

EVALUACIÓN DE LOS CAUDALES AMBIENTALES EN UNA CUENCA AGRÍCOLA

Andrés Saracho¹, Pablo Gamazo¹, Rafael Navas¹

RESUMEN: El caudal ambiental es el volumen mínimo de agua que debe mantenerse en un río o arroyo para preservar los ecosistemas. Busca equilibrar las necesidades del riego y el ambiente. Es crucial para garantizar la sostenibilidad ambiental y evitar la degradación de los recursos hídricos. Este estudio evalúa los efectos de tres escenarios hipotéticos en el caudal de una cuenca a través de un modelo desarrollado en SWAT. La cuenca tiene un embalse de 12 hectómetros cúbicos, destinado principalmente al riego de arroz y maíz siendo irrigados por inundación y aspersión. Los escenarios incluyen: (1) riego sin restricciones, con caudal ambiental cero; (2) riego con caudal ambiental al 60 % de probabilidad de excedencia; y (3) las condiciones prístinas de la cuenca sin actividades de riego. Se analizaron las probabilidades de no excedencia y la densidad de probabilidad de los caudales. Los resultados muestran que, en comparación con las condiciones prístinas, el escenario de riego presenta un mayor flujo base posiblemente debido a los retornos del agua de riego al cauce. Por otro lado, al implementar el caudal ambiental, el sistema muestra estiajes menos severos y atenuación de los picos, lo que en otras palabras se expresa como reducción de la variabilidad. El análisis de las probabilidades de excedencia por mes evidencia que el caudal ambiental afecta al balance de agua superficial en la cuenca, acercando los caudales a las condiciones naturales, especialmente en los meses críticos de verano (noviembre a marzo). Esto sucede incluso si se compara las probabilidades de excedencia de los caudales tanto en la condición prístina como en riego, se puede notar que ambos escenarios son muy similares siendo el mes más severo en noviembre al comienzo de las operaciones de riego. Los resultados sugieren que los caudales ambientales deberían estar optimizados con las operaciones de riego incluyendo a su vez el impacto aguas abajo del sistema irrigado. La recomendación se hace ya que, en algunas secciones aguas abajo del sistema irrigado, dentro de la cuenca modelada, el flujo base podría ser mayor que en la condición prístina.

PALABRAS CLAVES: caudales ambientales, riego, modelación hidrológica SWAT.

¹Departamento del Agua, CENUR Litoral Norte, Universidad de la República, andressaracho.23@gmail.com

EVALUATION OF ENVIRONMENTAL FLOWS IN AN AGRICULTURAL WATERSHED

ABSTRACT: Environmental flow is the minimum volume of water that must be maintained in a river or stream to preserve ecosystems. It seeks to balance the needs of irrigation and the environment. It is crucial to ensure environmental sustainability and prevent the degradation of water resources. This study evaluates the effects of three hypothetical scenarios on the flow of a watershed. The watershed has a 12-hectare reservoir, primarily allocated for the irrigation of rice and maize, which are irrigated by flooding and sprinkling. The scenarios include: (1) unrestricted irrigation, with zero environmental flow; (2) irrigation with an environmental flow at a 60% exceedance probability; and (3) the pristine conditions of the watershed without irrigation activities. The non-exceedance probabilities and probability density of flows were analyzed. The results show that, compared to pristine conditions, the irrigation scenario presents a higher base flow, possibly due to irrigation water returns to the channel. On the other hand, when implementing environmental flow, the system exhibits less severe droughts and attenuation of peak flows, which, in other words, translates into reduced variability. The analysis of exceedance probabilities per month shows that environmental flow affects the surface water balance in the watershed, bringing flows closer to natural conditions, especially in the critical summer months (November to March). This occurs even when comparing the exceedance probabilities of flows in both pristine and irrigation conditions, where both scenarios are very similar, with November being the most critical month at the beginning of irrigation operations. The results suggest that environmental flows should be optimized alongside irrigation operations, also considering the downstream impact of the irrigated system. This recommendation is made because, in some downstream sections of the irrigated system and within the producer's property, the base flow could be higher than in pristine conditions.

KEYWORDS: environmental flows, irrigation, SWAT hydrological modeling.

INTRODUCCIÓN

En Uruguay en los últimos años ha tenido periodos con escasas de precipitación que provocaron grandes déficit hídricos, consecuencia de los efectos de la Niña (IFRC, 2023). Esta situación ha generado preocupaciones en diversos sectores, especialmente en la gestión del agua para el consumo humano y la producción agropecuaria.

El riego es una práctica esencial para garantizar la producción agrícola en Uruguay, especialmente de cultivos como arroz y maíz, los cuales presentan una alta dependencia del agua para su desarrollo. Según datos del Censo General Agropecuario 2011, el arroz se cultiva con 100% de riego, mientras que el maíz tiene una superficie regada menor, pero en crecimiento en los últimos años (Arenare, 2018). En este contexto la construcción y gestión de embalses para riego es crucial para garantizar la seguridad hídrica en la producción agrícola, especialmente en los periodos de déficit hídrico. Sin embargo, la gestión adecuada de los embalses es clave para asegurar un uso eficiente y sostenible del agua, especialmente en un contexto de cambio climático y aumento de la demanda de agua para la producción agrícola. Para lograr sistemas de producción sostenibles, es necesario minimizar los impactos ambientales asociados a cada actividad sin comprometer el rendimiento del sistema (Moltz et al., 2020).

Un concepto clave para evaluar los impactos ambientales asociados a obras como embalses destinados a riego es el caudal ambiental. Ya que para una buena gestión de los recursos hídricos se busca equilibrar las necesidades ecológicas con las demandas humanas (Arthington et al., 2006). El caudal ambiental es la porción del régimen hidrológico original de un río o cauce que debe mantenerse fluyendo aguas abajo y hacia las planicies de inundación para preservar las características del ecosistema (Tharme, 2003). Por otro lado, el caudal base ocurre en periodos sin precipitaciones, principalmente sostenido por aportes de aguas subsuperficiales, flujos de exceso de agua del riego y/o liberaciones controladas de los embalses en forma de caudal ambiental (Navas et al. 2025). Por ello, la componente de caudal ambiental podría desempeñar un papel significativo en la alteración del caudal base. Para gestionar el recurso hídrico de manera más sostenible y equilibrada, es fundamental considerar tanto los aspectos ecológicos como los sociales, asegurando un balance entre los beneficios ecológicos del caudal ambiental y el valor del agua (Poff et al., 2017).

En Uruguay la determinación de caudal ambiental está regido de manera provisional por lo establecido en el Decreto N° 368/018 de 2018. Para ello se utiliza la

metodología basada en estadísticos hidrológicos de caudal con al menos 20 años de datos. Admitiendo utilizar tanto datos observados como sintéticos a partir de la modelación hidrológica del sitio. Definiendo como caudal ambiental a través de la probabilidad de excedencia. En donde se asigna a los embalses el 60% de probabilidad de excedencia y en caso de las tomas directas se les asignan el 80% probabilidad de excedencia, ambos estadísticos calculados para cada mes del año (Torija, 2019).

Dado que el caudal ambiental es esencial para la conservación del recurso hídrico, pero también debe permitir su uso para riego, este estudio tiene por objetivo evaluar el efecto de tres configuraciones de caudal ambiental en una pequeña cuenca irrigada. Para ello se plantea un análisis mediante modelación hidrológica en código SWAT (Arnold et al, 1998). Se modela y calibra la cuenca, incorporando tres escenarios contrastantes: (1) un escenario de riego sin restricciones, sin considerar caudal ambiental; (2) un escenario con riego incorporando un caudal ambiental correspondiente a un 60% de probabilidad de excedencia; y (3) un escenario prístino, sin intervención humana. A partir de estos escenarios, se analizan los efectos de la implementación de caudales ambientales en la dinámica hidrológica de la cuenca. Las ventajas de este análisis es que se puede analizar el efecto a nivel de cuenca y los impactos aguas abajo del sistema irrigado.

MATERIALES Y MÉTODOS

La cuenca de estudio abarca un área de 120 km² y se encuentra ubicada en el departamento de Salto, Uruguay. Su cauce principal tiene una longitud de 19.9 km

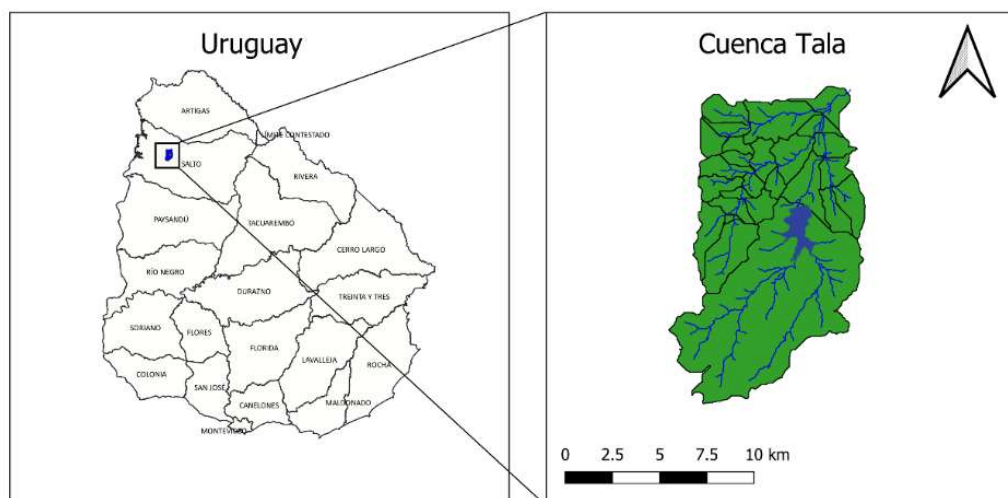


Figura 1. Cuenca de estudio Tala, posicionamiento dentro de Salto, Uruguay.

Se cultivan arroz, soja, maíz y sorgo. Dentro de la cuenca de estudio se encuentran dos embalses siendo uno el principal para riego con un volumen de 12 hectómetros cúbicos. Además, se dispone de una red de canales de tierra para la distribución del agua, y se emplean sistemas de riego por pivot para los cultivos de maíz y riego por superficie para el arroz.

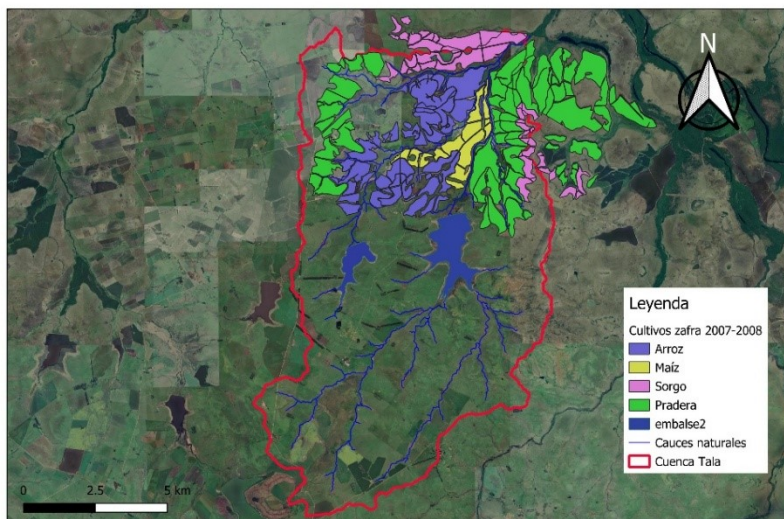


Figura 2. Cuenca del Tala con todas las chacras del establecimiento del Junco.

Para la modelización se utilizó el código SWAT2012 (Arnold et al., 1998), el cual incluye operaciones de fertilización, siembra, cosecha y riego. Lo cual hace que SWAT sea versátil en la utilización para modelamiento de cuencas agrícolas y operaciones de riego.

Los forzantes necesarios para la implementación del modelo son los datos climáticos, para esto se utilizan datos de precipitación dentro del establecimiento y datos de temperatura, humedad, radiación y velocidad del viento de la estación de INIA Salto grande. La calibración utiliza datos observados de caudal al cierre de la cuenca y los registros de volumen del embalse. El periodo de calibración fue realizado desde junio de 2019 hasta junio de 2020. Este periodo contiene una zafra de cultivo de verano que se utilizó como referencia de usos de suelos de la cuenca, contemplando los cultivos de ese año y realizando una rotación a lo largo de los años representativa del manejo de suelos del establecimiento.

Se consideraron tres enfoques contrastantes para evaluar los efectos del riego y la influencia de la incorporación de diferentes definiciones de caudales ambientales. Una vez calibrado el modelo, se estableció un escenario base en el que todos los usos del suelo fueron representados como campo natural y no se incluyeron embalses en la

cuenca. Este escenario permite simular las condiciones prístinas de la cuenca, proporcionando una referencia para la comparación con los demás escenarios. A partir de este modelo, se generó una serie de datos de salida que permitió determinar los caudales ambientales mensuales conforme a la normativa vigente en Uruguay. Estos valores se utilizaron en la simulación del segundo escenario, en el cual el embalse fue gestionado respetando dichos caudales ambientales y considerando la presencia de cultivos con sus respectivas rotaciones y operaciones de manejo. Finalmente, se planteó un tercer escenario enfocado exclusivamente en la actividad agrícola, en el que no se implementaron restricciones asociadas al caudal ambiental. La comparación entre estos escenarios permitirá evaluar las diferencias en los caudales de salida, analizar el flujo base en cada caso y cuantificar la variabilidad hidrológica de la cuenca en función de la implementación o no de caudales ambientales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La calibración del modelo (Figura 3) buscó representar la variabilidad de los caudales y representar de la mejor manera el funcionamiento del embalse. Como se tenía un periodo de sólo una zafra para calibrar, se optó por tener un conjunto de parámetros mostrando la incertidumbre que pueden tener los valores modelados. A partir de 16 parámetros considerados los más sensibles del modelo, se los perturbó considerando para cada uno un rango posible predispuesto por el propio modelo, obteniéndose un total de 240 salidas del modelo en las cuales se tiene un rango de valores de la función multiobjetivo en calibración de 0.6 a 0.8, lo que representa un ajuste de bueno a muy bueno (D. N. Moriasi et al., 2012).

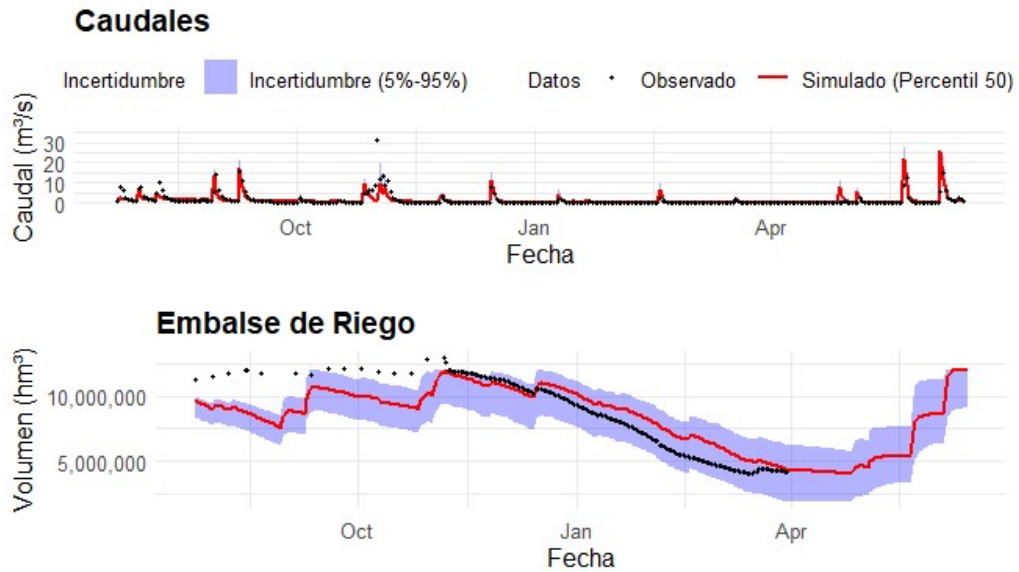


Figura 3. Grafica de arriba hidrograma de caudales simulados, caudales observados (negro) y 90% incertidumbre paramétrica de datos simulados (gris). Grafica debajo caudales de embalse observados (negro) y 90% de incertidumbre paramétrica de datos simulados (gris).

La figura 3 muestra la zafra 2019-2020 el funcionamiento del embalse y los caudales del arroyo. Se logra representar la variabilidad en los caudales durante el mismo periodo. La incertidumbre del embalse es mayor ya que se contaban con menos datos observados que los del caudal y además se dio flexibilidad al modelo para que asignara el uso del agua para riego en función de la demanda de los cultivos y de las condiciones de humedad del suelo.

Los 3 escenarios se enfocaron en evaluar las salidas de caudales en la cuenca, permitiendo analizar los efectos de los distintos usos y manejo de los suelos. Para esto primero se analizaron los flujos base de cada escenario. En la Figura 4 se puede observar los flujos base que se tienen tanto en la temporada de los cultivos de verano que se riega y en la temporada que no se riega. Destaca que en el periodo de riego los caudales de flujo base del escenario que contempla caudal ambiental son mayores que el prístino. Esto es esperable ya que aguas abajo de la represa el caudal mínimo que se esperaría tener es el dado por el caudal ambiental. En caso de un periodo donde la represa se vacié completamente el caudal se reduciría a cero o en todo caso a un caudal menor al ambiental si el embalse tiene capacidad. Luego si comparamos con el prístino el escenario que contempla riego sin caudales ambientales, se puede observar que en el periodo de riego se tienen mayores caudales base cuya media es semejante al prístino. Esto puede indicar que los efectos del embalse son amortiguados debido a perdidas del riego. Sin embargo, como es de esperar, se debe controlar los periodos sin riego ya que

el embalse se encuentra llenándose y dependerá mucho de la demanda utilizada en la época de riego. Por lo que en el periodo de llenado de la represa sin riego la regulación ambiental podría ser clave.

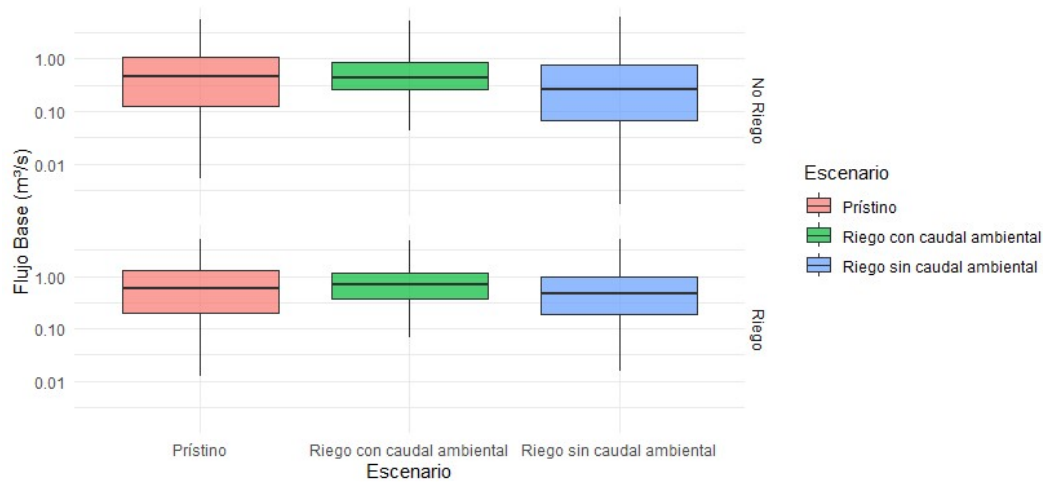


Figura 4. Flujo base de la salida de la cuenca del Tala, comparación de los distintos escenarios. Periodo sin riego (meses abril a octubre, periodo de simulación 2000 a 2020, panel superior) y periodo con riego (meses noviembre a marzo, periodo de simulación 2000 a 2020, panel inferior). Las simulaciones corresponden al percentil cincuenta del conjunto simulado.

La Figura 7 muestra los resultados de la evaluación tanto los caudales de salida de la cuenca como los caudales base. En la misma se evidencia que, al incorporar caudales ambientales, se incrementan los caudales erogados, aumentando el flujo base, lo que altera significativamente la variabilidad hidrológica en comparación con el escenario prístino. Estos resultados son consistentes con Ahmadzadeh et al., (2016), quienes evaluaron la transición de riego superficial a presurizado para aumentar la eficiencia del riego, encontrando una reducción en los caudales del arroyo debido a menores flujos de retorno del riego derivados de un sistema de riego mejorado. En contraste, la comparación entre los escenarios prístino y de riego indica que este último no modifica de forma sustancial dicha variabilidad. Sin embargo, el escenario de riego sin caudal ambiental presenta efectos más notorios durante la temporada sin riego, observándose una reducción en el flujo base (Figura 6).

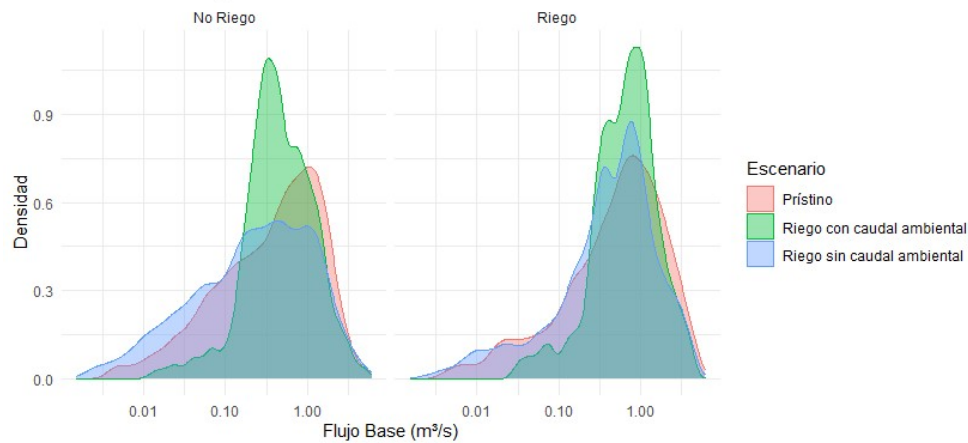


Figura 5. Función de Densidad de Probabilidad de los caudales base de salida de 3 escenarios, estos caudales corresponden a la salida de la cuenca de estudio. Se dividió el análisis en dos periodos uno sin riego (meses abril a octubre, periodo de simulación 2000 a 2020) y otro con riego (meses noviembre a marzo, periodo de simulación 2000 a 2020). Las simulaciones corresponden al percentil cincuenta del conjunto simulado.

CONCLUSIONES

La modelación se destaca como una herramienta fundamental para analizar cuencas agrícolas, especialmente en el estudio de los caudales ambientales. Gracias a esta metodología, es posible simular el comportamiento de la cuenca en un escenario prístino y evaluar el impacto de las operaciones de riego y la construcción de embalses sobre los caudales de salida.

El análisis comparativo de los escenarios indica que, en el caso del riego sin caudal ambiental, la variabilidad de caudales es similar a la del escenario prístino; sin embargo, se observa que los caudales bajos se ven más afectados durante la temporada sin riego. Esto se debe a que, en este escenario, el embalse se encuentra en proceso de llenado, lo que impide la liberación de agua aguas abajo y, sumado a la ausencia de riego, repercute en la reducción de los caudales de salida.

Estos hallazgos sugieren que, al considerar los efectos del riego, podría optimizarse la operación disminuyendo la cantidad de caudal ambiental erogado durante la temporada de riego. No obstante, se debe prestar especial atención a la temporada sin riego, ya que es en ese periodo cuando resulta crucial garantizar un aporte mínimo de agua para evitar cambios drásticos en la variabilidad del cauce. En conclusión, en cuencas agrícolas donde el riego por inundación genera un significativo flujo de retorno, es esencial considerar estas pérdidas en el manejo del caudal ambiental para evitar modificaciones adversas en la variabilidad de los caudales de salida.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Ahmadzadeh, H., Morid, S., Delavar, M., & Srinivasan, R. (2016). Using the SWAT model to assess the impacts of changing irrigation from surface to pressurized systems on water productivity and water saving in the Zarrineh Rud catchment. *Agricultural Water Management*, 175, 15-28. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.026>

Arenare, L. (2018). ESTADÍSTICAS AGROPECUARIAS (DIEA). 17.

Arthington, A. H., Bunn, S. E., Poff, N. L., & Naiman, R. J. (2006). THE CHALLENGE OF PROVIDING ENVIRONMENTAL FLOW RULES TO SUSTAIN RIVER ECOSYSTEMS. *Ecological Applications*, 16(4), 1311-1318. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[1311:TCOPEF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[1311:TCOPEF]2.0.CO;2)

D. N. Moriasi, B. N. Wilson, K. R. Douglas-Mankin, J. G. Arnold, & P. H. Gowda. (2012). Hydrologic and Water Quality Models: Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1241-1247. <https://doi.org/10.13031/2013.42265>

IFRC. (2023, abril 18). Operational Update, Uruguay: Droughts—January 2023. IFRC. <https://reliefweb.int/report/uruguay/uruguay-droughts-january-2023-dref-operational-update-dref-ndeg-mdruy004>

Moltz, H. L. N., Wallace, C. W., Sharifi, E., & Bencala, K. (2020). Integrating Sustainable Water Resource Management and Land Use Decision-Making. *Water*, 12(8), 2282. <https://doi.org/10.3390/w12082282>

Poff, N. L., Tharme, R. E., & Arthington, A. H. (2017). Evolution of Environmental Flows Assessment Science, Principles, and Methodologies. En *Water for the Environment* (pp. 203-236). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803907-6.00011-5>

Tharme, R. E. (2003). A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, 19(5-6), 397-441. <https://doi.org/10.1002/rra.736>

Torija, M. Z. (2019). La implementación del caudal ambiental y los derechos de uso del agua para la actividad agraria en Uruguay.