

METODOLOGÍA BASADA EN EL INDICADOR CONSUMO USO PARA EL CÁLCULO DE LOS CAMBIOS DE CONSUMO DE AGUA EN LAS MODERNIZACIONES DE REGADÍO.

Ricardo Aliod Sebastián*, Dionisio Pérez Blanco**, Carles Sanchis Ibor***

*Universidad de Zaragoza, **IMDEA Water, ***Universitat Politècnica de València

Regadío, efecto rebote, consumo de agua, modernización.

1. Introducción y objetivos

Los efectos del calentamiento global sobre la agricultura están facilitando que gobiernos y gestores de todo el mundo recurran a la tecnificación del riego como medida principal de adaptación, con frecuencia sin suficientes precauciones ni medidas de acompañamiento. Sin embargo, desde hace tiempo, la comunidad científica ha alcanzado un alto grado de consenso sobre la necesidad de evitar la paradoja hidrológica de la modernización del riego (Perry & Steduto, 2017; Pérez-Blanco et al., 2021), que refiere un aumento del consumo de agua (evapotranspiración, EVT) aunque el uso (dotación) pueda disminuir tras la mejora técnica. Es cierto que esta paradoja puede evitarse en determinados contextos, pero para ello, se requieren instrumentos que elaboren una evaluación *ex ante* de las consecuencias hidrológicas del cambio de técnica de riego. El objeto de la contribución es introducir un nuevo procedimiento práctico que permita estimar cuantitativamente un indicador para comparar con mayor rigor los valores de consumo y uso de agua, antes y después del cambio de técnica de riego, a fin de evaluar un posible efecto rebote en proyectos ejecutados o planificados.

2. Metodología

El trabajo se basa en el índice *Consumptive Use Coefficient* (Jensen, 1967), aquí definido como ICU (índice consumo-uso):

$$ICU = \frac{\text{Fracción del agua usada que es consumida en EVT o retornada de forma no recuperable}}{\text{Uso de agua en el SR}} \quad (1)$$

que computa el consumo evapotranspirativo (más retornos de agua no recuperables, en su caso) por unidad de volumen de uso (dotación) de agua del sistema de riego (SR)¹, con el cual es posible cuantificar los cambios de consumo de agua asociados. Denominamos consumo de volumen de agua por un usuario, en este caso un SR, aquella parte del volumen usado (que hacemos equivaler a la dotación de un SR) que, o bien no retorna a la cuenca, o bien retorna, pero lo hace en condiciones que ya no pueda dar otro servicio, sea este económico o ambiental. Este concepto ampliado de consumo recoge no solo la parte evapotranspirada el agua usada (EVT), sino también los posibles retornos (escorrentías, percolaciones) no recuperables (RNR), y equivale al término agotamiento (*depletion*).

El flujo de volúmenes evapotranspirados y retornados, de forma recuperable o no recuperable, se esquematiza en la Figura 1, en virtud de la cual se definirán los índices y parámetros que permitirán una cuantificación efectiva de los cambios de consumo de agua en

¹ Por sistema de riego (SR) se entenderá comunidad de regantes, agrupación de usuarios o explotación individual, según sea el caso, que realice captaciones de agua, superficiales y/o subterráneas, y las destine al riego.

las modernizaciones. Se incorporan así procesos internos que conviene retener para disponer de un análisis más completo, sin sobrestimar los aumentos de consumo, o de forma inversa, sin sobrestimar las reducciones de uso (dotación) necesarias para mantener o reducir el consumo en un cierto nivel. Los procesos se han agrupado en cinco bloques, cada uno contabilizado en función de su índice respectivo, siendo dos de estos índices -eficacia de distribución (ED) y eficacia de aplicación (EA) sobradamente conocidos, y tres de nueva formulación, que a continuación se describen.

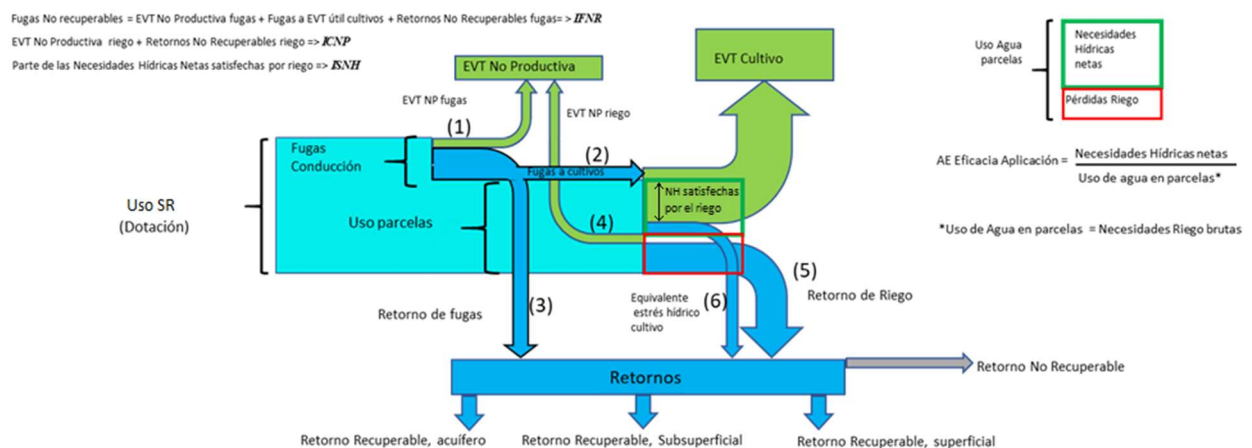


Figura 1 Esquema de los flujos de consumo y uso de agua en un SR

Fugas en el sistema de conducción y almacenamiento: parte de la dotación que recibe un SR a través de su toma colectiva no llega a usarse en el riego de las parcelas debido a diversos tipos de pérdidas en los procesos de almacenamiento y distribución². El coeficiente que se emplea para evaluar las fugas es la eficacia de distribución (ED)

$$ED = \frac{\text{Uso total de agua en parcelas}}{\text{Uso de agua en toma SR}} \quad (2)$$

Estas fugas tienen tres destinos (Figura 1): (1) evaporación y transpiración, desde las láminas libres, las cubiertas vegetales y terreno (EVT no productiva); (2) evapotranspiración beneficiosa en el cultivo, que recibe parte de la fuga (EVT cultivo), y (3) retornos. (1) y (2) son consumos. Respecto al volumen de retornos de fugas (3), la fracción que sea retorno no recuperable, es también considerada un consumo.

Fugas no recuperables: la fracción de las fugas que acaba en consumo, independiente de que sea beneficioso o no para el cultivo, se contabiliza en función de un nuevo índice que agrupa indistintamente todas las fracciones de consumo originado en fugas, en un solo término: índice de fugas no recuperables (IFNR):

$$IFNR = \frac{\text{Volumen de consumo de agua originado por fugas en conducciones}}{\text{Volumen de fugas en conducciones SR hasta parcelas}} \quad (3)$$

Restando al uso de agua en la toma del SR las fugas en las conducciones, se obtiene el agua que llega a las parcelas (uso parcelas).

² Evaporación directa de las superficies libres expuestas a la atmósfera (canales, acequias, balsas de regulación), fugas y filtraciones a través de juntas, roturas o paredes no impermeables, derrames por error de maniobra y pérdidas operativas (evitables o inevitables), en los desagües del sistema.

Eficacia de aplicación del riego: el volumen de *uso* de agua en las parcelas (necesidades hídricas brutas) se dimensiona tradicionalmente sumándole a las necesidades hídricas netas³ del cultivo (función de la climatología y tipo de cultivo) el agua que, por las características de la técnica de riego SR y de su desempeño, no llegará a estar disponible para ser consumida por la plantación. Este volumen, desde la perspectiva de la parcela, se interpreta como pérdidas de agua en el riego. Se conoce como eficacia de aplicación (EA) a la ratio:

$$EA = \frac{\text{Necesidades hídricas netas}}{\text{Uso de agua en parcelas}} \quad (4)$$

El producto de la EA y la ED se conoce como eficacia total (EfT = ED AD)

Consumos no productivos: las pérdidas de agua en el riego para la parcela son de dos tipos, Figura 1: (4) EVT no productiva, y (5) retornos de riego (escorrentía y/o percolación), de los cuales, parte pueden ser no recuperables (RNR). Estos últimos junto a la EVT no productiva (4) formarán parte del consumo no productivo en las parcelas, contabilizándose mediante el índice de consumo no productivo (ICNP):

$$ICNP = \frac{\text{Consumo agua de riego no productiva}}{\text{Uso de agua en parcelas}} \quad (5)$$

Estrés hídrico del cultivo: finalmente, se ha de contemplar que las necesidades hídricas netas, y el consumo asociado, no siempre pueden satisfacerse completamente, y no sólo por cuestiones de escasez o abundancia de agua, sino debido a las características intrínsecas propias de la técnica de riego: a) por la falta de uniformidad en la distribución de riego, y b) por la distancia temporal entre riegos que provoca estrés hídrico, una vez que la humedad del suelo desciende por debajo del nivel de agua fácilmente asimilable (Allen et al., 2006), ambos aspectos presentes especialmente en los riegos por superficie. Para ello se define el índice de satisfacción de necesidades hídricas, (ISNH):

$$ISNH = \frac{\text{EVT real del cultivo}}{\text{Necesidades hídricas netas}} \quad (6)$$

ISNH corrige las necesidades hídricas netas teóricamente calculadas, para ajustarlas a la EVT que realmente está teniendo lugar en el cultivo. Depende, en primer lugar, de la tecnología de riego empleada, pero también del medio físico concreto y del manejo del riego. En los proyectos y prácticas de regadío en lámina libre, el intervalo entre riegos tiende a agotar la dosis máxima de riego que es posible aplicar, estando el cultivo durante algún tiempo, antes del nuevo evento de riego, con una humedad en el suelo por debajo del umbral en que el agua está fácilmente disponible. Tampoco suele hacerse un balance de agua en el suelo a la hora de establecer las dosis siguientes. Esto se manifiesta en un cierto estrés hídrico, traducido en una reducción de producción respecto a los riegos de alta frecuencia, e implica que justo antes del siguiente riego, el contenido de agua del terreno será mayor que el teórico, ya que la

³ En el contexto de la metodología propuesta, las necesidades de agua beneficiosa que no sean EVT del propio cultivo, por ejemplo: lavado de sales, riego anti-helada, consumos cobertera, pantallas anti-viento, etc. No deben incluirse en *necesidades hídricas netas*. De hecho, para evitar doble contabilidad y confusiones en el cómputo de los índices e indicadores, cualesquiera otras necesidades beneficiosas que se consideren, es preferible extraerlas del cómputo de *necesidades hídricas netas* si no son recuperables, contemplándolas en el término asociado a ICNP (p.e. EVT cobertera), y es obligatorio extraerlas del de *necesidades hídricas netas* si son volúmenes recuperables (p.e. lavado de sales, parte del riego anti-helada que no evapora ni sublima, etc.).

planta no habrá sido capaz de extraer toda el agua suministrada en la dosis previa. En este trabajo se supone⁴ que, en estas condiciones, al aplicar la nueva dosis, el volumen vertido equivalente al agua que el cultivo no fue capaz de extraer y que causó estrés hídrico, acaba percolando, como retorno (6) (Figura 1).

Finalmente, el consumo de agua en el SR, es la suma de los tres tipos de consumos descritos, que en función de la definición de índices declarados (2), (3), (4), (5) y (6) queda:

Consumo agua riego SR = Consumo real de los cultivos por riego + Consumo no productivo del riego en parcela + Consumo asociado a fugas en conducciones

$$\text{Consumo agua} = (ED \cdot (EA \cdot ISNH + ICNP) + (1 - ED) \cdot IFNR) \cdot \text{Uso agua} \quad (7)$$

Siendo $ISNH < 1$, su efecto es aminorar los consumos respecto a las necesidades hídricas netas calculadas, mientras que $ICNP$ e $IFNR$ contribuyen a aumentar el consumo con componentes adicionales no beneficiosas. En el caso de $IFNR$, el componente se amplifica conforme el índice de las fugas $0 < (1-ED) < 1$, es más elevado. Denotando:

$$ICU = ED \cdot (EA \cdot ISNH + ICNP) + (1 - ED) \cdot IFNR \quad (8)$$

De forma sintética (7) se expresa:

$$\text{Consumo} = ICU \cdot \text{Uso} \quad (9)$$

Y si se establece la ratio entre el consumo final (después) e inicial (antes) de un cambio de tecnología, en parcela, en red de distribución o en ambas, con (9) se tiene:

$$\frac{\text{Consumo}_f}{\text{Consumo}_i} = \frac{ICU_f \text{Uso}_f}{ICU_i \text{Uso}_i} \quad (10)$$

Relación de la que puede deducirse uno cualquiera de sus términos, si se conoce o estiman los demás. Cuando no existe estrés hídrico ($ISNH=1$) y en ausencia de consumo no productivo ($ICNP=IFNR=0$), la relación (10) se reduce la conocida expresión simplificada:

$$\frac{\text{Consumo}_f}{\text{Consumo}_i} = \frac{Eff_f \text{Uso}_f}{Eff_i \text{Uso}_i} \quad (11)$$

Una de las virtudes de (10), evaluando el ICU como (8) es que los índices involucrados, que representan procesos de consumo relevantes, pueden ser evaluados de forma práctica, estimándose dentro de rangos habituales, o bien formularse de forma estadística, cuando no estén bien determinados, aspecto en el que se incide en trabajos que están en curso.

3. Resultados y conclusiones

La formulación expuesta se brinda a numerosos tipos de aproximaciones y tratamientos. Un primer tipo de resultados se encuentran al establecer resultados analíticos y de consistencia

⁴ Esta condición es accesoria en la formulación de la metodología, de manera que, si las dosis de riego descuentan la altura de agua no fácilmente disponible, se mantendrá el $ISNH$, pero se modificará la EA .

interna. Por ejemplo, tomando la Instrucción de Planificación Hidrológica los valores máximos de EA y ED para el riego presurizado (frecuentes y exigible en un buen proyecto de modernización), y los límites máximos y mínimos de EA y ED en lámina libre, junto a valores conservadores de ICNP e IFNR, se confirma (Tabla 1) cómo el ratio ICU es generalmente mayor que la unidad; aumenta conforme la diferencia de EfT inicial y final se acrecienta, e implica que las dotaciones después de la modernización deben de reducirse (columnas 3 y 5), por lo menos en un 20%, en la caso de aspersión, y un 30%, en el caso de riego por goteo, para no ver aumentar el consumo de agua si se cambia de un sistema en lámina libre a un sistema presurizado. También muestra que el empleo de la relación simplificada (11), que utiliza los ratios de EfT en vez de ICU, sobrevalora los cambios de consumo en un rango 10 al 15% (columnas 4 y 6). No obstante, esta (11) puede ser todavía utilizada en una primera y rápida aproximación para explicar la paradoja hidrológica, sin entrar en excesivos detalles técnicos, al ciudadano interesado, administraciones y profesionales de otros campos de conocimiento.

TABLA 1. ESTIMACIÓN DEL RATIO ICD PARA CONDICIONES TIPO

	EA	ED	EfT	ISNH	ICNP	IFNR	(1) EfT*ISNH	(2)-(1) Consumo no productivo	(2) ICU	(3) Ratio ICU_{pr}/ICU_{ll} Max EfT _{ll}	(4) Ratio EfT_{pr}/EfT_{ll} Max EfT _{ll}	(5) Ratio ICU_{pr}/ICU_{ll} Min EfT _{ll}	(6) Ratio EfT_{pr}/EfT_{ll} Min EfT _{ll}
Lámina libre (II). Max EA, ED	0,7	0,9	0,63	0,9	0,1	0,6	0,57	0,15	0,72				
Lámina libre (II). Min EA, ED	0,6	0,85	0,51	0,9	0,1	0,6	0,46	0,15	0,62				
Aspersión	0,9	1	0,8	1	0,03	0,2	0,81	0,04	0,85	1,18	1,28 (+8,6%)	1,39	1,58 (+14%)
Goteo	1	1	0,9	1	0	0,2	0,9	0,01	0,91	1,27	1,43 (+12%)	1,49	1,77 (+18%)

5. Referencias

- Allen, R., Pereira, L., Raes, R., Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del Cultivo. Guías para la Determinación de los Requerimientos de Agua de los Cultivos*. Roma: FAO, <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s.pdf>
- Perry, C., Steduto, P. (2017). *Does Improved irrigation technology save water? A review of the evidence*. Cairo: FAO. <https://openknowledge.fao.org/items/b4445410-aca5-491c-8247-10ab4281fa91>
- Jensen, M.E. (1967). Evaluating irrigation efficiency. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 93(1), 83–98. <https://ascelibrary.com/doi/abs/10.1061/JRCEA4.0000485>
- Pérez-Blanco, C.D., Loch, A., Ward, F., Perry C., Adamson, D. (2021). Agricultural water saving through technologies: a zombie idea, *Environ. Res. Lett.* 16, 114032 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac2fe0>