

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

**EL DILEMA ENTRE EL USO DE AGUA SUBTERRÁNEA
Y LA PRESERVACIÓN DEL ECOSISTEMA**

Victor M. Ponce¹, Janaina Da Silva² y Jorge Prieto Villarroya³

¹San Diego State University, Estados Unidos, poncevm@gmail.com

²San Diego State University, Estados Unidos, janainaehd@gmail.com

³Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina, jorgeprietovillarroya@yahoo.com.ar

RESUMEN:

El bombeo excesivo o no regulado de agua subterránea lleva usualmente al abatimiento del nivel freático, pudiendo impactar negativamente la vegetación acostumbrada a obtener su humedad (agua) de la zona no saturada (vadosa) y/o de la zona saturada (agua subterránea). Por lo tanto, el desarrollo sostenible de agua subterránea debe ir más allá de la hidrogeología, abarcando los campos de la ecohidrología y ecohidroclimatología. Sólo así se podrá evitar que el bombeo incontrolado de agua subterránea cause eventualmente la degradación de la cubierta vegetal y lleve a un incremento en la aridez del ecosistema.

ABSTRACT:

Excessive or unregulated pumping is bound to lower the water table and negatively impact the vegetation accustomed to getting their water from the unsaturated (vadose) zone or the saturated (groundwater) zone. Therefore, enlightened groundwater development must reach beyond hydrogeology to encompass the closely related fields of ecohydrology and ecohydroclimatology. Only then can the anthropogenic aridization of the ecosystem and the consequent degradation of the vegetal cover be prevented.

PALABRAS CLAVES: Agua subterránea, preservación del ecosistema, ecohidrología, ecohidroclimatología,

INTRODUCCIÓN

La pregunta de qué cantidad de agua podría bombearse de un acuífero poco profundo sin comprometer a los ecosistemas locales no tiene una respuesta clara. El bombeo excesivo o no regulado puede llevar al abatimiento del nivel freático, impactando negativamente en la vegetación acostumbrada a obtener su humedad de la zona no saturada (vadosa) y/o, en determinadas ocasiones, de la zona saturada (agua subterránea). Por lo tanto, el desarrollo sostenible de agua subterránea debe ir más allá de la hidrogeología, abarcando los campos afines de la ecohidrología y ecohidroclimatología. Sólo así se podrá evitar que el bombeo incontrolado de agua subterránea cause eventualmente la degradación de la cubierta vegetal y lleve a un incremento en la aridez del ecosistema.

USO DE AGUA SUBTERRÁNEA

Las sociedades desarrolladas han bombeado agua subterránea por más de 100 años (Lee, 1915). Típicamente, ellas recurren al uso de agua subterránea cuando ya se ha comprometido toda el agua superficial disponible, o donde el agua subterránea es menos costosa que el agua superficial. En 2010, las extracciones de agua subterránea en los Estados Unidos se han estimado en 288 millones de metros cúbicos por día, lo que representa el 21.4% del uso total de agua (1344 millones de metros cúbicos por día) ([U.S. Geological Survey Circular 1045](#)).

En general, cuanto más seco es el clima local y/o cuanto más desarrollada es una sociedad, mayor es el uso de agua subterránea. La Figura 1 muestra las extracciones de agua subterránea en los Estados Unidos correspondientes al año 2010. Se ve claramente que la mayor parte del agua subterránea se usa en la mitad oeste, particularmente en California, que tiene una economía altamente desarrollada y un clima árido/semiárido predominante en una fracción importante de su territorio.



Figura 1.- Uso del agua subterránea correspondiente al año 2010 en los Estados Unidos de América (Servicio Geológico de los EE.UU).

Toda el agua en la superficie y el subsuelo tiene su origen en la precipitación. Desde una perspectiva global, alrededor de **un tercio** de la precipitación se convierte en **escorrentía superficial** y es descargada finalmente a los océanos por sistemas de drenaje exorreicos (Ponce, 2006). Los **dos tercios** restantes son utilizados por los ecosistemas naturales, regresando a la atmósfera mediante la **vaporización**, que comprende: (1) la evaporación de las masas de agua, incluidos los sistemas endorreicos o parcialmente endorreicos tales como lagos y humedales; y (2) la evapotranspiración de los ecosistemas terrestres, tanto naturales como artificiales.

La fracción de precipitación que logra infiltrarse en el terreno (en el suelo o roca fracturada) puede seguir una de dos direcciones:

1. **Hacia abajo**, en dirección predominantemente vertical, para unirse al agua subterránea y eventualmente constituir el flujo base de los ríos vecinos, volviendo así al océano como escorrentía superficial; o
2. **Hacia arriba**, regresando a la atmósfera a través de la vaporización, en efecto, cortando el ciclo hidrológico normal.

En la naturaleza, las aguas superficiales y subterráneas están en movimiento permanente, interactuando en una gran variedad de escalas temporales y espaciales. Las aguas superficiales pueden convertirse en aguas subterráneas, y viceversa. Generalmente, el flujo de agua superficial se mueve rápidamente, mientras que el flujo de agua subterránea es lento ([Ponce, 2007](#)). Dependiendo del clima, los arroyos y los ríos pueden ser: (a) efímeros, (b) intermitentes, o (c) perennes. Por lo tanto, las cantidades de agua superficial varían mucho, desde cero para arroyos secos en regiones semiáridas y áridas (Figura 2), hasta bastante considerables en ríos de regiones húmedas (Figura 3). Existe una diferencia significativa entre las aguas superficiales y las subterráneas: Si bien el agua superficial (escurrimiento superficial) puede o no existir en un lugar o entorno determinado, las aguas subterráneas **siempre** están presentes a una cierta profundidad.



Figura 2.- Una corriente efímera: Río La Leche, Lambayeque, Perú;



Figura 3.- Una corriente perenne: Río Feather, condado de Plumas, California, EE.UU.

La profundidad del agua subterránea depende de la geología local, geomorfología y clima predominante. En climas húmedos, el nivel freático se encuentra cerca de la superficie, generalmente a unos pocos metros; por el contrario, en climas áridos, la profundidad del agua subterránea es generalmente mucho mayor. Típicamente, cuanto más seco es el clima, mayor es la profundidad al nivel freático.

ECOHIDROLOGÍA

Todos los ecosistemas necesitan una cierta cantidad de agua para su supervivencia, preservación y conservación. Sin embargo, las necesidades de agua varían enormemente. Mientras que algunos ecosistemas prosperan con muy poca agua, otros requieren grandes cantidades. La Naturaleza ha hecho posible que los ecosistemas se adapten al agua disponible en las inmediaciones y mantengan su sustento sobre esa base. Las sequías recurrentes generalmente conducen al estrés hídrico e, inusualmente, de persistir éstas, a la eventual desaparición de los ecosistemas y comunidades vegetales.

En la naturaleza, el agua, es decir, la humedad, existe en los siguientes cinco depósitos o fuentes:

- Como precipitación directa;
- Como agua y escorrentía superficial, en humedales, estanques, lagos, arroyos y ríos;
- En la subsuperficie, en la zona no saturada o vadosa (Fig. 4);
- Como agua subterránea, debajo del nivel freático, en la zona de saturación; y
- Como agua atmosférica, es decir, como humedad del aire, parcial o totalmente saturado.

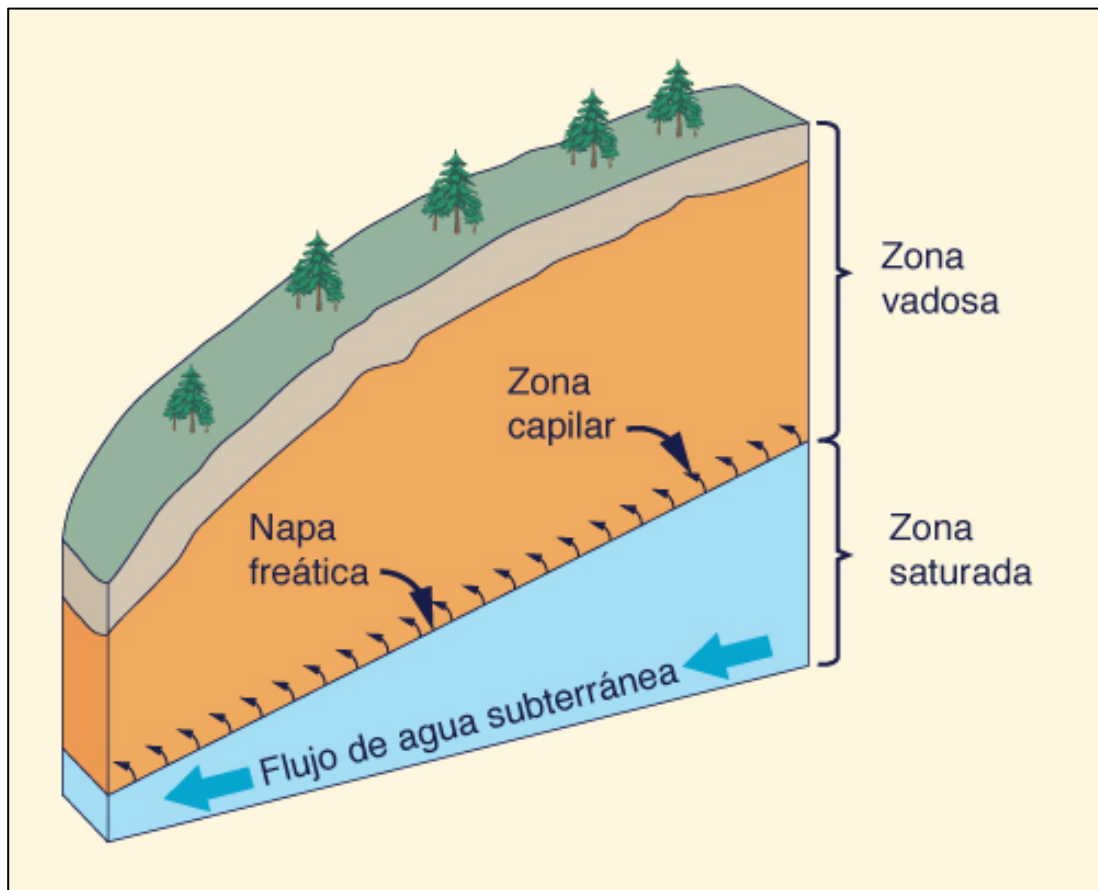


Figura 4.- La zona vadosa, la napa freática y las aguas subterráneas (Servicio Geológico de los EE.UU).

Un ecosistema comprende la flora y fauna características de una determinada región geográfica y climática. El término ecosistema ha experimentado variaciones conceptuales con el tiempo, siendo una de las definiciones más recientes la siguiente: "Complejo dinámico de comunidades de plantas, animales, microorganismos y el medio ambiente inorgánico que interactúan como una unidad funcional, recalcando que los seres humanos son parte integral de éstos" (Montes y Sala, 2007).

La pregunta clave es: ¿De dónde obtiene el agua un ecosistema dado? La respuesta obvia es: De dónde esté más disponible, de cualquiera de los depósitos mencionados anteriormente. Dependiendo de una variedad de factores, el ecosistema típico obtiene su agua de una combinación de estas fuentes. En regiones húmedas, la obtiene principalmente de la precipitación y el agua superficial; en regiones áridas, de la subsuperficie (subsuelo) y del agua subterránea; en regiones superáridas, del agua subterránea, e inusualmente, del aire.

La Figura 5 muestra las raíces profundas de la mezquita o algarrobo (*Prosopis* spp.), que puede enviar sus raíces hasta 15 m en busca de agua subterránea (Meinzer, 1927). Otro ejemplo es el de la agricultura de regadío, un ecosistema artificial (antropogénico) que generalmente obtiene su agua de la escorrentía superficial (embalses) o del agua subterránea (por medio del bombeo de pozos).



Figura 5.- Las raíces profundas de la mezquita o algarrobo, en las orillas del río Santa Cruz, cerca de Tucson, Arizona, EE.UU (Meinzer, U.S. Geological Survey Water Supply Paper 577).

La precipitación es el impulsor más común de los ecosistemas naturales. La precipitación terrestre media anual se ha estimado en $P = 800$ mm (L'vovich, 1979; [Ponce et al., 2000](#)). En el lado seco ($P < 800$), el clima puede clasificarse, con humedad decreciente, en semiárido, árido, hiperárido y superárido (Figura 6). En el lado húmedo ($P \geq 800$), el clima puede clasificarse, con humedad creciente, en subhúmedo, húmedo, hiperhúmedo y superhúmedo (Figura 7). Dentro de estos rangos, los ecosistemas están convenientemente adaptados para hacer uso de cualquier agua disponible, asegurando su continuidad y supervivencia.



Figura 6.- Un ecosistema árido: Sertão de Rio Grande do Norte, Brasil.

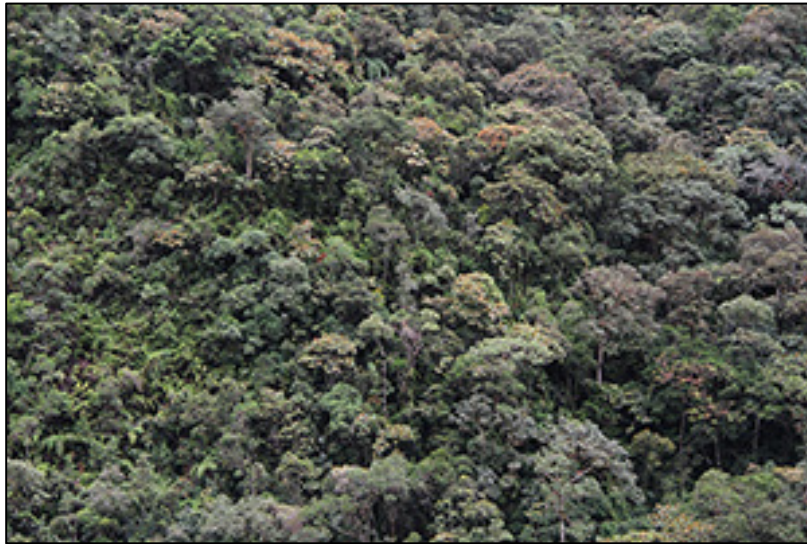


Figura 7.- Un ecosistema húmedo: Bosque montano en la provincia de Loja, Ecuador.

En lugares donde la precipitación es muy reducida, los ecosistemas se apoyan en cualquiera de los otros compartimentos/fuentes. La dependencia de una sola fuente obliga al ecosistema a asegurar la disponibilidad de esa fuente, ya sea: (a) agua superficial, (b) zona vadosa, (c) agua subterránea o (d) aire. Se concluye que en un ecosistema que normalmente dispone de una única fuente le resultará difícil o imposible sobrevivir si la disponibilidad de agua en esa fuente es reducida o eliminada.

ECOHIDROCLIMATOLOGÍA

La mayoría de las plantas extraen agua libremente de la zona vadosa, cuyas dimensiones dependen de la orogénesis y la edad geológica de la región. La cantidad de humedad en la zona vadosa es menor en las regiones áridas y mayor en las regiones húmedas. Algunas plantas obtienen su agua directamente del agua subterránea y/o de la zona capilar que yace directamente encima del nivel freático (Fig. 4).

El tipo y distribución de las plantas en la superficie de la Tierra está determinada por:

1. La posición de la zona a lo largo del espectro climático de precipitación, de árido a húmedo ([Ponce et. al., 2000](#));
2. La profundidad del nivel freático, que determina si las plantas pueden aprovechar la humedad en la zona capilar o el agua subterránea inmediatamente debajo de ella ([Meinzer, 1927](#)); y
3. La presencia de manantiales, lo cual depende en mayor grado de la geología y geomorfología locales ([Ponce et. al., 2017](#)).

La Figura 8 muestra un bosque galería de robles vivos costeros (coast live oak) (*Quercus agrifolia*) ubicado en la localidad de Tierra del Sol, Condado de San Diego, California. El arroyo es efímero, con agua superficial que fluye sólo en respuesta a la precipitación. Sin embargo, cabe notar que hay suficiente humedad en el terreno durante todo el año (en este desierto semiárido) para mantener un bosque de galería bastante saludable.



Figura 8.- Un bosque galería de roble vivo costero, Tierra del Sol, condado de San Diego, California, EE.UU.

Dependiendo de la geología y geomorfología locales, los manantiales pueden fluir hacia la superficie o los humedales, lo que permite el mantenimiento de cantidades importantes de vegetación. Por ejemplo, la Figura 9 muestra un gran espécimen de roble vivo costero ubicado en el rancho McCain, en el valle McCain, Boulevard, condado de San Diego, California. El espécimen, que mide 2.4 m de diámetro normal o diámetro a la altura del pecho (7.55 m de perímetro de la sección elipsoidal), se estima en por lo menos 300 años de edad. La ausencia de este tipo de vegetación en el resto del predominantemente árido valle McCain (con 375 mm de precipitación media anual) indica claramente que esta comunidad de robles vivos costeros está siendo sustentada con agua procedente de manantiales locales ([Ponce, 2013](#); [Ponce et. al., 2017](#)).



Figura 9.- Un espécimen excepcionalmente grande de roble vivo costero, Boulevard, condado de San Diego, California, EE.UU.

EFFECTO DEL BOMBEO DE AGUA SUBTERRÁNEA

El bombeo de agua subterránea típicamente produce un cono de depresión alrededor de la ubicación del pozo ([Theis, 1940](#); [Ponce, 2006](#)). El tamaño del cono de depresión depende del volumen

de captura, correspondiendo los conos de mayor amplitud a los mayores volúmenes de captura (Ponce, 2007). El nivel freático y la zona capilar correspondiente se abaten como resultado del bombeo. De este modo surge un conflicto en el caso de que el agua capturada esté siendo utilizada por el ecosistema local. El abatimiento continuo de la napa freática, en extensión espacial y temporal, está condenado a imponer un estrés hídrico al ecosistema local. En casos extremos, la vegetación podría secarse y morir como consecuencia directa del bombeo.

Se concluye que la viabilidad del bombeo de agua subterránea está más asociada con la ecohidrología que con la hidrogeología. Se hacen necesarios estudios para determinar en qué medida una propuesta de desarrollo de agua subterránea abatirá el nivel freático, y qué efecto tendrá este abatimiento en el sustento de la vegetación local. Se concluye que el bombeo no controlado o no regulado de aguas subterráneas puede causar estrés hídrico en los ecosistemas locales, lo que eventualmente podría llevar a su desaparición. El efecto resultante es la aridización, es decir, la desertificación del paisaje, lo cual bajo cualquier estándar es un impacto negativo.

Un caso ilustrativo es el roble vivo costero (*Quercus agrifolia*) ubicado en Tierra del Sol, condado de San Diego, California, mostrado en la Fig. 10. Este árbol, de edad estimada en por lo menos 100 años, murió en el año 2014, presumiblemente debido al estrés hídrico y las consecuencias derivadas de éste (Ponce, 2014).



Figura 10.- Un espécimen muerto de roble costero en el rancho Morning Star, Tierra del Sol, Condado de San Diego, California, EE.UU. (noviembre de 2014).

RESUMEN

La necesidad del bombeo de agua subterránea es contrastada con la necesidad de que los ecosistemas vegetacionales aprovechen el agua y la humedad de varias fuentes en el medio ambiente. Éstas son: (a) precipitación, (b) agua superficial y escorrentía superficial; (c) agua subsuperficial de la zona no saturada, (d) agua subterránea, y (e) el aire. En general, las plantas dependen de una combinación de estas fuentes para sus necesidades de agua, estando esta combinación influenciada por el clima, geología y geomorfología locales. Mientras que algunos ecosistemas usan varias fuentes, otros se basan principalmente en una sola fuente. Es probable que las plantas que dependen en gran medida de una sola fuente experimenten estrés hídrico si esa fuente es sustancialmente reducida o eliminada. El bombeo no controlado o no regulado de agua subterránea podría potencialmente afectar en forma negativa el sustento y la supervivencia de ecosistemas vegetacionales que dependen principalmente del agua subterránea. En este caso, es fácil intuir la eventual aridización del ecosistema resultante.

REFERENCIAS

- 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.
- Meinzer, O. E.** (1927). [Plants as indicators of ground water](#). U.S. Geological Survey Water Supply Paper 577.
- Montes, C., y O. Sala** (2007). [La evaluación de los ecosistemas del milenio](#). Las relaciones entre el funcionamiento de los ecosistemas y el bienestar humano. Ecosistemas, Vol. 3, No. 16, 137-147.
- 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.** (2013). [Impact of Soitec solar projects on Boulevard and surrounding communities, San Diego County, California](#). Online article.
- Ponce, V. M.** (2014). [Effect of groundwater pumping on the health of arid vegetative ecosystems](#). Online article.
- Ponce, V. M., M. I. Diaz, y L. A. Magallon** (2017). [The linear oasis: Ecohydrology of red shank](#). Online article.
- 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.