

MEJORANDO LA EFICIENCIA DEL RIEGO DE ARROZ: ESTIMACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL MEDIANTE EL USO DE UN MODELO DE BALANCE HÍDRICO.

D. Rivero¹; G. Cantou²; R. Hayashi³; M. Oxley⁴; A. Roel⁵

Palabras claves: Riego por inundación, Eficiencia uso del agua, Caudalímetros

Introducción

En Uruguay varios trabajos han medido el uso del agua del cultivo de arroz reportando valores entre 8,000 y 15,000 m³ ha⁻¹ según el año y la región (Battello et al., 2009; Böcking et al., 2008; Roel et al., 2011; Lavecchia et al., 2011; Riccetto et al., 2017). Sin embargo, muy poco se conoce acerca de cuándo y cuanto de ese volumen de agua total utilizado escurre superficialmente a lo largo del ciclo del cultivo. Este conocimiento es clave para el diseño de sistemas eficientes en el uso del agua del cultivo.

La medición directa de este escurrimiento superficial presenta desafíos técnicos debido a la alta amplitud en los caudales generados, lo que dificulta la instalación masiva de sistemas capaces de medir con precisión estas salidas de agua utilizándose muy variadas metodologías que en muchos casos son muy costosas de implementar (Zhao et al., 2015).

Un enfoque utilizado para estimar las salidas de agua es el modelo de balance hídrico, el cual integra componentes de entrada (riego y precipitación) y componentes de salida (evapotranspiración, percolación, infiltración lateral y escurrimiento). Este método no solo optimiza el uso de los recursos, sino que también ofrece un marco flexible y escalable aplicable a una amplia gama de condiciones y escalas de estudio.

La región templado-subtropical de América del Sur representa una proporción significativa de la producción de arroz en América Latina. Sin embargo, hasta donde sabemos y con base en una revisión exhaustiva de la literatura, no existen estudios que hayan validado un enfoque de balance hídrico diario para estimar el escurrimiento superficial en sistemas de arroz inundado dentro de esta región. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo calibrar y validar una metodología para estimar el escurrimiento superficial mediante un modelo de balance hídrico diario que integra datos de los componentes a partir de mediciones directas, estimaciones basadas en modelos e información científica relevante adaptada a las condiciones locales.

Materiales y Métodos

El experimento de campo se llevó a cabo sobre una plataforma de rotaciones de largo plazo instalada en 2012 en la Unidad Experimental Paso de la Laguna en el Este de Uruguay (33°16'22"S, 54°10'22"W). Se trabajó en parcelas de 20 m de ancho y 60 m de largo (unidad experimental), las mismas estaban delimitadas en el contorno por diques de suelo, de sección trapezoidal con 1 m de base mayor, 0.40 m de base menor y 0.15-0.2 m de altura. Cada parcela fue diseñada como una unidad autónoma, las cuales tienen una entrada de riego y una salida de agua superficial independiente.

¹ Ing. Agr., Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, 33000 Villa Sara, Treinta y Tres, Uruguay, diegorivero1996@gmail.com

² Ph.D., Centro Universitario Regional Este, UDELAR, guillermina.cantou@cure.edu.uy

³ Ph.D., Facultad de Agronomía, UDELAR, rhayashi@fagro.edu.uy

⁴ Tec., Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, aoxley@inia.org.uy

⁵ Ph.D., Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, aroel@inia.org.uy

Para cada año se seleccionaron cuatro parcelas provenientes de dos rotaciones diferentes: dos correspondían al primer año de arroz de una rotación Arroz-Pasturas (Az-Pa), que consiste en cuatro años de pastura y dos años de arroz y dos correspondían a la rotación Arroz-Arroz (Az-Az), que implica la siembra de arroz cada año. Este último sistema no se aplica en Uruguay, pero se estudió con el objetivo de generar distintos contrastes de intensidad, dado que es uno de los sistemas de mayor relevancia a nivel global.

Las variables meteorológicas (precipitación, evapotranspiración y evaporación del tanque A), se obtuvieron de la estación meteorológica ubicada en el mismo sitio donde está instalado el experimento y en las parcelas experimentales se midieron las siguientes variables: riego, altura de lámina de agua, escorrentimiento superficial y drenaje final (agua que se libera de la parcela en algunos años con el objetivo de cosechar con el suelo seco).

Se utilizó una base de datos de dos años (2021 y 2022) para el ajuste del modelo de balance hídrico utilizando la altura de la lámina de agua observada en comparación a la simulada por el modelo. Las variables ajustadas fueron la filtración lateral, percolación, evapotranspiración y precipitación efectiva. Durante estos años la estimación de la salida de agua superficial se realizó utilizando el valor de la altura de lámina de agua como un indicador del escorrentimiento superficial. En el año 2023, se instalaron equipos específicos para la medición directa del escorrentimiento superficial, con el objetivo de validar el modelo previamente ajustado. Estos equipos permitieron obtener datos con mayor precisión del volumen de agua que salía de las parcelas por escorrentimiento superficial, lo cual fue fundamental para evaluar la precisión del modelo de balance hídrico desarrollado en los años anteriores. La validación del modelo consistió en comparar las estimaciones de escorrentimiento superficial obtenidas a través del balance hídrico con las mediciones directas realizadas durante este año.

Resultados y Discusión

Profundidad de lámina de agua observada vs. estimada

La profundidad de la lámina de agua es una variable clave para evaluar el desempeño general del modelo de balance hídrico, ya que su comportamiento resulta del cálculo de todos los componentes diarios de entrada y salida del sistema. La profundidad diaria de agua simulada por el modelo calibrado mostró una correlación significativa ($p < 0.001$) con las mediciones de campo obtenidas tanto de forma manual (utilizando una regla) como mediante sensores ultrasónicos. En todos los años y tratamientos, los coeficientes de correlación (r) superaron 0.8. El modelo demostró un excelente desempeño predictivo, con un coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) superior a 0.78.

Estimación del escorrentimiento utilizando el modelo de balance hídrico

Dado que el desempeño del modelo de balance hídrico calibrado (Ecuación 1) fue satisfactorio al replicar el comportamiento de la lámina de agua, se utilizó para estimar el escorrentimiento superficial en 2023, año en el que esta variable fue medida. El modelo calibrado mostró una fuerte capacidad para estimar el escorrentimiento superficial, reproduciendo con precisión la tendencia general de los datos medidos en campo. La correlación entre los valores simulados y observados fue significativa ($r = 0.79$; $p < 0.001$).

$$O(t) = Wd(t - 1) + (I(t) + R(t)) - (0.3(t) + 1(t) + ET(t)) \quad (1)$$

Donde:

O → Escorrentimiento superficial (mm)

0.3 → Perdida laterales (mm)

Wd → Altura de la lámina de agua (mm)
 R → Precipitación efectiva (mm)
 I → Riego (mm)

1 → Percolación (mm)
 ET → Evaporación total de la parcela (mm)

Análisis del escurrimiento

El escurrimiento superficial total (incluyendo escurrimiento y drenaje final) fue de 234 mm en 2021, 214 mm en 2022 y 96 mm en 2023. Estos valores representaron el 18 % del ingreso total de agua en 2021, 15 % en 2022 y 7.5 % en 2023. La Tabla 1 diferencia la contribución de las distintas fuentes de escurrimiento al escurrimiento superficial total. Los datos promedio de los tres años muestran que el 35.3 % del escurrimiento superficial fue causado por la lluvia, 34 % por el drenaje final y 30.7 % por el riego. La lluvia y el drenaje final representaron la mayor parte del escurrimiento superficial, en línea con lo encontrado por Xu et al. (2020) en un arrozal de la cuenca del lago Taihu, quienes reportaron que el 47.3 % del escurrimiento fue causado por la lluvia, 29.8 % por el drenaje y 22.9 % por el riego.

La desagregación de las fuentes de escurrimiento (Tabla 1) revela resultados con importantes implicancias para la gestión del agua. En primer lugar, destaca la alta contribución del drenaje final al escurrimiento total. Este evento puede tener implicancias ambientales relevantes debido al gran volumen de agua liberado en un corto período de tiempo. En segundo lugar, es destacable la significativa contribución del riego al escurrimiento superficial, representando en promedio aproximadamente un tercio del escurrimiento total en los tres años evaluados, incluso bajo las condiciones de manejo controlado de este estudio. Por último, aunque el escurrimiento inducido por la precipitación y el inducido por el riego aportaron en forma similar al escurrimiento superficial total, difirieron significativamente en el volumen de escurrimiento por evento. En este sentido, los eventos de escurrimiento generados por la precipitación tendieron a ser menos frecuentes, pero de mayor magnitud, lo que los hace más difíciles de prevenir. En cambio, los eventos de escurrimiento inducidos por el riego ocurrieron con mayor frecuencia, pero implicaron volúmenes menores.

Tabla 1

Escurrimiento total para los tres años evaluados (2021, 2022 y 2023), desglosado según el escurrimiento inducido por riego, eventos de precipitación o drenaje final.

	Año			
	2021	2022	2023	Promedio
Escurrimiento total (mm)	234	214	96	
Escurrimiento por riego (%)	22	37	33	30.7
Escurrimiento por precipitación (%)	35	34	37	35.3
Drenaje final (%)	43	29	30	34

Conclusiones

El modelo diario de balance hídrico ajustado y validado en este estudio demostró ser una herramienta confiable y práctica para estimar el escurrimiento superficial. La combinación de un modelo de balance hídrico calibrado localmente con la integración de datos climáticos, mediciones

de agua de riego y monitoreo periódico de la lámina de agua resultó efectiva para estimar el momento y el volumen del escurrimiento superficial a lo largo del ciclo del cultivo. Los resultados indicaron que el escurrimiento superficial total representó entre el 7.5 % y el 18 % del total de agua ingresada al sistema. Este hallazgo pone en evidencia oportunidades de mejora en la gestión del agua, particularmente en el escurrimiento inducido por el riego, que fue más frecuente, pero de menor magnitud, y que podría reducirse mediante prácticas de manejo hídrico más precisas. En cambio, los eventos de precipitación generaron picos de escurrimiento más pronunciados, lo que representa un desafío mayor para la gestión del agua y la prevención de la contaminación de aguas superficiales.

Referencias

- BATTELLO, C. et al. Guía de buenas prácticas en el cultivo de arroz en Uruguay. Montevideo (Uy): Asociación Cultivadores de Arroz (ACA); GMA (Gremial de Molinos Arroceros); Universidad de la República (UDELAR)/Facultad de Agronomía; INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria); LATU (Laboratorio Tecnológico del Uruguay), 2009. 32 p.
- BÖCKING, B. et al. Manejo del cultivo. Riego intermitente: una alternativa que debemos ir incorporando en nuestros sistemas de riego. Resumen de tres años de trabajos sobre el tema. Resultados experimentales arroz zafra 2007-2008. (INIA. Serie Actividades de Difusión; 543). INIA, Tacuarembó (Uy), 2008. p. 73–96.
- LAVECCHIA, A. et al. Manejo del cultivo: riego. Resultados experimentales de arroz zafra 2010–2011. (INIA. Serie Actividades de Difusión; 652). INIA, Artigas-Tacuarembó (Uy), 2011. p. 1–7.
- RICCETTO, S. et al. Estrategias para minimizar el consumo de agua del cultivo de arroz en Uruguay manteniendo su productividad. Agrociencia Uruguay, Montevideo, v. 21, n. 1, p. 109–119, 2017. ISSN 1510-0839. Disponible em: <https://doi.org/10.31285/AGRO.21.1.13>. Acceso el: 28 mayo 2025.
- ROEL, A. et al. Manejo del riego: productividad del agua. INIA Treinta y Tres. Arroz: resultados experimentales 2010-2011. (INIA. Serie Actividades de Difusión; 651). INIA, Treinta y Tres (Uy), 2011. p. 1–9. C.2.
- XU, Y. Q. et al. Analysis of the water balance and the nitrogen and phosphorus runoff pollution of a paddy field in situ in the Taihu Lake basin. Paddy and Water Environment, [S.I.], v. 18, p. 385–398, 2020. Disponible em: <https://doi.org/10.1007/s10333-020-00789-5>. Acceso el: 28 mayo 2025.
- ZHAO, Y. et al. Influence of wet-dry cycles on the temporal infiltration dynamic in temperate rice paddies. Soil and Tillage Research, [S.I.], v. 154, p. 14–21, 2015. Disponible em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.009>. Acceso el: 28 mayo 2025.