

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

¿CUÁNTA AGUA PUEDE SER BOMBEADA DE UN ACUÍFERO SIN QUE  
ÉSTE DEJE DE SER SOSTENIBLE?

*Victor M. Ponce<sup>1</sup>, Janaina Da Silva<sup>2</sup> y Jorge Prieto Villarroya<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>San Diego State University, Estados Unidos, [poncevm@gmail.com](mailto:poncevm@gmail.com)

<sup>2</sup>San Diego State University, Estados Unidos, [janainaehd@gmail.com](mailto:janainaehd@gmail.com)

<sup>3</sup>Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina, [jorgeprietovillarroya@yahoo.com.ar](mailto:jorgeprietovillarroya@yahoo.com.ar)

**RESUMEN:**

Los conceptos de rendimiento seguro y rendimiento sostenible del agua subterránea se analizan y comparan en el contexto de un equilibrio o balance hidrológico. Todas las recargas y descargas son debidamente contabilizadas. Como el agua subterránea es un flujo, no un volumen, el aprovechar la recarga natural casi horizontal puede comprometer los derechos de otros usuarios en las cercanías, incluidos los ecosistemas naturales, humedales, cuerpos de agua, y el flujo base de los ríos. Aquí se supone que la recarga vertical, es decir, la recarga que se origina en la precipitación local, es la única recarga que puede ser aprovechada libremente en la captura de aguas subterráneas para evitar la violación de derechos establecidos.

Se desarrolla y prueba una metodología para evaluar la recarga vertical. La metodología se basa en el equilibrio hidrológico cibernético de L'vovich, incluida la definición de un coeficiente de recarga de agua subterránea (L'vovich, 1979). Este coeficiente representa la fracción de precipitación que alcanza al nivel freático; por lo tanto, se puede usar para evaluar y contabilizar el rendimiento sostenible del agua subterránea. Cualquier tasa de captura de aguas subterráneas por encima de la recarga vertical debería poder demostrar, mediante estudios ecohidrológicos y de flujo de base, que no afecta significativamente los derechos establecidos.

**ABSTRACT:**

The concepts of safe yield and sustainable yield of groundwater are analyzed and compared in the context of a hydrologic balance. All recharges and discharges are duly accounted for. Since groundwater is a flow, not a volume, tapping the nearly horizontal natural recharge may arguably compromise the rights of other users in the vicinity, including natural ecosystems, wetlands, and baseflow. It is surmised here that vertical recharge, i.e., the recharge originating in local precipitation, is the only recharge that may be freely tapped for capture by groundwater to avoid encroachment on established rights.

A methodology to evaluate vertical recharge is developed and tested. The methodology is based on the cybernetic hydrologic balance of L'vovich (1979), including the definition of a groundwater recharge coefficient. This coefficient represents the fraction of precipitation that reaches the water table; therefore, it may be used to evaluate and assess sustainable groundwater yield. Any amount of groundwater capture over and above the vertical recharge would have to demonstrate, by means of suitable ecohydrological and baseflow studies, that it does not significantly affect established rights.

**PALABRAS CLAVES:** Acuífero, agua subterránea, sostenibilidad del agua subterránea.

## INTRODUCCIÓN

La pregunta de cuánta agua puede ser bombeada de un acuífero sin que éste deje de ser sostenible no tiene una respuesta clara. En principio, la decisión parece estar relacionada con hidrogeología. Un examen cuidadoso, sin embargo, revela una serie de otras preocupaciones, entre las cuales algunos de las más importantes son: ¿Cómo afecta esta decisión a la vegetación superficial? ¿Cómo afecta la relación entre el agua superficial y el agua subterránea? ¿Cómo afecta los derechos de agua establecidos? ¿Cómo afecta el hundimiento del terreno y la intrusión de agua salina en las zonas costeras? ([Ponce, 2006](#)).

En las últimas dos décadas, se ha demostrado ampliamente que la sostenibilidad de un acuífero tiene poco que ver con sus propiedades hidrogeológicas ([Alley et al., 1999](#)). La atención se centra ahora en la preservación de los ecosistemas y los derechos de agua establecidos ([Ponce, 2014](#)). Este cambio de paradigma se debe al hecho de que las aguas subterráneas no son un volumen a extraer, sino más bien un flujo a reconocer. En su artículo seminal sobre hidrogeología, [Theis \(1940\)](#) escribió:

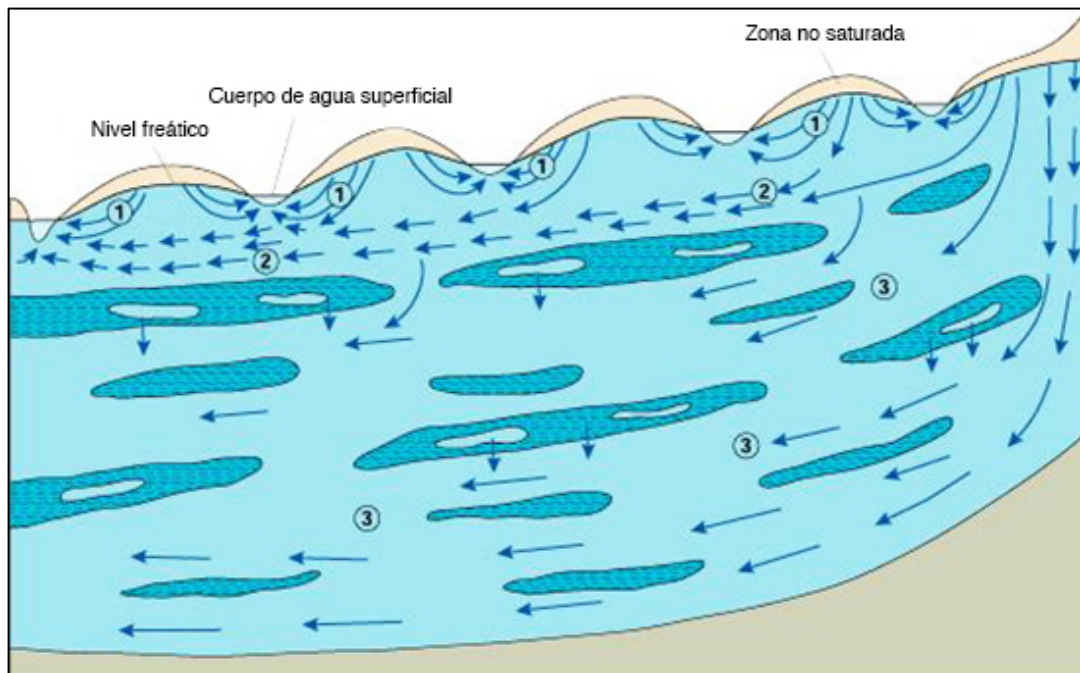
"Todas las aguas subterráneas de importancia económica están en proceso de pasar de un lugar de recarga a un lugar de descarga. En condiciones naturales, antes del desarrollo de los pozos, los acuíferos se encuentran en un estado de equilibrio dinámico. La descarga de pozos es una nueva descarga superpuesta a un sistema previamente estable, y debe equilibrarse mediante: (a) un aumento en la recarga, (b) una disminución en la descarga, (c) una pérdida de almacenamiento, o (d) una combinación de estos."

En este artículo tratamos el tema de la cuantificación de la sostenibilidad del agua subterránea. Nuestro enfoque está basado en la naturaleza interdisciplinaria del problema. Los estudios hidrológicos detallados a escala de cuenca ayudarán a determinar las cantidades apropiadas para casos específicos.

## FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EXPLICADO

El flujo de agua subterránea es extremadamente complejo, variando en el espacio (en tres dimensiones) y el tiempo (a través de varias escalas). En general, los acuíferos pueden clasificarse en: (a) confinados o no confinados, y/o (b) cuaternarios (aluviales) o terciarios (rocas fracturadas) ([Ponce, 2006](#)). Una evaluación de la sostenibilidad dependerá en gran medida del tipo de acuífero y de la escala del problema; es muy probable que trascienda la hidrogeología para abarcar una gama de campos afines ([Ponce, 2007](#)). En este artículo nos enfocamos principalmente en acuíferos no confinados, predominantemente aluviales de tamaño local o regional, como una primera aproximación al análisis.

Toda el agua subterránea está en constante movimiento desde una zona de mayor potencial a una zona de menor potencial, siendo el océano más cercano el destino final de toda el agua subterránea. Sin embargo, dependiendo de la geomorfología del terreno, el agua subterránea podría eventualmente exfiltrar a los humedales y cuerpos de agua permanentes, o aparecer como el flujo base de los ríos (Fig. 1). Está claro que las aguas superficiales y subterráneas están intrínsecamente conectadas: El agua subterránea puede convertirse en agua superficial en el espacio y el tiempo, y viceversa. De ello se desprende que la explotación del agua subterránea podría afectar el agua superficial y otras partes del ciclo hidrológico en las cercanías ([Ponce, 2014](#)).

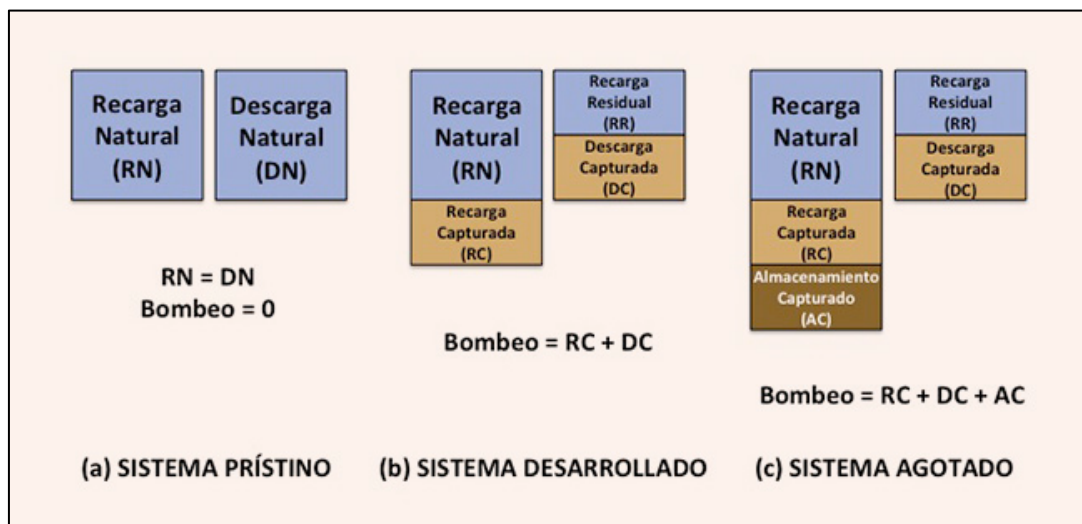


**Figura 1.-** El movimiento constante del flujo de agua subterránea (U.S. Geological Survey).

Para ahondar aún más en la complejidad del problema, reconocemos que un análisis de aguas subterráneas adolece de una gran limitación: El tamaño del volumen de control no es fijo. Como todas las aguas subterráneas están conectadas, definir los límites de un volumen de control es forzosamente un ejercicio arbitrario. A diferencia del agua superficial, que está restringida al límite pertinente de cuenca, no existe un límite similar o correspondiente para el flujo de agua subterránea. El bombeo sin límite generalmente producirá un tamaño cada vez mayor del cono de depresión ([Prudic y Herman, 1996](#); [Ponce y Vuppapapati, 2015](#)).

Haciendo eco de la declaración de Theis, reiteramos que el agua subterránea no es un volumen, sino un flujo. Un volumen de control definido arbitrariamente tendrá: (1) flujo de entrada (recarga), (2) flujo de salida (descarga) y (3) volumen almacenado de agua subterránea (agua que llena el suelo o los huecos entre rocas). El bombeo constituye una demanda externa, y su descarga se origina en cualquiera o en todos los tres componentes antes mencionados. Bajo esta óptica, tres escenarios son posibles (Fig. 2):

1. Un sistema prístino, en su condición natural, en equilibrio dinámico, en ausencia de bombeo;
2. Un sistema desarrollado, donde la cantidad de bombeo es igual al aumento en la recarga (recarga capturada) más la disminución en la descarga (descarga capturada).
3. Un sistema agotado, o abatido, donde una fracción adicional de la descarga bombeada se está extrayendo realmente del volumen almacenado. En este caso, se produce el agotamiento del acuífero, con el tamaño del cono de depresión ([Ponce, 2006](#)) aumentando progresivamente en el tiempo.



**Figura 2.-** Sistemas de agua subterránea prístinos, desarrollados y agotados.

En un sistema típico de aguas subterráneas, la recarga consiste en todo el flujo que ingrese al volumen de control. Esto comprende:

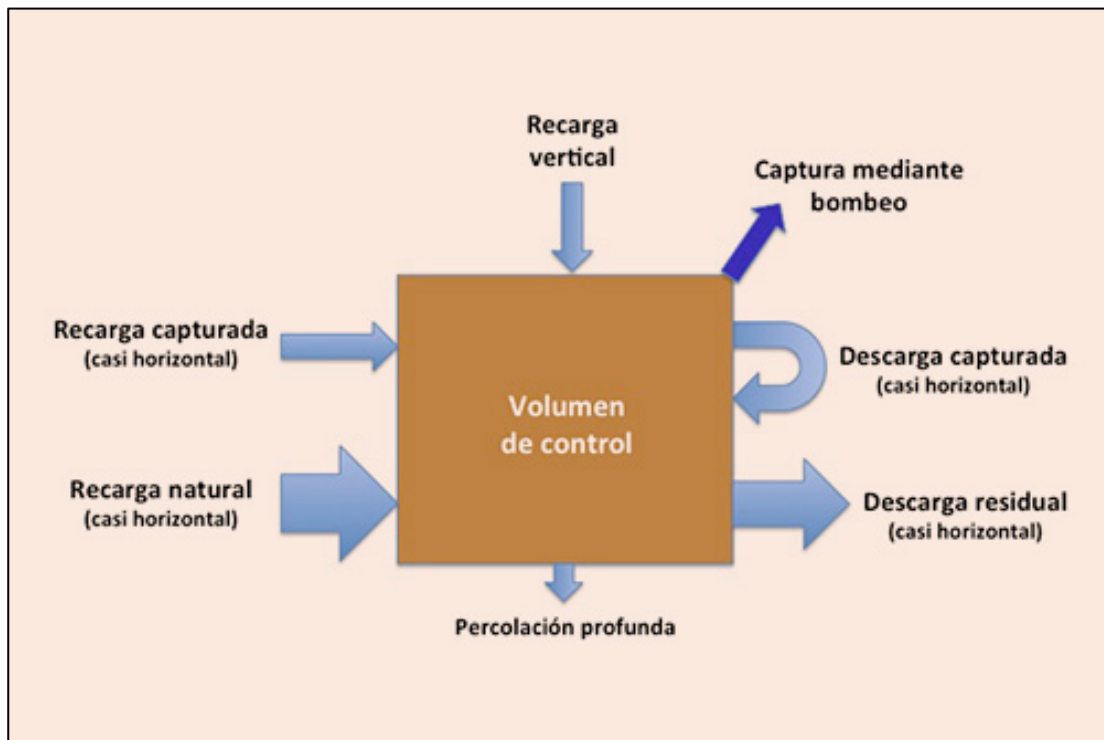
1. La recarga casi horizontal natural, de equilibrio o prístina, que ingresa a lo largo del límite aguas arriba en ausencia de bombeo;
2. La recarga casi horizontal capturada, impermanente o inducida ([Sophocleous, 1997](#)), que ingresa a través del límite aguas arriba en presencia de bombeo;
3. La descarga casi horizontal capturada, es decir, la que se convierte en recarga como resultado directo del bombeo; y
4. La recarga vertical, definida como la fracción de precipitación que alcanza el límite superior del volumen de control (es decir, el nivel freático) dentro del marco temporal de análisis.

Debe tenerse en cuenta que en un sistema altamente desarrollado, la recarga vertical puede incluir cantidades de reposición artificial de agua subterránea, recarga rechazada o flujos de retorno ([Ponce, 2007](#)).

La descarga del volumen de control consiste en:

1. La descarga casi horizontal natural, en ausencia de bombeo; o la descarga casi horizontal residual, en presencia de bombeo, que sale a lo largo del límite aguas abajo (Fig. 2); y
2. La percolación profunda, es decir, la fracción de precipitación que deja el volumen de control como una descarga vertical neta (flujo positivo) en su parte inferior, uniéndose a aguas subterráneas más profundas.

La cantidad de percolación profunda es en gran medida intratable. Usualmente se considera que es una fracción relativamente pequeña de la precipitación (un promedio global de ~ 2%) y, por lo tanto, insignificante en términos prácticos (L'vovich, 1979). En otras palabras, la filtración profunda es la pequeña fracción de precipitación que efectivamente abandona las aguas superficiales. La Figura 3 muestra un esquema de los diversos flujos que prevalecen en el agua subterránea.



**Figura 3.-** Entradas y salidas en el volumen de control de un acuífero.

## USO SOSTENIBLE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El tema central de la sostenibilidad es determinar cuánta agua se puede extraer de un acuífero sin que éste deje de ser sostenible ([Alley et al., 1999](#)). En el caso típico, la reposición del acuífero es lenta, demorando décadas, si no cientos o miles de años. Por lo tanto, se deduce que el bombeo excesivo de aguas subterráneas puede conducir al agotamiento y la consecuente falta de sostenibilidad. Un acuífero agotado o abatido es aquél que no puede recuperarse lo suficientemente rápido como para seguir siendo útil; por lo tanto, es insostenible.

Como un acuífero puede agotarse fácilmente mediante un bombeo excesivo, podría pensarse que la solución es dejar los acuíferos sin explotar y usar sólo las aguas superficiales. A diferencia de las aguas subterráneas, el tiempo de reciclaje de las aguas superficiales es un promedio global de 11 días ([L'vovich, 1979](#); [Ponce et al., 2000](#)); por lo tanto, todas las aguas superficiales son sostenibles cuando se las compara con las aguas subterráneas. Este enfoque, aunque aparentemente razonable, elimina la práctica del bombeo de aguas subterráneas establecida durante el pasado siglo en las sociedades desarrolladas. Argumentamos aquí que esta solución extrema es políticamente incorrecta. El uso del agua subterránea no puede y no debe ser completamente eliminado; más bien, debe regularse con el objetivo de gestionar, mitigar y/o minimizar el agotamiento, a fin de enfrentar el difícil desafío de la sostenibilidad.

La discusión entonces se desplaza a los componentes del balance de agua subterránea. ¿De dónde debería venir el agua bombeada? Notamos que hay una salvedad en el equilibrio o balance hidrológico; el agua extraída por bombeo podría ser:

- a. Totalmente consumida (uso consuntivo), cuando ninguna fracción de las aguas bombeadas regresa al acuífero; o
- b. Parcialmente consumida, cuando una cierta fracción del agua bombeada regresa al acuífero en algún punto del tiempo o espacio.

El riego agrícola es el ejemplo clásico de uso consuntivo, particularmente cuando las aguas de drenaje (y el drenaje es demostrablemente una necesidad imperiosa en regiones áridas/semiáridas)

se recolectan y eliminan de las instalaciones a través del flujo superficial (Fig. 4). Otros usos (domésticos o industriales) pueden ser consuntivos o parcialmente consuntivos, dependiendo de la situación local.



**Figura 4.-** Canal de irrigación (izquierda) y canal de drenaje (derecha), irrigación Wellton-Mohawk, Arizona.

Si bien el concepto de rendimiento sostenible ha sido reconocido sólo recientemente ([Alley et al., 1999](#)), el más antiguo concepto de un rendimiento seguro ha existido por casi más de un siglo (Lee, 1915). Lee definió el "rendimiento seguro" como el límite de la cantidad de agua que se puede extraer de un acuífero, de forma regular y permanente, sin un agotamiento peligroso de la reserva. Señaló que el agua extraída permanentemente de un depósito subterráneo reduce el volumen de agua que pasa a través de la cuenca a través de canales naturales, es decir, la descarga natural. Para ilustrar la existencia de esta descarga natural, Lee observó que el bombeo incontrolado generalmente conduce a la desecación de manantiales y humedales ([Ponce, 2014](#)). Por lo tanto, Lee distinguió entre un rendimiento seguro teórico, igual a la recarga natural, y un rendimiento seguro práctico, un valor inferior que tiene en cuenta la necesidad de mantener una descarga residual (Fig. 2). Según Lee, la descarga residual debe determinarse y deducirse del rendimiento seguro teórico para obtener el rendimiento seguro práctico. Durante las últimas dos décadas, este último se ha transformado en rendimiento sostenible, el cual va más allá de la hidrogeología.

¿Cuánta debe ser la descarga residual cuando se evalúa el rendimiento sostenible? En los casos en los que la descarga capturada debe minimizarse debido a la existencia de derechos de terceros aguas abajo (manantiales, humedales y/o flujo de base), se deduce que muy poco o nada de la recarga casi horizontal podría capturarse sin comprometer los derechos de terceros. Bajo condiciones de no equilibrio, el bombeo del 100% de la recarga natural teóricamente podría resultar en la captura de hasta el 50% de la descarga natural (Fig. 2). En el límite asintótico, es decir, en condiciones de quasi equilibrio, casi cualquier cantidad de captura provendría de la descarga y podría comprometer derechos adquiridos aguas abajo.

Esta imagen un poco sombría mejora cuando se reconoce que la descarga vertical, es decir, la fracción de precipitación local que logra alcanzar el nivel freático, no se incluye específicamente en la determinación de la recarga (casi horizontal). Por lo tanto, una resolución del conflicto de derechos entre las aguas superficiales y subterráneas podría ser la captura de **una fracción o la totalidad** de la

recarga vertical. Este cambio de captura casi horizontal a vertical se basa en el hecho de que la recarga casi horizontal es de alcance regional o mayor, mientras que la recarga vertical es esencialmente local. Bajo esta óptica espacial, toda recarga vertical podría estar sujeta a captura. Además, al basar la determinación del rendimiento sostenible únicamente en la recarga vertical probablemente disminuya el argumento de que la captura mediante bombeo podría afectar negativamente a los ecosistemas y aguas superficiales vecinas.

## EL EQUILIBRIO HIDROLÓGICO CIBERNÉTICO

Con el fin de cuantificar adecuadamente la recarga vertical y, por lo tanto, poder manejar el rendimiento sostenible del agua subterránea, recurrimos al equilibrio o balance hidrológico cibernético, el cual es más adecuado para la hidrología de rendimiento que el balance convencional (L'vovich, 1979; Ponce, 2018).

En el enfoque cibernético del equilibrio hidrológico, la precipitación anual se separa en dos componentes (Fig. 5):

$$P = S + W \quad [1]$$

en donde  $S$  = escurrimiento superficial, es decir, la fracción de escurrimiento que se origina en la superficie terrestre, y  $W$  = humedecimiento de la cuenca, o simplemente, humedecimiento, la fracción de precipitación que no contribuye a la escorrentía superficial.

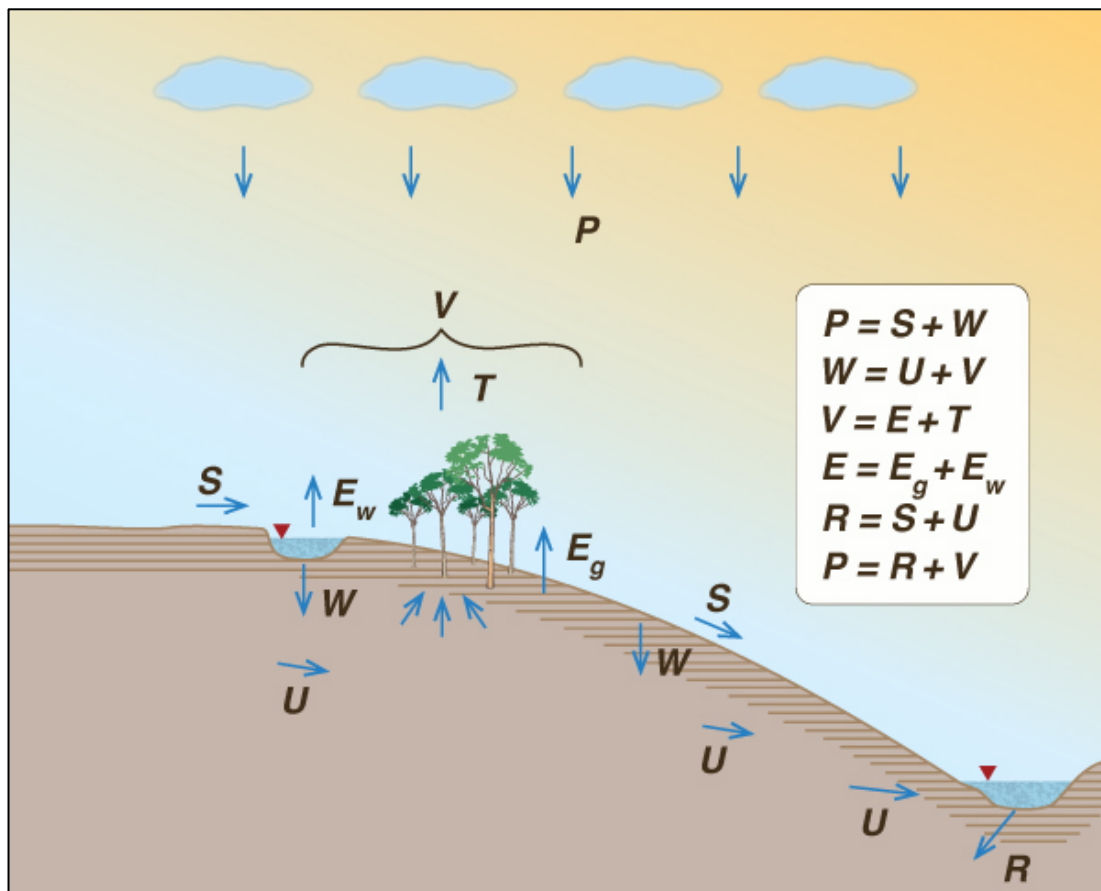


Figura 5.- El equilibrio hidrológico cibernético (L'vovich, 1979).

A su vez, la humectación se divide en dos componentes:

$$W = U + V \quad [2]$$

en donde  $U$  = caudal base, es decir, la fracción de humectación que se filtra como el flujo de corrientes y ríos en seco, y  $V$  = vaporización, es decir, la fracción de humectación regresa a la atmósfera como vapor de agua.

Escorrentía (es decir, escorrentía total) es la suma de la escorrentía superficial y el caudal base:

$$R = S + U \quad [3]$$

Combinando las Ecs. 1 a 3:

$$P = R + V \quad [4]$$

Las Ecuaciones 1 a 4 constituyen un conjunto de ecuaciones de balance hídrico. Se pueden definir cuatro coeficientes de balance hídrico: (1) coeficiente de escorrentía, (2) coeficiente de flujo base, (3) coeficiente de humectación y (4) coeficiente de recarga.

El coeficiente de escorrentía es:

$$K_r = \frac{R}{P} \quad [5]$$

El coeficiente de flujo de base es:

$$K_u = \frac{U}{W} \quad [6]$$

El coeficiente de humectación es:

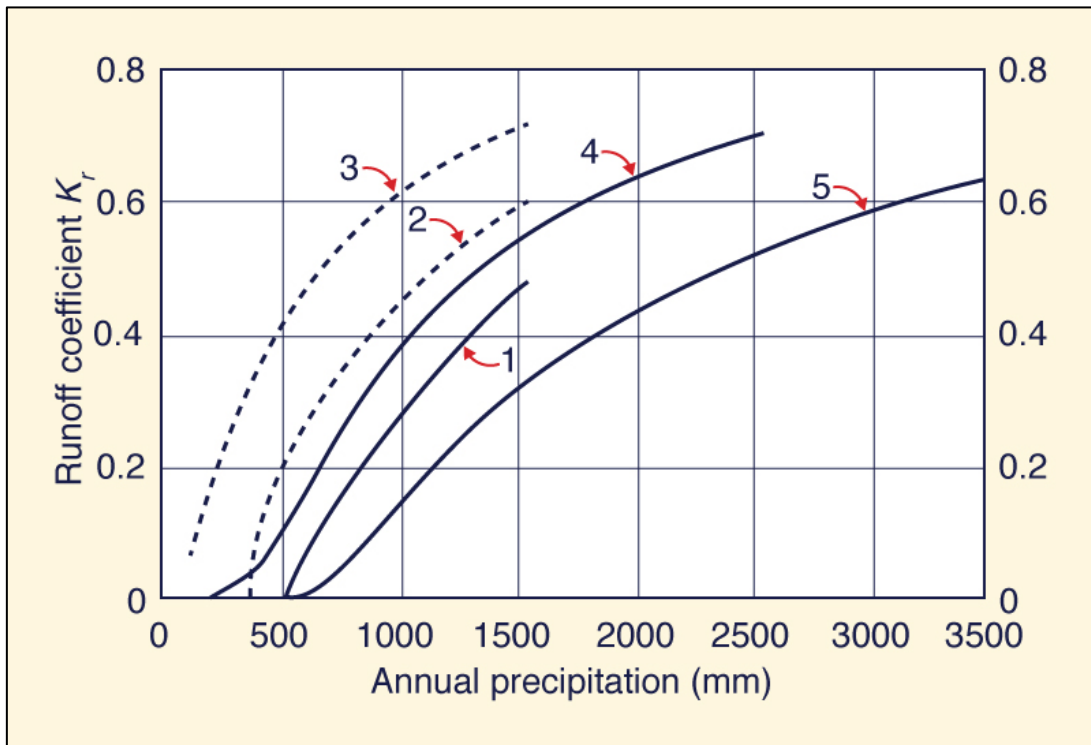
$$K_w = \frac{W}{R} \quad [7]$$

El coeficiente de recarga del agua subterránea es:

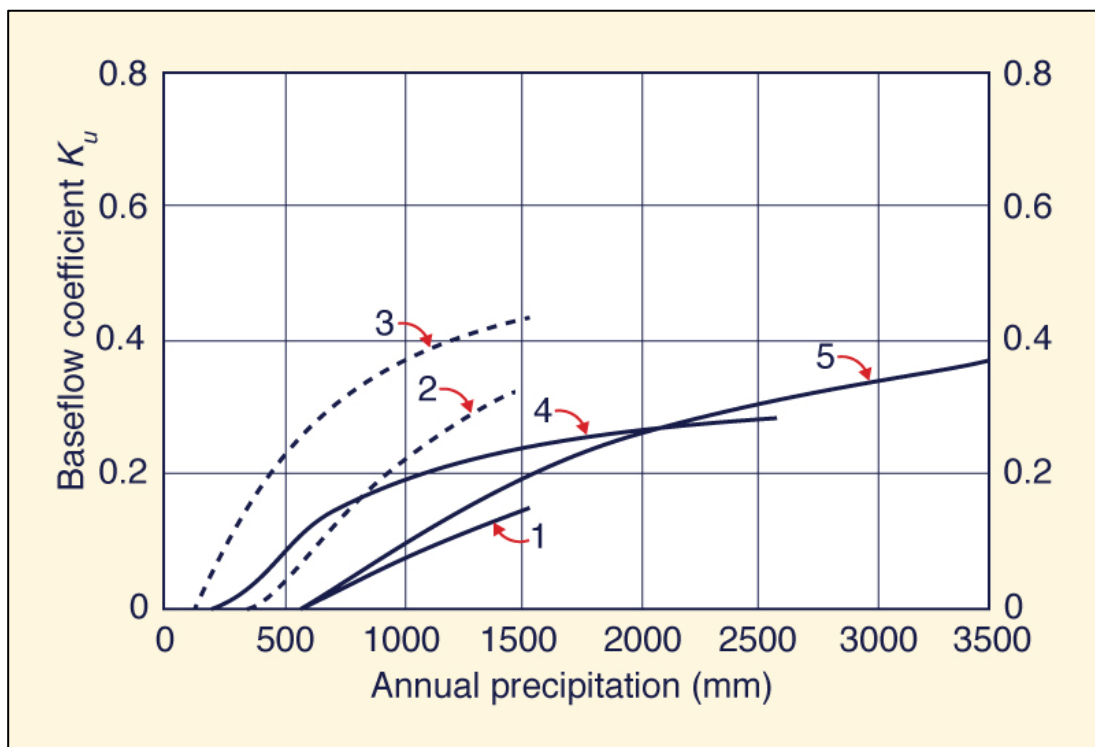
$$K_g = \frac{U}{P} \quad [8]$$



Las Figuras 6 y 7 muestran los coeficientes de escorrentía y flujo de base calculados por [Ponce y Shetty \(1995\)](#), en base a los datos informados por L'vovich (1979). Se observa que en el total de los cinco casos analizados, los coeficientes de escorrentía y flujo de base aumentan con la precipitación anual.



**Figura 6.-** - Coeficientes de escorrentía.



**Figura 7.-** Coeficientes de flujo base.

Los gráficos consideran los siguientes datos:

1. África: bosques y matorrales esclerófilos perennes.
2. África: bosques de coníferas de montaña.
3. América del Norte (Canadá); bosques subárticos (taiga).
4. América del Sur: bosques húmedos de hoja perenne en las montañas.
5. Asia (India): bosques semidecíduos en las montañas (Ghats occidentales).

## ESTUDIO DE CASO

La metodología descrita en este artículo es aplicada a los datos de la cuenca del río Sarada, aguas arriba de Anakapalli, en Andhra Pradesh, India (Fig. 8). La cuenca está situada entre los Ghats orientales y la costa oriental de la India, y presenta un clima subhúmedo ([Ponce et al., 2000](#)), con un área de drenaje de 1.980 km<sup>2</sup>.



**Figura 8.-** Ubicación geográfica de Anakapalli, en Andhra Pradesh, India.

Se analizan once (11) años de datos de precipitación-escorrentía. Los datos de precipitación consisten en hietogramas de lluvia diaria y los datos de escorrentía consisten en el hidrograma medido en la boca, o salida, de la cuenca. Los hietogramas anuales se usan para calcular la precipitación anual  $P$  (mm). Cada hidrograma anual se integra para obtener la escorrentía  $R$  (mm). La escorrentía superficial  $S$  (mm) se obtiene por separación del hidrograma utilizando principios establecidos ([Ponce, 2014](#)). La matriz de  $P$ - $R$ - $S$  se usa para calcular el [balance hídrico en línea 2](#).

La Figura 9 muestra los resultados tabulares del programa en línea, donde el coeficiente de recarga de agua subterránea  $K_g$  se da en la Col. 11. La Figura 9 representa  $K_g$  frente a la precipitación anual media  $P$ , en orden ascendente de precipitación. A pesar del ruido aparente en los datos, se observa que la tendencia general es a un aumento en  $K_g$  con un aumento en  $P$ .

Year	P	R	S	U	W	V	K <sub>u</sub>	K <sub>r</sub>	K <sub>w</sub>	K <sub>g</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	943	544.2	505.2	39	437.8	398.8	0.089	0.577	0.804	0.041
2	1060	456	413	43	647	604	0.066	0.43	1.419	0.041
3	1312	671.1	564.1	107	747.9	640.9	0.143	0.512	1.114	0.082
4	824	275.1	243.1	32	580.9	548.9	0.055	0.334	2.112	0.039
5	953	365.2	346.2	19	606.8	587.8	0.031	0.383	1.662	0.02
6	1347	510.8	443.8	67	903.2	836.2	0.074	0.379	1.768	0.05
7	1047	360.1	319.1	41	727.9	686.9	0.056	0.344	2.021	0.039
8	1379	586.1	530.1	56	848.9	792.9	0.066	0.425	1.448	0.041
9	856	349.6	324.6	25	531.4	506.4	0.047	0.408	1.52	0.029
10	1090	470.8	440.8	30	649.2	619.2	0.046	0.432	1.379	0.028
11	1521	249.2	111.2	138	1409.8	1271.8	0.098	0.164	5.657	0.091
Average	1121.091	439.836	385.564	54.273	735.527	681.255	0.07	0.399	1.9	0.045

Note: All units are in mm, except Cols. 8, 9, 10 and 11, which are dimensionless.

Figura 9.- Equilibrio hidrológico cibernético para los datos de la cuenca del río Sarada.

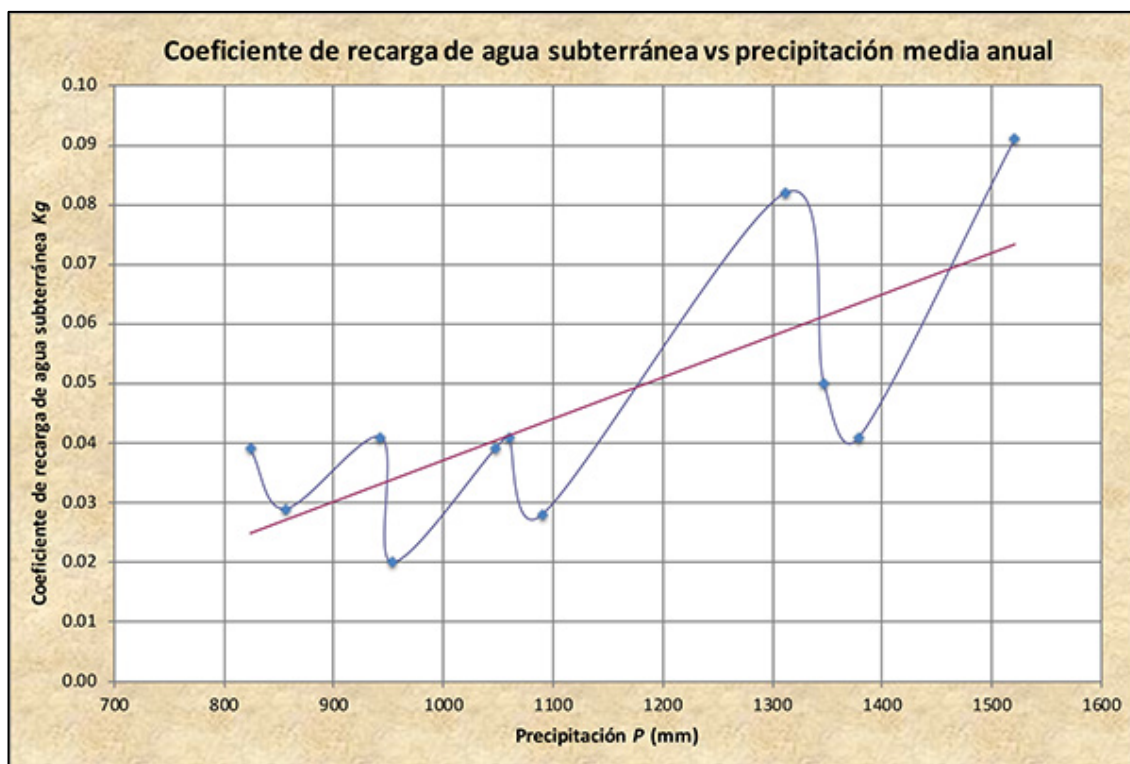


Figura 10.- Coeficiente de recarga de agua subterránea vs precipitación media anual; datos de la cuenca del río Sarada.

## COEFICIENTES DE RECARGA Y RENDIMIENTO SOSTENIBLE

La recarga vertical del agua subterránea es la fracción de precipitación que alcanza el nivel freático. Para cualquier precipitación media anual y, por ende, para cualquier precipitación anual, el coeficiente de recarga puede interpretarse como la cantidad de agua que podría capturarse por bombeo, al mismo tiempo que se garantiza un rendimiento sostenible. Ostensiblemente, esta estrategia no compromete ninguna parte de la recarga (o descarga) casi horizontal. Cabe notar que la conversión de la descarga en recarga, como resultado directo del bombeo, ha sido un punto

contencioso en las evaluaciones de recursos de agua subterránea desde hace muchos años (Kazmann, 1956).

Para cualquier cuenca hidrográfica, el coeficiente de recarga debe evaluarse siguiendo el equilibrio o balance hidrológico cibernético descrito en este artículo ([Ponce, 2018](#)). Dada la variabilidad hidrológica natural, en cualquier año, la producción sostenible de agua subterránea, es decir, la cantidad permisible de captura, podría basarse prácticamente en la cantidad de precipitación que ocurrió en el año anterior. Las cantidades de reabastecimiento artificial, descarga rechazada y/o flujos de retorno, de haberlos, pueden agregarse a la recarga vertical (natural) en este momento ([Ponce, 2007](#)).

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

Los conceptos de rendimiento seguro y rendimiento sostenible del agua subterránea se analizan y comparan en el contexto de un equilibrio o balance hidrológico. Todos los flujos de recarga y descarga son debidamente contabilizados. Como el agua subterránea es un flujo, no un volumen, el aprovechar la recarga natural casi horizontal puede comprometer los derechos de otros usuarios en las cercanías, incluidos los ecosistemas naturales, humedales, cuerpos de agua, y el flujo base de los ríos. Aquí argumentamos que la recarga vertical, es decir, la recarga que se origina en la precipitación local, es la única recarga que puede ser aprovechada libremente en la captura de aguas subterráneas si se quiere evitar comprometer los derechos de terceros.

Se desarrolla una metodología para evaluar la recarga vertical. La metodología se basa en el equilibrio o balance hidrológico cibernético de L'vovich, incluida la definición de un coeficiente de recarga de agua subterránea (L'vovich, 1979). Este coeficiente representa la fracción de precipitación que alcanza el nivel freático; por lo tanto, se puede usar para evaluar el rendimiento sostenible del agua subterránea. Cualquier cantidad de captura de aguas subterráneas por encima de la recarga vertical debería demostrar, mediante estudios ecohidrológicos y de flujo de base, que no afecta significativamente los derechos establecidos. La calculadora [balance hídrico en línea 2](#) asiste al análisis.

## RECONOCIMIENTOS

Los autores desean reconocer a Donna Tisdale y a los vecinos de la comunidad de Boulevard, en el sureste del condado de San Diego, California, EE.UU., por su apoyo a la investigación teórica y aplicada en el tema de la sostenibilidad del agua subterránea en los últimos 12 años. Los datos de la cuenca del río Sarada fueron proporcionados por el Dr. Y. R. S. Rao, científico del Instituto Nacional de Hidrología, Roorke, India.

## REFERENCIAS

**Alley, W. M., T. E. Reilly, y Franke** (1999). [Sustainability of groundwater resources](#). U.S. Geological Survey Circular 1186, Denver, Colorado, 79 p.

**Kazmann, R. G.** (1956). "Safe yield" in ground water development: Reality or illusion? Journal of the Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 82, No. IR3, November, Paper 1103.

**Lee, C. H.** (1915). *The determination of safe yield of underground reservoirs of the closed-basin type*. Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol. LXXVIII, Paper No. 1315, 148-218.

- L'vovich, M. I.** (1979). *World water resources and their future*. Translation from Russian by Raymond L. Nace, American Geophysical Union.
- Ponce, V. M., y A. V. Shetty** (1995). [\*A conceptual model of catchment balance: 2. Application to runoff and baseflow modeling\*](#). Journal of Hydrology, 173, 41-50.
- Ponce, V. M., R. P. Pandey, y S. Ercan** (2000). [\*Characterization of drought across climatic spectrum\*](#). Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, Vol. 5, No. 2, April, 222-224.
- Ponce, V. M.** (2006). [\*Groundwater utilization and sustainability\*](#). Online article.
- Ponce, V. M.** (2007). [\*Sustainable yield of groundwater\*](#). Online article.
- Ponce, V. M.** (2014). [\*Effect of groundwater pumping on the health of arid vegetative ecosystems\*](#). Online article.
- Ponce, V. M.** (2014). [\*Engineering hydrology: Principles and practices\*](#). Online textbook.
- Ponce, V. M. y B. Vuppalapati** (2015). [\*The myth of groundwater resource evaluation\*](#). Online article.
- Ponce, V. M.** (2018). [\*Why is the cybernetic hydrologic balance better suited for yield hydrology than the conventional approach?\*](#) Online article.
- Prudic, D. E., y M. E. Herman** (1996). [\*Ground-water flow and simulated effects of development in Paradise Valley, a basin tributary to the Humboldt River, in Humboldt County, Nevada\*](#). U.S. Geological Survey Professional Paper 1409-F.
- Sophocleous, M.** (1997). [\*Managing water resources systems: Why "safe yield" is not sustainable\*](#). Editorial, Ground Water, Vol. 35, No. 4, July-August, 561.
- Theis, C. V.** (1940). [\*The source of water derived from wells: Essential factors controlling the response of an aquifer to development\*](#). Civil Engineering, Vol. 10, No. 5, May, 277-280.