agua necesaria para producir arroz es de entre 15.660 y 22.620 m³ ha⁻¹. Para intentar reducir esta cantidad, el uso de técnicas como el riego intermitente y el sistema de intensificación de arroz (SRI) han sido explorados. Además, han experimentado la micro-irrigación, con un ahorro de agua en torno al 40 % y 42 % respecto del sistema tradicional (Govindan y Grace, 2012; Vanitha y Mohandass, 2014). Específicamente, con el uso de riego sub-superficial, han obtenido rendimientos de 7,1 t ha⁻¹ con una productividad de agua de 0,9 kg m⁻³ en contraste con las 3,1 t ha⁻¹ en el riego tradicional, con una productividad de agua de 0,2 kg m⁻³ (Rao et al., 2017).

Colombia

El arroz en Colombia se cultiva principalmente a través de riego y también en condiciones de secano. En este país el sistema de siembra es principalmente mecanizado (70 %) o manual (tradicional) (GRiSP, 2013). En el caso de Colombia, la agricultura ocupa aproximadamente el 54 % del agua y de ese porcentaje un 22 % (4.185.000 m³) es utilizado por el cultivo del arroz (Becerra et al., 2019; González et al., 2014). La alta demanda de agua en la agricultura colombiana se debe, fundamentalmente, al manejo agronómico del cultivo y al uso del riego gravitacional. Por otro lado, la falta de este recurso en la región, se debe principalmente a la variabilidad climática asociada al cambio climático global y a la degradación de cuencas en distritos de riego. El sistema de adopción masiva de tecnología (AMTEC) (Fedearroz, 2012) ha promovido un uso racional del agua, lo que ha permitido generar una disminución de entre 15 % y 39 % en la huella del agua, en com-

paración con el sistema tradicional (MADR y CIAT, 2015). El porcentaje de adopción de esta tecnología por área sembrada es de 15 % en el Bajo Cauca, 40 % en la Zona Centro, 25 % en la Costa Norte, 15 % en la Zona de los Llanos y 5 % en Santander (DANE-Fedearroz, 2017).

Australia

El arroz en Australia depende completamente del riego (RGA, 2020). El cultivo es regulado por Murrumbidgee Irrigation Limited, Murray Irrigation Limited and Coleambally Irrigation Cooperative Limited, y se autoriza solamente en suelos con baja infiltración. En este país se han registrado gastos de agua de riego de 12.000 a 15.000 m³ ha⁻¹, con valores de productividad muy altos, debido a los buenos rendimientos logrados, donde los mejores productores obtienen 14 a 15 t ha⁻¹, con las mejoras en la eficiencia del uso del agua, el uso de variedades precoces de alto potencial de rendimiento y buenas prácticas de manejo.

El 80 % del arroz que produce Australia es de grano medio tipo *japonica*, de variedades de tamaño largo ancho como 'Amaroo', 'Millin' y 'Langi' y variedades de tamaño corto como 'Koshihikari' que se destina al mercado japonés. Para mejorar el uso del agua, los agricultores australianos han seguido estrictamente las regulaciones asociadas al crecimiento del cultivo del arroz, planificación predial, geo-nivelación del suelo con pendiente controlada que facilitan el riego y drenaje, variedades de ciclo corto, uso de otros cultivos que utilicen la humedad de suelo posterior a la cosecha, retraso del momento de inundación permanente del cultivo, grupos de trabajo para discutir el uso de nuevas tecnologías y mantener las buenas prácticas, y la planificación de manejo de suelo y el agua. Asociado a estas medidas, existen sistemas de detección de áreas con baja permeabilidad que permite generar políticas de nuevo uso de suelo y así limitar el cultivo sólo a zonas de baja infiltración de agua (Beecher et al., 2002; Humphreys y Robinson, 2004).

Proyecciones negativas basadas en un escenario A1 (IPCC, 2000), indican una reducción del caudal en la cuenca Murray-Darling, de hasta un 48 % para el año 2100 (Beare y Heaney, 2002), lo que ha llevado a desarrollar tecnologías que permiten mantener los niveles de producción, disminuyendo la cantidad de agua utilizada (Gaydon et al., 2010). Una de las mejoras realizadas, se relaciona con la disminución del tiempo en que el cultivo está inundado. El periodo ideal para implementar esta tecnología es, desde que la planta tiene tres hojas hasta cuando ésta cubre completamente la canopia.

Otras tecnologías alternativas utilizadas han sido el riego intermitente, el uso del suelo saturado, uso del arroz aeróbico y el riego por aspersión, como una manera de disminuir el uso del agua (Muirhead, 1989; Humphreys et al., 2005; Kato et al., 2009). Sin embargo, una de las principales restricciones en el uso de estas tecnologías ha sido el incremento de los costos en riego, fertilidad y control de malezas.

Durante la etapa reproductiva se recomienda mantener el cultivo con una lámina de agua de 20 a 25 cm (Humphreys et al., 2005), debido al elevado potencial de evapotranspiración del cultivo en este periodo y a la necesidad de proteger la planta frente a las bajas temperaturas presentes en Australia. Experiencias de riego basadas en la evapotranspiración de referencia, hasta el inicio de formación de panícula, han generado ahorros de uso de agua entre un 15 % y un 22 %, con una disminución del rendimiento cercano a 10 % (Dunn y Gaydon, 2011). Sin embargo, el uso de estas tecnologías necesita la realización de siembras más tempranas, para asegurar que el desarrollo de la microspora temprana ocurra en periodos con menor probabilidad de bajas temperaturas.

Actualmente se están desarrollando diversos proyectos relacionados con la automatización del riego, uso de sensores que monitorean las condiciones meteorológicas, el suelo, el agua, la planta y que permiten determinar las necesidades del cultivo.

Estados Unidos (U.S.A.)

En U.S.A. el arroz se cultiva principalmente mediante siembra directa y siembra con arroz pregerminado, con la totalidad de la superficie manejada bajo riego.

Con el fin de tecnificar el riego del arroz en U.S.A., se ha utilizado el sistema de riego con múltiples entradas (MIRI – Multiple Inlet Rice Irrigation) que permite que el agua ingrese a todos los cuadros simultáneamente, con mangas de riego instaladas perpendicularmente a las taipas (Massey et al., 2014). El uso de las taipas rectas permite un ahorro de agua del 17 % ($9.650 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), mientras que el sistema MIRI usado con taipas rectas redujo el uso de agua de riego en un 30 % ($7.830 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). También se ha observado que la nivelación a cota cero permite un ahorro importante de agua, con una reducción en su uso por temporada de aproximadamente 55 %, en relación con los campos sistematizados con taipas siguiendo las curvas de nivel (Smith et al., 2007).

Otras experiencias realizadas para mejorar el uso del agua en el cultivo, son el riego por surcos en siembra directa, facilitando la infiltración del agua a través de los surcos (Stevens et al., 2018). Para establecer este sistema, se construyen surcos antes de la siembra, siguiendo la pendiente del campo. El espaciamiento de los surcos debe ser de aproximadamente 76 cm, dependiendo de las propiedades del suelo, y el arroz debe sembrarse a una distancia de 19 cm entre hileras. Este sistema de manejo agronómico muestra una reducción en el rendimiento entre 11 % y 48 %, en comparación con el sistema completamente inundado. Los rendimientos en grano, utilizando este sistema de riego, fluctúan entre $6,1$ y 11 t ha^{-1} , dependiendo de la variedad de arroz utilizada. Para poder realizar este riego se utilizan mangas de riego de 30 cm de diámetro, las cuales pueden transportar cerca de 3.785 L m^{-1} . La manga es perforada en base a información de software PHAUCET desarrollado por USDA (Natural Resources Conservation Service). Debido a que la presión es difícil de mantener en sectores amplios, las mangas se dividen en secciones donde las compuertas se abren o cierran dependiendo del tiempo necesario para el riego. Este sistema se puede automatizar a través del uso de una válvula de riego por pulsos, que permite riegos con diferentes frecuencias.

En este sistema el monitoreo de la evapotranspiración del cultivo es fundamental para programar el riego y no generar problemas de estrés en las plantas. Este monitoreo se puede realizar mediante programas computacionales comunicados con estaciones meteorológicas. En este sentido, la Universidad de Missouri desarrolló el software 'Crop Water Use' que permite regular la frecuencia de riego. Finalmente, el uso de mangas de riego es un sistema eficiente, de fácil implementación que, a escala comercial, puede incrementar los rendimientos y restablecer la lámina de agua, con mayor velocidad que los sistemas convencionales.

Uruguay

Actualmente, en Uruguay el área cultivada de arroz se extiende a unas 145.000 ha que producen 1,2 millones de toneladas, de las cuales más del 90 % es exportado (DIEA MGAP, 2019). El arroz en Uruguay se cultiva en tres zonas principalmente: norte, centro y este.

En la zona norte se cultiva el 20 % del total del área arrocería, la cual corresponde a la cuenca del río Cuareim y del río Uruguay. En esta zona las pendientes son más pronunciadas y el mayor porcentaje del agua de riego proviene de represas. En la zona centro, el área cultivada alcanza el 9 % y corresponde a la que se ubica en la cuenca de río Negro y requiere de represas para el abastecimiento. Finalmente, la zona este es la de mayor superficie sembrada (71 %) y abarca las planicies de la Laguna Merín y del Atlántico. La topografía en general es muy plana y cuenta con abundantes fuentes de agua (DIEA MGAP, 2019). El laboreo, nivelación, sistematización, siembra, primer herbicida y primera fertilización de nitrógeno, se realizan sobre suelo seco.

La totalidad del área cultivada en Uruguay es regada. El 45 % del riego se realiza con bombeo eléctrico y un 45 % es por gravedad (DIEA MGAP, 2019). Las represas construidas con fines de riego son la principal fuente de agua. El riego gravitacional es responsable de 80.000 ha y la electricidad de

cerca de 65.000 ha. El riego con diésel no es viable desde el punto de vista económico (DIEA MGAP, 2019). El sector arrocero uruguayo se caracteriza por tener una muy buena integración con la cadena agroindustrial, entre las distintas instituciones vinculadas al sector: Asociación de Cultivadores (ACA), Gremial de Molinos Arroceros (GMA), Investigación (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria - INIA) y Gobierno (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca - MGAP). Esta integración ha favorecido la transferencia de tecnologías disponibles para el cultivo.

Los rendimientos en Uruguay han aumentado a una de las tasas más altas a nivel mundial (14 t ha^{-1} año⁻¹ entre 2000 y 2017) (Carracelas et al., 2017a). Los niveles de rendimiento actuales en Uruguay se encuentran sobre las $8,3 \text{ t ha}^{-1}$, lo que representa el 57 % del potencial de rendimiento estimado (14 t ha^{-1}), e indica que es posible aumentar aún más los rendimientos y continuar reduciendo las brechas que alcanzan a $3,1 \text{ t ha}^{-1}$ (Carracelas et al., 2019a). La tasa de aumento de los rendimientos de arroz en Uruguay se explica, principalmente, por la alta adopción tecnológica, la incorporación de nuevas variedades y la implementación de prácticas integradas de manejo de cultivos. El manejo del riego juega un rol fundamental en permitir el logro del potencial productivo de las variedades disponibles a nivel comercial. El riego de inundación temprana y su alta uniformidad han sido los manejos claves para el logro de los altos rendimientos en el cultivo de arroz. La sistematización a un menor intervalo vertical, sistema de múltiples taipas, cambio de la forma de la taipa, disminución de la altura de la taipa, uso de mangas de riego y canales secundarios, regueras con pendiente controlada plantadas con arroz, han facilitado la velocidad y uniformidad del riego y del cultivo.

La inundación se realiza a partir del estado fenológico V3 (15 a 35 d después de la emergencia) (Counce et al., 2000). La finalización del riego es entre 10 y 20 d previo a la cosecha, lo cual se realiza sobre suelo seco. Las ventajas de cosecha en suelo seco implican un menor costo por menor desgaste de maquinaria, menor gasto de combustible y mantención de la estructura del suelo y sistematización para los próximos cultivos.

Otros cambios tecnológicos registrados en los últimos años son: siembra de variedades de alto rendimiento resistentes a enfermedades, alto uso de semilla certificada, sistematización, nivelación, laboreo de verano, reducción de laboreo, mayor proporción del área sembrada en periodo óptimo (octubre), manejo eficiente de fertilización nitrogenada, uso eficiente de fungicidas, y control de malezas temprano con menores dosis. Todo esto ha logrado una mayor eficiencia y un menor impacto ambiental.

Finalmente, la incorporación de otros cultivos como soja y la integración con ganadería ha contribuido, favorablemente, en el logro de altos rendimientos y en la sustentabilidad del sector. La rotación típica en los sistemas arroceros en Uruguay es de dos años de arroz seguido por la siembra de pasturas perennes (3 años). Nuevas rotaciones han incluido la siembra de otros cultivos como soja, los cuales han tenido un impacto favorable en los rendimientos logrados durante el cultivo de arroz.

Chile

En Chile, el sistema de siembra mayoritariamente utilizado es el inundado con uso de semilla pregerminada. La semilla pregerminada es distribuida al voleo sobre una lámina de agua de 5 cm. Esta labor se realiza manualmente (sobre animales de carga), por avión o a través de un trompo de aplicación de fertilizantes. La dosis de semilla utilizada fluctúa entre 140 y 200 kg ha^{-1} en siembra manual y 120 kg ha^{-1} en siembra por avión.

Con posterioridad a la siembra, el cultivo requiere un incremento de la lámina de agua superior a 10 cm en etapa de plántula (V3 a V4), hasta la madurez fisiológica. Datos preliminares muestran que este sistema de siembra requiere sobre los $18.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ durante la temporada, la que se extiende por unos 160 d, entre octubre y marzo (Quezada et al., 2011; Henríquez et al., 2018; Donoso et al., 2019).

El otro sistema de siembra utilizado es la siembra directa, la cual permite ahorrar agua, principalmente, durante la etapa vegetativa de la planta, mejorando la eficiencia del proceso de la siem-

bra, fertilización y aplicación de herbicidas (Henríquez et al., 2018). Este sistema de siembra ha ido aumentando y, en la actualidad, cubre aproximadamente un 20 % del cultivo del arroz (Paredes et al., 2015; Henríquez et al., 2018). Este sistema requiere de una preparación de suelo a cota cero o micronivelación láser (Henríquez et al., 2018), buena preparación de suelo y siembra realizada con máquina sembradora de cereales, ubicando las semillas a tres centímetros de profundidad. La dosis de semilla fluctúa entre 100 y 120 kg ha⁻¹. Este sistema sólo requiere mantener la humedad del suelo para iniciar la germinación de la semilla hasta V3-V4, para luego inundar con una lámina de agua de 5 a 10 cm, hasta la madurez fisiológica (Henríquez et al., 2018). Según estudios realizados en Chile, la siembra directa permite ahorrar alrededor de un 20 % en el agua de riego, en comparación con la siembra con arroz pregerminado en suelo inundado (Henríquez et al., 2018). Sin embargo, la adopción de nuevas tecnologías de riego y la cuantificación de agua utilizada por el cultivo, continúan siendo problemas por resolver en el país. En la actualidad, diversos proyectos de investigación relacionados con el mejor uso del agua en el cultivo, intentan encontrar las mejores alternativas tecnológicas que permitan resolver esta problemática (Donoso et al., 2019).

Manejos alternativos de riego en el cultivo del arroz

Existen diversas prácticas de manejo de riego y tecnologías que permiten mejorar la eficiencia del riego en el cultivo del arroz. Algunas de ellas ya están siendo utilizadas en algunos países y permiten mejorar la productividad del agua, ahorrando un volumen importante del recurso hídrico y mejorando su distribución en el campo. Estas tecnologías se describen a continuación.

Riego intermitente

En el manejo intermitente del riego, el suelo siempre se mantiene en condiciones de saturación, nunca se seca. Lo que varía es la altura de la lámina de agua, hasta llegar a una situación de 'barro líquido'. Diversos autores señalan que la reducción en el uso de agua al implementar manejos alternativos de riego como el intermitente, estaban asociadas con un aumento en la captura de agua de lluvia (Massey et al., 2014; de Avila et al., 2015, Massey et al., 2018).

El riego intermitente combinado con un sistema de riego de arroz de entrada múltiple mediante el uso de mangas (MIRI) en U.S.A., permitió una reducción importante en el agua utilizada (4.990 m³ ha⁻¹) y determinó un efecto positivo en el rendimiento de grano en relación con las inundaciones continuas (Massey et al., 2014). La clave de éxito de estos manejos en los predios comerciales radica en contar con un sistema de riego confiable, con amplia capacidad de suministro de agua de riego que permita una rápida y uniforme re-inundación del campo, asegurando que el estrés hídrico no limite la producción del cultivo. La experiencia en el uso de los sistemas de múltiple entrada (MIRI), asociados a un programa de manejo integrado del cultivo (malezas, fertilización y enfermedades), son fundamentales para adaptar e implementar el riego intermitente en cultivos comerciales.

Estudios de investigación realizados en Uruguay, donde se evaluaron diferentes manejos de riego como la inundación continua temprana (C), el riego restringido con secados hasta primordio (AWD), inundación intermitente hasta primordio (IP) e inundación intermitente durante todo el período de crecimiento del cultivo (I), permitieron señalar que el riego intermitente (IP, I) registró ahorros significativos en el gasto de agua en las regiones norte y centro (en promedio 35 % o 3.986 m³ ha⁻¹) en relación con el manejo tradicional. La productividad del agua, considerando el agua de riego, solamente se incrementó en un 23 % en IP y 62 % en I, en relación con el control (C). El porcentaje de granos enteros se redujo significativamente en el tratamiento de riego intermitente (I) en la región norte. Las técnicas que mantuvieron el suelo en condiciones saturadas (inundaciones intermitentes), permitieron una reducción del gasto de agua sin efectos significativos en el rendimiento de grano, lo que condujo a un aumento importante en la productividad del

agua de riego. La técnica de riego intermitente hasta el inicio de primordio permitió un ahorro considerable del gasto de agua y un aumento significativo en la productividad del agua de riego, sin afectar el rendimiento de arroz y la calidad industrial del grano (Carracelas et al., 2019b).

El riego intermitente, al mejorar significativamente la productividad del agua en el cultivo del arroz en Uruguay, se convierte en una excelente alternativa frente a fenómenos de escasez hídrica. Aumentar los rendimientos y mantener la calidad industrial del grano de arroz, mientras se reduce el gasto de agua, podría determinar una mejora en el resultado económico de la actividad por un ahorro en los costos asociados al riego (mano de obra, costos de bombeo). Es importante considerar que el ahorro de agua se justifica cuando su aplicación permite obtener al menos rendimientos similares o superiores a los sistemas convencionales de riego y si está asociado a un ahorro en los costos asociados al riego. Otra consideración es contar con sistemas de medición de agua que permitan realizar una cuantificación efectiva del riego, para promover sistemas de riego más eficientes.

Riego de periodos alternados de suelo saturado e insaturado (AWD)

Esta técnica de manejo de riego consiste en alternar las condiciones del suelo de saturado a insaturado, modificando los intervalos de riego, permitiendo que la lámina de agua baje del nivel del suelo hasta que el suelo alcance un estado aeróbico, antes de que el campo se vuelva a inundar.

Este tipo de manejo puede estar asociado a diferentes niveles de estrés hídrico para las plantas de arroz asociado al nivel de secado, duración y momento fenológico en el que se realiza. El AWD es una tecnología ampliamente usada en diversos países asiáticos como en el caso de Filipinas. Estudios realizados en estos países han determinado ahorros importantes en el gasto de agua de riego (15 % a 30 %), sin afectar negativamente el rendimiento de arroz en relación con el riego continuo tradicional (Lampayan et al., 2003; 2005). La técnica conocida como 'safe AWD' permite una reducción importante en el agua utilizada, sin penalizar el rendimiento del grano de arroz. Esta técnica consiste en dejar que la lámina de agua disminuya a una profundidad de hasta 15 cm por debajo de la superficie del suelo, de manera que las raíces aún tengan acceso al agua. Luego, el campo se vuelve a inundar con una lámina de agua de 5 cm (Lampayan et al., 2015; Carrijo et al., 2018), sin afectar el rendimiento cuando el potencial de agua del suelo fue mayor a - 20 kPa (Carrijo et al., 2017).

Otros estudios realizados a nivel mundial reportaron una pérdida importante en el rendimiento con este manejo de riego (AWD) en relación con el riego tradicional, presentándose una gran variabilidad en su impacto, dependiendo del tipo de suelo y de los diferentes niveles de estrés hídricos establecidos (Bouman y Tuong, 2001). Resultados obtenidos en Uruguay con el manejo AWD, donde el periodo de secado se realizó durante la etapa vegetativa, permitiendo un agotamiento del 50 % del agua disponible a nivel del suelo, estuvieron asociados a una reducción en el rendimiento cercana al 15 % en relación con el riego continuo tradicional (Carracelas et al., 2019a; 2019b). El riego restringido AWD permitió un 29 % (- 2.067 m³ ha⁻¹) de ahorro en agua de riego, en relación con el riego tradicional continuo, pero determinó una pérdida de rendimiento significativa de alrededor de un 15 %, equivalente a 1.339 kg de arroz ha⁻¹ (Carracelas et al., 2019a). Cuando el suelo se seca, aún en la etapa vegetativa, el rendimiento se afecta negativamente. Sin embargo, esta técnica puede reducir la acumulación de arsénico inorgánico en el grano de arroz en ciertos tipos de suelos (Carrijo et al., 2018; Carracelas et al., 2019c).

Sistema de intensificación del cultivo arrocero (SRI: System of rice intensification)

El sistema de intensificación del cultivo arrocero (SRI; De Laulanie, 1993), es una metodología agroecológica para el incremento de la productividad del arroz y otros cultivos. Se basa en un fácil y rápido establecimiento de plantas mediante trasplante, una reducida densidad de plantas, enriquecimiento del suelo a través del uso de materia orgánica y una reducción y control en el uso del

agua. Según los resultados obtenidos en los países donde se ha implementado esta metodología, se ha logrado incrementar el índice de área foliar y el peso seco de las plantas (Lin et al., 2011), disminuyendo la cantidad de agua (Choi et al., 2013) y el uso de fertilizantes sintéticos, menor dosis de semilla (Ferichani y Prasetya 2011) y un aumento de los rendimientos (Ferichani y Prasetya, 2011; Rao, 2011). En general, se considera que esta tecnología puede beneficiar a pequeños agricultores de bajos ingresos que cultivan el arroz para autoconsumo (Ramesh et al., 2019).

Tecnologías disponibles que facilitan la implementación de manejos alternativos de riego

Existen diferentes tecnologías de riego disponibles a nivel global para implementar las técnicas de riego alternativas al sistema tradicional. Estas tecnologías permiten la re-inundación rápida de campos de arroz nivelados uniformemente, lo que posibilitan la permanente saturación del suelo y con niveles de humedad disponibles para que no afecten el rendimiento del cultivo de arroz. Dentro de estas tecnologías se destaca el riego por mangas y el riego automatizado por telemetría.

Riego por mangas o politubos

El riego por mangas es una tecnología ampliamente utilizada en U.S.A., Argentina y Uruguay, que permite mejorar la eficiencia del uso del agua.

Las principales ventajas se asocian a una reducción de pérdidas por evaporación directa como ocurre en los canales de avance, la cuantificación del uso del agua y un incremento en el número de hectáreas regadas por persona (~120 ha) (Bandeira y Böcking, 2014). En estos casos, las mangas se colocan a una distancia de 200 m unas de otras y las compuertas cada 50 m. El uso de mangas de riego permite un ahorro de agua en el riego cercano al 13 % ($1.900 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), lográndose incrementos en el rendimiento cercanos a $1.000 \text{ kg arroz ha}^{-1}$. El uso de mangas facilita la implementación de manejos de riego alternativos, como el riego intermitente, riego por surcos, y de entradas múltiples de agua (MIRI), con reducciones importantes de agua de riego y aumentos de rendimientos en grano en relación con las inundaciones continuas (Massey et al., 2014).

El uso de mangas de riego en campos comerciales permite una mayor velocidad de inundación y uniformidad del riego, lo cual facilita la implementación de manejos alternativos (Carracelas et al., 2017a). Otras ventajas identificadas por productores que usan esta tecnología en Uruguay es el posible uso de personal no calificado, menores problemas de erosión, mejor control del agua y una mayor eficiencia en el uso del agua.

Riego automatizado por telemetría

La implementación de sistemas de riego automatizados permite asegurar un uso racional del recurso hídrico y medir el volumen de agua, elementos esenciales para hacer un uso más eficiente del agua. Sin embargo, la automatización tiene un alto costo, lo cual impide un uso masivo de estas tecnologías (Niblack y Sánchez, 2008; Dassanayake et al., 2009; Shahidian y Serralheiro, 2012).

Existen sistemas automatizados, como los creados en Australia, FarmConnect® (Rubicon Water, 2020) y Aquator (G&M Poly, 2018). FarmConnect® es un sistema integrado y más accesible que permite controlar compuertas y válvulas de riego, en base a la información de sensores y medidores que monitorean el nivel del agua y los contenidos de humedad del suelo, y son capaces de medir el flujo del agua superficial. Este sistema posee, además, una interfaz web que permite revisar en tiempo real el sistema de riego, notificar de posibles problemas en el riego y almacenar la información actual e histórica del riego.

Ensayos preliminares de Koech et al. (2014) demostraron que estos sistemas son efectivos para mejorar la eficiencia en el uso del agua (Smith et al., 2016). Este sistema se ha adoptado masivamente en el sur de Australia y en California (Gillies et al., 2010). Algunos autores han reportado eficiencias de aplicación de agua de hasta un 90 % (Smith et al., 2016). Por ejemplo, en el caso del riego por surcos en Australia, (Raine y Bakker, 1996; Smith et al., 2005) encontraron eficiencias de aplicación para riegos de surcos individuales de 50 %, y una eficiencia de aplicación promedio aproximada al 75 % en algodón, utilizando la tecnología de automatización del riego (Smith et al., 2005).

La primera experiencia en el uso de estas tecnologías para el arroz en Italia (Masseroni et al., 2018), logró demostrar una mejora sustancial en la eficiencia del tiempo que los trabajadores dedican al riego y un manejo del agua completamente controlado y eficiente.

Nivelación: sistemas con pendientes variables

En U.S.A. la nivelación fue reportada como la técnica que más impacto tiene en el ahorro del gasto de agua, sin afectar el rendimiento de arroz (Massey et al., 2014). Sin embargo, su implementación está limitada por los altos costos que esta tecnología implica. Existen nuevas técnicas de nivelación de precisión con pendiente variable, las cuales están siendo evaluadas en Uruguay (Bueno et al., 2020). Se indica que éstas permitirían disminuir los costos, realizar menos taipas y más rectas, lo que facilitaría la implementación de esta tecnología en cultivos comerciales. Estas técnicas permitirían regar en forma más eficiente y uniforme el cultivo de arroz y facilitarían la implementación de manejos alternativos de riego.

Monitoreo de riego con imágenes satelitales y drones

El uso de drones en campos de arroz permite obtener información de alta calidad a un bajo costo, facilitando la detección rápida de zonas con problemas de riego, enfermedades y/o fertilización, lo que ayudaría a la toma de decisiones de manejo y a la mejora de rendimientos (Carracelas et al., 2017a). Actualmente, existen programas disponibles que permiten la automatización de los vuelos (DeoneDeploy, Micasense Atlas Flight) y el monitoreo de los campos de arroz. El uso de cámaras multiespectrales y termales en drones puede ser utilizado, a su vez, para el monitoreo del riego y fertilización nitrogenada. Existen muchas plataformas satelitales que permiten la obtención de imágenes satelitales, sin o a un bajo costo, que pueden ser utilizadas para monitorear el manejo del riego en el cultivo de arroz (Hornbuckle y Carracelas, 2019).

Riego presurizado para el cultivo del arroz

El riego por aspersión es una de las técnicas de riego que permiten lograr importantes ahorros de agua en comparación con las técnicas actuales de riego por inundación (Stevens et al., 2012). Sin embargo, muchos agricultores que intentaron implementar este sistema para el cultivo del arroz han fracasado, debido a dificultades relacionadas con la mayor frecuencia de enfermedades en el cultivo, mayor presencia de malezas y problemas asociados con el avance del equipo en suelos pesados saturados de agua. El costo de la energía eléctrica puede llegar a ser otra limitante a considerar en la incorporación de esta tecnología para el riego del arroz (Stone y Schlegel, 2006). En U.S.A. (Stevens et al., 2012; Vories et al., 2013) como en Brasil (Crusciol et al., 2012) y Pakistán (Kahlown et al., 2007), la utilización de riego por aspersión mediante pivote ha mostrado tener buenos resultados, con rendimiento en grano de arroz similares al cultivo bajo inundación. En algunas experiencias realizadas en Brasil, se han obtenido rendimientos de 8,8 t ha⁻¹, lo que corresponde a un 87 % de la productividad observada en condiciones de inundación, con un uso de

agua de riego de $5.340 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Sin embargo, se debe tener en consideración que la presencia de precipitaciones en la etapa reproductiva suplementa cerca de un 40 % la demanda hídrica (Pinto et al., 2020).

Una experiencia realizada en Japón, manteniendo el cultivo durante todas sus etapas de desarrollo en condiciones aeróbicas y con riego de 30 a 40 mm cuando la tensión en el suelo a 20 cm era menor a -60 kPa, no mostró mayores diferencias en los rendimientos, respecto al cultivo mantenido en condiciones de inundación, obteniéndose un rendimiento promedio entre 7,5 y 9,4 t ha^{-1} (Kato et al., 2009). Por otro lado, ensayos realizados en la India muestran una disminución en los rendimientos de un 24,6 % en comparación con el riego convencional. Los autores reportaron un ahorro de agua cercano al 20 %. Las disminuciones en el rendimiento se debieron a la disminución del número de granos por panícula y no a un incremento en la esterilidad floral o disminución del peso de los mil granos. Respecto a la productividad, se observó una gran diferencia entre el sistema convencional de riego por inundación respecto al riego aeróbico, alcanzándose entre 0,75 y 0,96 kg m^{-3} , lo cual fue casi cuatro veces mayor a lo observado en el riego convencional.

El sistema de riego por aspersión es una alternativa más para el cultivo del arroz que puede ser implementada, tomándose en cuenta las condiciones climáticas del sitio donde se quiere implementar, el tipo de suelo y las variedades comerciales disponibles, con el fin de lograr un resultado óptimo.

Consideraciones finales

Considerando que el arroz es el cereal de mayor consumo de agua y, a que, este el recurso es un bien cada vez más escaso, es necesario contar con técnicas de riego que permitan utilizar el agua de manera más eficiente. A nivel mundial, la técnica de riego más eficiente para el cultivo del arroz es el riego por aspersión, seguida del riego por mangas o politubos asociado al riego intermitente. Si bien la implementación de estas tecnologías requiere de una gran inversión en infraestructura y un fuerte componente de capacitación de agricultores arroceros, la adopción de estas tecnologías permitirá lograr un salto significativo en el mejor uso del agua, lo que tendrá grandes beneficios ambientales y productivos.

Referencias

- Battello, C., Uruga, R., Gonnet, D., et al. 2009. Guía de buenas prácticas en el cultivo de arroz en Uruguay. Asociación Cultivadores de Arroz (ACA), Gremial de Molinos Arroceros (GMA); Universidad de la República (UDELAR)/Facultad de Agronomía; Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA); Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), Montevideo, Uruguay.
- Beare, S., Heaney, A. 2002. Climate change and water resources in the Murray Darling Basin, Australia. Impacts and possible adaptation. ABARE Conference Paper 02.11. 33 p. 2002 World Congress of Environmental and Resource Economists, Monterey, California. 24-27 June. Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics (ABARE), Canberra, Australia.
- Becerra, C., Díaz, A., García, E. 2019. Análisis situacional cadena productiva del arroz en Colombia. Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), Bogotá, Colombia.
- Beecher, H.G., Hume, I.H., Dunn, B.W. 2002. Improved method for assessing rice soil suitability to restrict recharge. *Aust. J. Exp. Agric.* 42:297-307.
- Blanco, F., Chebataroff, N., Deambrosi, E., et al. 1984. Riego. Arroz-Soja. p. 111-116. Blanco, F., Chebataroff, N., Deambrosi, E., et al. (eds.) Resultados de la experimentación regional en cultivos. 1983-84. CIAAB, EEE, Treinta y Tres, Uruguay.

- Bandeira, S., Böcking, B. 2014. Riego de arroz por mangas. Grupo de Desarrollo de Riego, Donistar S.C., Salto, Uruguay.
- Bouman, B.A.M., Humphreys, E., Tuong, T.P., et al. 2007a. Rice and water. *Adv. Agron.* 92:187-237.
- Bouman, B.A.M., Lampayan, R.M., Tuong, T.P. 2007b. Water management in irrigated rice: coping with water scarcity. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños. Philippines.
- Bouman, B.A.M., Tuong, T.P. 2001. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. *Agric. Water Manage.* 49:11-30.
- Bueno, M., Roel, A., Faria, L., et al. 2020. Applying geotechnologies for grain yield intensification and diversification in Uruguay. In *Int. Temp. Rice Conf. 7.*, Pelotas, RS. 9-12 February. Science & Innovation: feeding a world of 10 billion people: proceedings. Embrapa, Pelotas, RS, Brasil.
- Cabangon, R.J., Tuong, T.P., Castillo, E.G., et al. 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 Environ.* 2:195-206.
- Carracelas, G., Cora, P., Ferres, S. 2017a. Monitoreo de prácticas de manejo de riego en chacras comerciales. p. 56-59. En Zorrilla, G., Martínez, S., Saravia, H. (eds.) *Arroz 2017. Serie Técnica Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria*, Montevideo, Uruguay.
- Carracelas, G., Guilpart, N., Cassman, K. 2017b. Yield potential and yield gaps of irrigated rice in Uruguay and other rice producing countries. p. 7. In *International Temperate Rice Conference*, Griffith, NSW, Australia. 6-9 March. Griffith, NSW, Australia, 2017. Rice Research Development Committee (RRDC), Australia.
- Carracelas, G., Guilpart, N., Grassini, P., et al. 2019a. Potencial y brecha de rendimiento de arroz irrigado en Uruguay y otros países arroceros. *INIA Serie Técnica 250:53-56. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA)*, Montevideo, Uruguay.
- Carracelas, G., Hornbuckle, J., Rosas, J., et al. 2019b. Irrigation management strategies to increase water productivity in *Oryza sativa* (rice) in Uruguay. *Agric. Water Manage.* 222:161-172.
- Carracelas, G., Hornbuckle, J., Verger, M., et al. 2019c. Irrigation management and variety effects on rice grain arsenic levels in Uruguay. *J. Agric. Food Res.* 2019:100008.
- Carrijo, D.R., Akbar, N., Reis, A.F.B., et al. 2018. Impacts of variable soil drying in alternate wetting and drying rice systems on yields, grain arsenic concentration and soil moisture dynamics. *Field Crops Res.* 222:101-110.
- Carrijo, D.R., Lundy, M.E., Linqvist, B.A. 2017. Rice yields, and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. *Field Crops Res.* 203:173-180.
- Cartwright, R., Lee, F. 2001. Management of rice diseases. p. 87-97. In Slaton N. (ed.) *Rice production handbook. Arkansas Coop. Ext. Serv. University of Arkansas*, Little Rock, Arkansas, USA.
- Choi, J.D., Park, W.J., Park, K.W., et al. 2013. Feasibility of SRI methods for reduction of irrigation and NPS pollution in Korea. *Paddy Water Environ.* 11(1):241-248.
- Counce, P.A., Keisling, T.C., Mitchell, A.L., 2000. A uniform and adaptative system for expressing rice development. *Crop Sci.* 40:436-443.
- Crusciol, C., Toledo, M., Arf, O., et al. 2012. Water supplied by sprinkler irrigation system for upland rice seed production. *Biosci. J.* 28:34-42.
- DANE-Fedearroz. 2017. Cuenta Satélite de la agroindustria del arroz, informe 2012-2016. Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Bogotá, Colombia.
- Dassanayake, D., Dassanayake, K., Malano, H., et al. 2009. Water saving through smarter irrigation in Australian dairy farming: use of intelligent irrigation controller and wireless sensor network. p. 4409-4417. In *18th World IMACS/MODSIM Congress*, Cairns, Australia. 13-17 July. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Canberra, Australia.

- Datta, A., Ullah, H., Ferdous, Z. 2017. Water management in rice. p. 255-277. In Chauhan, B.S., Jabran, K., Mahajan, G. (eds.) Rice Production Worldwide. Springer International Publishing, New York, USA.
- de Avila, L. A., Martini, L. F. D., Mezzomo, R. F., et al. 2015. Rice water use efficiency and yield under continuous and intermittent irrigation. *Agron. J.* 107:442-448.
- De Laulanie H. 1993. Technical presentation of the system of rice intensification based on Katayama's tillering model. *Tropicultura* 13:1.
- DIEA. MGAP. 2019. Anuario estadístico 2000-2019. Oficina de Estadísticas Agropecuarias (DIEA), Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca MGAP), Montevideo, Uruguay. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-diea-2019> (acceso 2019).
- Donoso, G., Becerra, V., Uribe, H., et al. 2019. Nuevas herramientas para mejorar la gestión del agua en el sector arrocero de Chile. *Tierra adentro. Especial Gestión Hídrica (Chile)* 111:41-45.
- Dunn, B.W., Gaydon D.S. 2011. Rice growth yield and water productivity responses to irrigation scheduling prior to the delayed application of continuous flooding in South-East Australia. *Agric. Water Manage.* 98:1799-1807.
- FAO. 2018. AQUASTAT. AQUASTAT Main Database, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/results.html> (acceso Julio 2018).
- Fedearroz. 2012. Adopción masiva de tecnología (AMTEC). Guía de usuario. Federación Nacional de Arroceros (Fedearroz), Bogotá, Colombia.
- Ferichani, M., Prasetya, D.A. 2011. Institutionalization on system of rice intensification (SRI): socio-economic aspects. *J. Crop Weed* 7:12-16.
- Garrity, D.P., O'Toole, J.C. 1994. Screening rice for drought resistance at the reproductive phase. *Field Crops Res.* 39:99-110.
- Gaydon, D.S., Beecher, H.G., Reinke, R., et al. 2010. Rice. p. 67-83. In Stokes, C.J., Howden, S.M. (eds.) *Adapting Australian agriculture to climate change*. CSIRO Publishing, Clayton, Victoria, Australia.
- Gillies, M.H., Smith, R.J., Williamson, B., et al. 2010. Improving performance of bay irrigation through higher flow rates. In: Conference: Irrigation Australia Conference and Exhibition - One Water Many Futures, Sydney, Australia.
- G&M Poly. 2018. Aquator. G&M Poly, Cohuna, Victoria, Australia. <http://gmpoly.com.au/product-range/aquator> (acceso 10-02-2018).
- González, M., Saldarriaga, G., Jaramillo, O. 2014. Estimación de la demanda de agua: Conceptualización y dimensionamiento de la demanda hídrica sectorial. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Bogotá, Colombia.
- Govindan, R., Grace, T. M., 2012. Influence of drip fertigation on growth and yield of rice varieties (*Oryza sativa* L.) *Madras Agric. J.* 99:244-247.
- Grassi, C., Bouman, B.A.M., Castaneda, A.R., et al. 2009. Aerobic rice: crop performance and water use efficiency. *J. Agric. Environ. Int. Dev.* 103:259-270.
- GRISP (Global Rice Science Partnership). 2013. p. 164-168. In *Rice almanac*, 4th edition. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Philippines.
- He, G., Wang, Z.H., Cui, Z.L. 2020. Managing irrigation water for sustainable rice production in China *J. Clean. Prod.* 245:118928.
- Henríquez, R., Henríquez, E. Sepúlveda, D., et al. 2018. Manual de manejos bajo el sistema de siembra directa con taipas en arroz en Chile. Serie estudios para la innovación FIA. Fundación para la Innovación Agraria, Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile.

- Herrera-Puebla, J., Hervis-Granda, G., González-Robaina, F., et al. 2019. Estudio sobre el balance hídrico del arroz en Cuba. *Rev. Ing. Agríc.* 9:48-59.
- Hornbuckle, J., Carracelas, G. 2019. Herramientas tecnológicas para optimizar el manejo del riego en arroz. En Jornada, 6 de septiembre. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Tacuarembó, Uruguay. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/13301/1/G.-Carracelas-Presentacion-J.Hornbuckle.pdf>.
- Humphreys, E., Meisner, C., Gupta, R., et al. 2005. Water saving in rice-wheat systems. *Plant Prod. Sci.* 8:242-258.
- Humphreys, E., Robinson, D. 2004. Improving water productivity in rice cropping systems in Australia: institutions and policy. p. 885-900. In Mew, T.W., Bar, D.S., Peng, S., et al. (eds.) *Rice science: innovations and impact for livelihood*. Proceedings of the International Rice Research Conference, Beijing, China. September 2002. International Rice Research Institute, Chinese Academy of Engineering and Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing, China.
- IPCC. 2000. Emissions scenarios - Summary for policymakers. Special Report on Emissions Scenarios (SRES). A Special Report of IPCC Working Group III. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Switzerland.
- Kahlowan, M., Raoof, A., Zubair, M., et al. 2007. Water use efficiency and economic feasibility of growing rice and wheat with sprinkler irrigation in the Indus Basin of Pakistan. *Agric. Water Manage.* 87:292-298.
- Kato, Y., Okami, M., Katsura, K. 2009. Yield potential and water use efficiency of aerobic rice (*Oryza sativa* L.) in Japan. *Field Crops Res.* 113:328-334.
- Koech, R.K., Smith, R.J., Gillies, M.H. 2014. A real-time optimization system for automation of furrow irrigation. *Irrig. Sci.* 32:319-327.
- Kool, D., Agam, N., Lazarovitch, N. 2014. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agric. For. Meteorol.* 184:56-70.
- Lampayan, R., Bouman, B., de Dios, J., et al. 2003. Adoption of water saving technologies in rice production in the Philippines. Extension Bulletin 548. 15p. Food and Fertilizer Technology Center, Taipei, Taiwan.
- Lampayan, R.M., Bouman, B.A.M., De Dios, J.L., et al. 2005. Transfer of water saving technologies in rice production in the Philippines p. 112-132. In Thiyagarajan, T.M., Hengsdijk, H., Bindraban, P. (eds.) *Proceedings of the International Symposium on Transitions in Agriculture for Enhancing Water Productivity*, Tamil Nadu, India.
- Lampayan, R.M., Rejesus, R.M., Singleton, G.R., et al. 2015. Adoption and economics of alternate wetting and drying water management for irrigated lowland rice. *Field Crops Res.* 170:95-108.
- Li, Y., Barker, R. 2004. Increasing water productivity for paddy irrigation in China. *Paddy Water Environ.* 2:187-193
- Lin, X., Zhu, D., Lin, X. 2011. Effects of water management and organic fertilization with SRI crop practices on hybrid rice performance and rhizosphere dynamics. p. 33-39. In Masumoto, T. *Paddy and water.environment*. Vol 9. Springer, Berlin, Germany.
- Linguist, B. A., Anders, M. M., Adviento-Borbe, M.A., et al. 2015. Reducing greenhouse gas emissions, water use, and grain arsenic levels in rice systems. *Glob. Chang. Biol.* 21:407-417.
- Luo, L.J. 2010. Breeding for water-saving and drought-resistance rice (WDR) in China. *J. Exp. Bot.* 31:3509-3517.
- MADR y CIAT. 2015. Análisis integral de sistemas productivos en Colombia para la adaptación al cambio climático. CONVENIO MADR-CIAT 20120382, Cali, Colombia.
- Marchesi, C., Chauhan, B.S. 2019. The efficacy of chemical options to control *Echinochloa crus-galli* in dry-seeded rice under alternative irrigation management and field layout. *Crop Prot.* 118:72-78.

- Masseroni, D., Moller, P., Tyrell, R. 2018. Evaluating performances of the first automatic system for paddy irrigation in Europe. *Agric. Water Manage.* 201:58-69.
- Massey, J.H., Smith, M.C., Vieira, D.A.N., et al. 2018. Expected irrigation reductions using multiple-inlet rice irrigation under rainfall conditions of the Lower Mississippi River Valley. *J. Irrig. Drain. Eng.* 144:1-13.
- Massey, J.H., Walker, T.W., Anders, M.M., et al. 2014. Farmer adaptation of intermittent flooding using multiple-inlet rice irrigation in Mississippi. *Agric. Water Manage.* 146:297-304.
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. 2016. Sustainability: Four billion people facing severe water scarcity. *Sci. Adv.* 2:e1500323.
- Muirhead, W.A., Blackwell, J., Humphreys, E., et al. 1989. The growth and nitrogen economy of rice under sprinkler and flood irrigation in South East Australia. *Irrig. Sci.* 10:183-199.
- Niblack, M., Sánchez, C.A., 2008. Automation of surface irrigation by cut-off time or cut-off distance control. *Trans. ASABE.* 24:611-614.
- Nie, L., Peng, S. 2017. Rice Production in China. p. 33-52. In Chauhan, B., Jabran, K., Mahajan, G. (eds.) *Rice Production Worldwide*, Springer International Publishing, New York, USA 2017.
- Nishiuchi, S., Takaki, Y., Takahashi, H., et al. 2012. Mechanisms for coping with submergence and waterlogging in rice. *Rice* 5:2.
- Paredes, M., Becerra, V., Donoso, G., et al. 2015. Evaluación preliminar de genotipos de arroz bajo dos sistemas de manejo de agua. 66° Congreso Agronómico SACH y 13° SOCHIFRUT. 17-20 de noviembre, Valdivia, Chile. Sociedad Agronómica de Chile (ACH) y Sociedad Chilena de Fruticultura (SOCHIFRUT), Santiago, Chile.
- Parent, B., Suard, B., Serraj, R., et al. 2010. Rice leaf growth and water potential are resilient to evaporative demand and soil water deficit once the effects of root system are neutralized. *Plant Cell Environ.* 33:1256-1267.
- Pimentel, D., Berger, B., Filiberto, D., et al. 2004. Water resources: Agricultural and environmental issues. *Bioscience* 54:909-918.
- Pinto, M., Parfitt, J., Timm, L. et al. 2020. Sprinkler irrigation in lowland rice: Crop yield and its components as a function of water availability in different phenological phases. *Field Crops Res.* 248 (107714).
- Praba, M.L., Cairns J.E., Babu, R.C., et al. 2009. Identification of physiological traits underlying cultivar differences in drought tolerance in rice and wheat. *J. Agron. Crop Sci.* 195:30-46.
- Quezada, C., Hernaíz, S., Stolpe, N., et al. 2011. Efecto del método de riego intermitente en componentes de rendimiento y manejo del agua en once genotipos de arroz (*Oryza sativa* L.). *Chil. J. Agric. Anim. Sci.* 27:105-115.
- Raine, S.R., Bakker, D.M. 1996. Increased furrow irrigation efficiency through better design and management of cane fields. In *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists.* pp 119125.
- Ramesh, P., Vengatesan, D., Natrajan, S. 2019. SRI - A system of cultivation for increasing the knowledge level of the paddy farmers. *Plant Arch.* 19:2247-2250.
- Rao, R. 2011. Estimation of efficiency, sustainability and constraints in SRI (system of rice intensification) vis-a-vis traditional methods of paddy cultivation in north coastal zone of Andhra Pradesh. *Agric. Econ. Res. Rev.* 24:325-331.
- Rao, K.V.R., Gangwar, S., Keshri, R. 2017. Effects of drip irrigation system for enhancing rice (*Oryza sativa* L.) yield under system of rice intensification management. *Appl. Ecol. Environ. Res.* 15:487-495.
- RGA. 2020. Rice and water. Rice Growers Association of Australia (RGA), Leeton, New South Wales, Australia.

- RKB. 2020. How to manage water. Rice Knowledge Bank (RKB). Disponible en <http://www.knowledgebank.irri.org/step-by-step-production/growth/water-management> (acceso 18 marzo 2020).
- Rubicon Water. 2020. Rubicon, Melbourne, Victoria, Australia. Disponible en: <https://www.rubiconwater.com/catalogue/farmconnect/> (acceso 19-03-2020).
- Seck, P.A., Diagne, A., Mohanty, S., et al. 2012. Crops that feed the world 7: Rice. Food Sec. 4:7-24.
- Shahidian, S., Serralheiro, R. 2012. Development of an adaptive surface irrigation system. Irrig. Sci. 30:69-81.
- Smith, M.C., Massey, J.H., Branson, J., et al. 2007. Water use estimates for various rice production systems in Mississippi and Arkansas. Irrig. Sci. 25:141-147.
- Smith, R.J., Raine, S.R., Minkovich, J. 2005. Irrigation application efficiency and deep drainage potential under surface irrigated cotton. Agric. Water Manage. 71:117-130.
- Smith, R.J., Uddin, J.M., Gillies, M.H., et al. 2016. Evaluating the performance of automated bay irrigation. Irrig. Sci. 34:175-185.
- Stevens, G., Rhine, M., Heiser, J. 2018. Rice production with furrow irrigation in the Mississippi River Delta region of the USA. p. 69-82. In Shah, F., Khan, Z.H., Iqbal, A. (eds.) Rice crop - current developments. IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.74820.
- Stevens, G., Vories, E., Heiser J., et al. 2012. Experimentation on cultivation of rice irrigated with a center pivot system. p. 233-254. In Lee, T.S. (ed.) Irrigation systems and practices in challenging environments. IntechOpen. doi:10.5772/30502.
- Stone, L.R., Schlegel, A.J. 2006. Crop water use in limited-irrigation environments. p. 173-184. In Proceedings of the 2006 Central Plains Irrigation Conference, Colby, KS. 21-23 Feb. Central Plains Irrig. Assoc., Colby, Kansas, USA.
- Tabbal, D.F., Bouman, B.A.M., Bhuiyan, S.I., et al. 2002. On-farm strategies for reducing water input in irrigated rice; case studies in the Philippines. Agric. Water Manage. 56:93-112.
- Tarlera, S., Capurro, M.C., Irisarri, P., et al. 2016. Yield-scaled global potential of two irrigation management systems in a highly productive rice systems. Sci. Agric. 73:43-50.
- Tuong, P., Bouman, B.A.M., Mortimer, M. 2005. More rice, less water—integrated approaches for increasing water productivity in irrigated rice-based systems in Asia. Plant Prod. Sci. 8:231-241.
- Tuong, T.P., Bouman B.A.M., 2003. Rice production in water scarce environments. p. 53-67. In Kijjn, J., Barker, R., Molden, D. (eds.) Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement. CABI Publishing, Wallingford, UK.
- Tuong, T.P., Cabangon, R.J., Wopereis, M.C.S. 1996. Quantifying flow processes during land soaking of cracked rice soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 60:872-879.
- Vanitha, K., Mohandass, S. 2014. Effect of humic acid on plant growth characters and grain yield of drip fertigated aerobic rice (*Oryza sativa* L.) Bioscan. 9:45-50.
- Vories, E.D., Stevens W.E., Tacker, P.L., et al. 2013. Rice production with center pivot irrigation. Appl. Eng. Agric. 29:51-60.
- Williams, R.L., Angus, J.F., 1994. Deep floodwater protects high nitrogen rice crops from low temperature damage. Aust. J. Exp. Agric. 34:927-932.