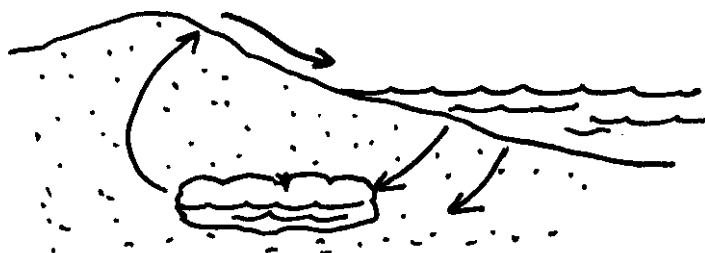


El Ciclo Hidrológico

Historia

La idea del Ciclo Hidrológico, que hoy nos parece tan intuitiva, durante siglos no fue comprendida por filósofos y “científicos”, creyendo que el ciclo se realizaba al revés: el agua penetraba en la corteza desde el fondo de los océanos, se almacenaba en la profundidad, probablemente en grandes cavernas, y ascendía después por el calor de la Tierra hasta las



partes altas de las montañas, surgiendo en las zonas de nacimiento de los ríos. No creían posible que el caudal de un gran río fuera producido exclusivamente por las lluvias y les maravillaba la existencia de manantiales en lugares topográficamente elevados y con

caudales relativamente constantes. Tales, Platón, Aristóteles,... hasta Kepler (1571-1630) y Descartes (“Principios de la Filosofía”, 1644) no se limitaban con esbozar la idea del Ciclo al revés, sino que dedicaban largos textos a pormenorizar las diversas etapas del proceso. Lo más complicado era la pérdida de la sal marina, pero para ello invocaban procesos similares a la destilación.

También hubo excepciones, como el arquitecto romano Vitrubio o Leonardo da Vinci que hablaron del ciclo tal como es.

La Hidrología moderna nace con las experiencias de Perrault, Mariotte y Halley. Fueron los primeros hidrólogos empíricos que basaron sus ideas en medidas y no en la especulación.

En 1674 Pierre Perrault publica “De l’origine des fontaines”. Había medido las precipitaciones de la cuenca alta del Sena y los aforos del río, concluyendo que el volumen de las precipitaciones era seis veces superior a las aportaciones del río. Mariotte, contemporáneo de Perrault, repitió estos experimentos en un punto distinto de la cuenca del Sena, estudiando además la infiltración profunda del agua, y comprobando que el caudal de ciertos manantiales variaba de acuerdo con la oscilación de las precipitaciones.

Faltaba por cuantificar la otra mitad del Ciclo: cómo era posible que del cielo cayera tanta agua. El astrónomo Halley se interesó por el fenómeno de la evaporación porque se empañaban las lentes de sus telescopios. Realizó medidas y cálculos concluyendo que el volumen de agua evaporado un día de verano del Mediterráneo era superior al volumen de agua que recibe de todos los ríos que llegan él¹.

¹ Este es un balance verdaderamente impreciso, hay que considerar las entradas desde el Atlántico. Al menos dejó constancia de que el volumen de agua evaporada de los mares era suficiente para explicar las lluvias.

Se denomina Ciclo Hidrológico al movimiento general del agua, ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea.

Sobre esta definición tan simple podemos realizar algunas observaciones:

1) No es tan simple como “El agua se evapora en el océano y precipita sobre los continentes”. Vemos en la figura adjunta que en ambos medios se produce evaporación y precipitación, aunque es cierto que la evaporación predomina en el océano y la precipitación en los continentes

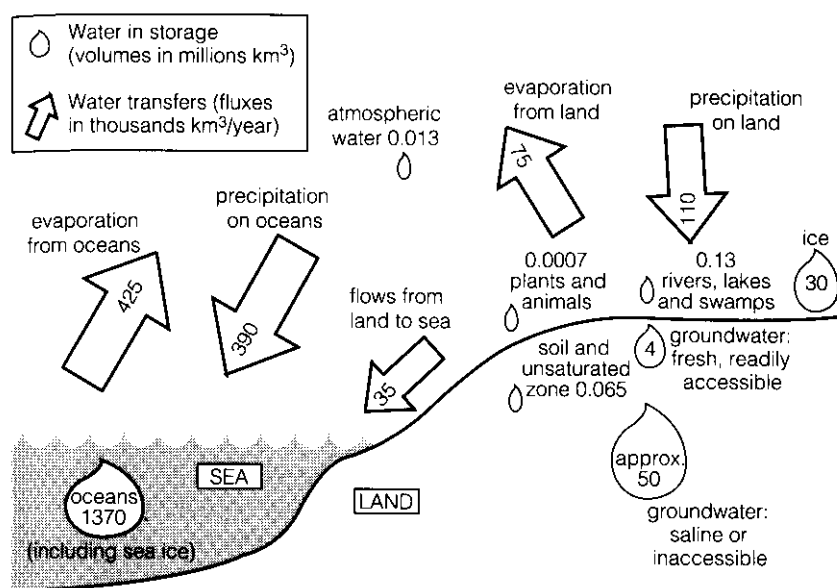


Figure 3.2 A budget for the world's water.

Price, M. (1996) pág 15

2) La escorrentía subterránea es mucho más lenta que la superficial. La lentitud (a veces inmovilidad) de la escorrentía subterránea confiere al ciclo algunas características fundamentales, como que los ríos continúen con caudal mucho tiempo después de las últimas precipitaciones.

3) Las aguas subterráneas no son mas que una de las fases o etapas del ciclo del agua, no tienen ningún misterioso origen magmático o profundo. A veces se olvida esta obviedad y se explotan las aguas de una región como si nada tuvieran que ver con las precipitaciones o la escorrentía superficial, con resultados indeseables.

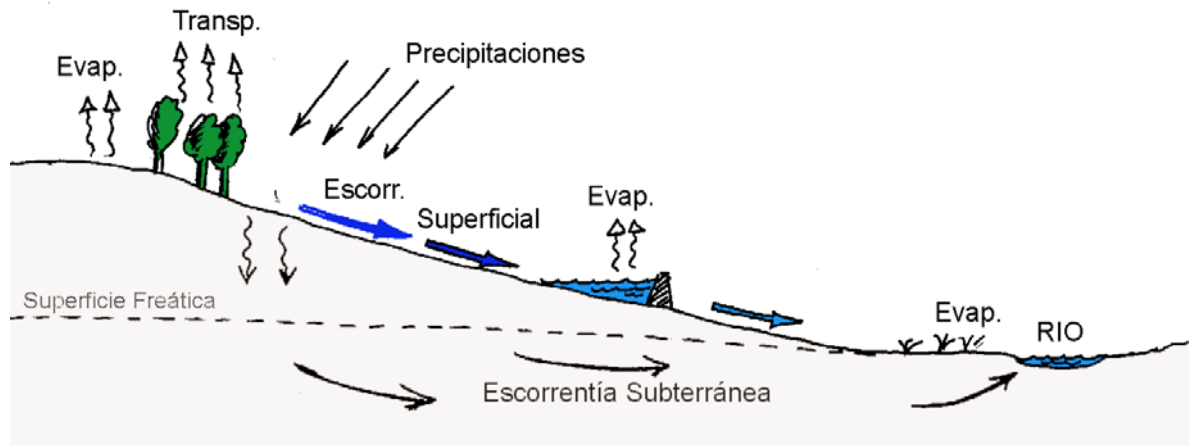
Una excepción: Existen efectivamente surgencias de aguas que proceden del interior de la Tierra y nunca han estado en la superficie ni formado parte del Ciclo Hidrológico. Pueden denominarse *aguas juveniles* y se trata de casos verdaderamente excepcionales. Las aguas termales, sulfuradas, etc. de los balnearios se demuestra mediante estudios isotópicos que son aguas meteóricas en la mayoría de los casos.

Las *aguas fósiles* o *congénitas* son aquellas que quedaron atrapadas en la formación de un sedimento.

Otras aguas subterráneas que parecen ajenas al ciclo son las que aparecen en regiones desérticas. Son aguas que se infiltraron hace decenas de miles de años cuando esas mismas zonas desérticas no eran tales. Tanto estas como las aguas fósiles pertenecen al Ciclo Hidrológico, pero han estado apartadas de él durante un periodo muy prolongado.

Fases del Ciclo

Como se trata de un ciclo podríamos considerar todas sus fases comenzando desde cualquier punto, pero lo más intuitivo puede ser comenzar en la Precipitación y considerar qué caminos puede seguir el agua que cae sobre los continentes en las precipitaciones:



- a) **Evaporación.** Una parte se evapora desde la superficie del suelo (“charcos”) o si ha quedado retenida sobre las hojas de los árboles. A este último fenómeno se le denomina “**interceptación**”, y en lluvias de corta duración sobre zonas de bosque puede devolver a la atmósfera una gran parte del agua precipitada sin haber tocado el suelo.²
- b) **Infiltración.** El agua infiltrada puede, a su vez, seguir estos caminos:
 - b1) **Evaporación.** Se evapora desde el suelo húmedo, sin relación con la posible vegetación.
 - b2) **Transpiración.** Las raíces de las plantas absorben el agua infiltrada en el suelo, una pequeña parte es retenida para su crecimiento y la mayor parte es transpirada.
La suma de b1) y b2) se estudia conjuntamente: es la **evapotranspiración**
 - b3) **Escorrentía subsuperficial o hipodérmica**, (“interflow”), que tras un corto recorrido lateral antes de llegar a la superficie freática acaba saliendo a la superficie
 - b4) Si no es evaporada ni atrapada por las raíces, la gravedad continuará llevándola hacia abajo, hasta la superficie freática; allí aún puede ser atrapada por las raíces de las plantas “freatofitas” (chopos, álamos,...), de raíces muy profundas, y que a diferencia de otras plantas, buscan el agua del medio saturado.
 - b5) Finalmente, el agua restante da lugar a la **escorrentía subterránea**.
- c) **Escorrentía superficial.** El agua de las precipitaciones que no es evaporada ni infiltrada, escurre superficialmente. Aún le pueden suceder varias cosas:

² En zonas de bosque se ha medido que la interceptación habitualmente varía del 20 al 30%. En cuencas en las que ha aumentado la superficie de bosque, se aprecia claramente una disminución en la escorrentía (Martínez, J., 2006 en <http://www.unizar.es/fnca/duero/docu/c11.pdf>)

- c1) Parte es evaporada: desde la superficie de ríos, lagos y embalses también se evapora una pequeña parte³
- c2) Otra parte puede quedar retenida como nieve o hielo o en lagos o embalses. (“Escorrentía superficial diferida”)
- c3) Finalmente una parte importante es la escorrentía superficial rápida que sigue su camino hacia el mar.

En resumen, hemos visto que el agua precipitada puede:

- sufrir Evaporación y Evapotranspiración (a, b1, b2, b4, c1)
- escurrir superficialmente
- constituir escorrentía subterránea

Otros conceptos fundamentales son:

Escorrentía Directa, la que llega a los cauces superficiales en un periodo de tiempo corto tras la precipitación, y que normalmente engloba la escorrentía superficial (c3) y la subsuperficial (b3). Son imposibles de distinguir: una gran parte de lo que parece escorrentía superficial (por el aumento de los caudales que sigue a las precipitaciones) ha estado infiltrada subsuperficialmente

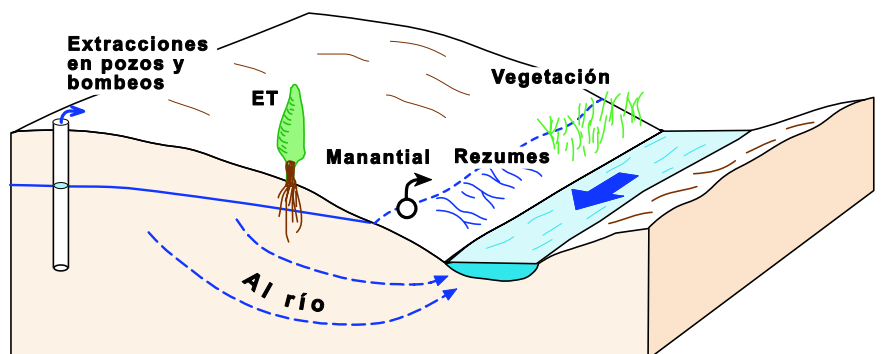
Escorrentía Básica, la que alimenta los cauces superficiales en los estiajes, durante los periodos sin precipitaciones, concepto que engloba la Escorrentía Subterránea (b5) y la superficial diferida (c2)

Salidas del agua subterránea

Ya hemos visto cómo continúan su camino el agua evaporada y la escurrida superficialmente. Para continuar con la visión del ciclo, nos queda sólo reseñar cómo lo hace el agua subterránea, la escorrentía subterránea.

El agua que ha llegado a la zona saturada circulará por el acuífero siguiendo los gradientes hidráulicos regionales. Hasta que sale al exterior o es extraída su recorrido puede ser de unos metros o de bastantes kilómetros, durante un periodo de unos meses o de miles de años. Esta salida al exterior puede ser por los siguientes caminos:

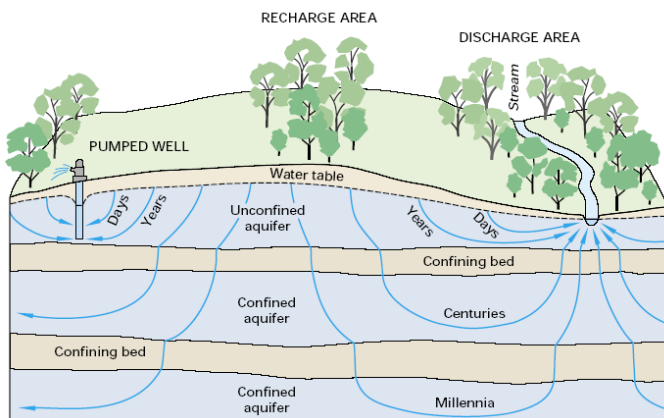
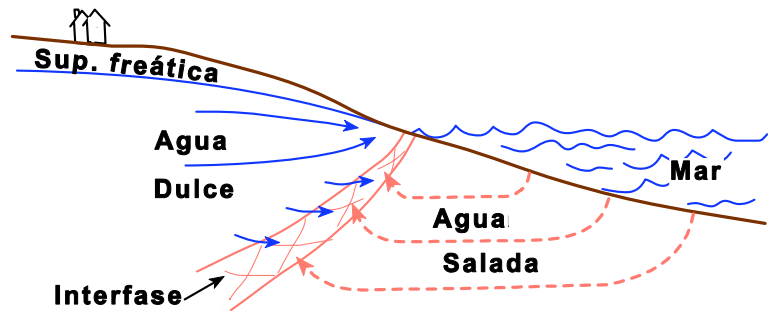
- Ser extraída artificialmente, mediante **pozos o sondeos**. En zonas de topografía plana y superficie freática profunda, la extracción por captaciones constituye casi la única salida del agua subterránea.
- Salir al exterior como **manantial**. Los contextos hidrogeológicos que dan lugar a un manantial son variados, en figura adjunta se esquematiza sólo uno de ellos.
- **Evapotranspiración**, por plantas freatofitas o si la superficie freática está próxima a la superficie. En laderas que cortan la superficie freática se genera una abundante vegetación.



³ Proporcionalmente pequeña, si consideramos el total de una gran cuenca, pero puede ser muy importante en lugares áridos que se abastecen con un embalse

- **Alimentar un cauce** subrepticamente. Es normal que un río aumente paulatinamente su caudal aguas abajo aunque no reciba afluentes superficiales.

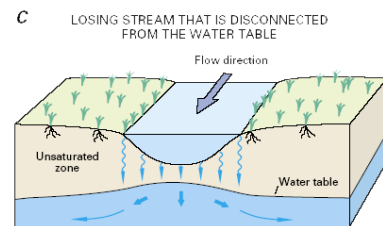
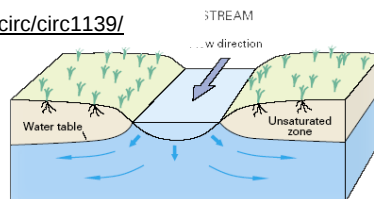
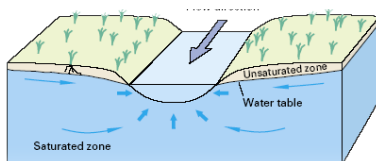
- En zonas costeras: Afluye subterráneamente **al mar**. Esta pérdida es necesaria para mantener estable la “interfase” agua dulce – agua salada.



De todas ellas, exceptuando las áreas costeras, la más importante es la salida hacia los cauces. En una región con alternancia entre capas permeables y otras poco permeables (en la figura: “confining beds”) el flujo sería así:

Esta afluencia de agua subterránea a los ríos no se produce siempre, en ocasiones el flujo es del río al acuífero. Se denominan ríos **efluentes** e **influentes** respectivamente (o

Tomado de <http://water.usgs.gov/pubs/circ/circ1139/>



Tomado de <http://water.usgs.gov/pubs/circ/circ1186>

ganadores y perdedores.

Balance Hídrico en una Cuenca

Cuenca Hidrográfica es la definida por la topografía, fácilmente delimitable sobre un mapa topográfico. **Cuenca hidrogeológica**⁴ es un concepto que engloba también a las aguas subterráneas. Una cuenca hidrográfica constituirá también una cuenca hidrogeológica cuando no existan trasvases apreciables de aguas subterráneas de una cuenca a otra, es decir, que podamos considerar que las divisorias topográficas que dividen a la escorrentía superficial constituyen también divisorias de la escorrentía subterránea entre cuencas adyacentes. Esto se cumple en general para cuencas grandes de más de 1000 o 2000 km². Para cuencas pequeñas habría que considerar la hidrogeología de la zona con cuidado

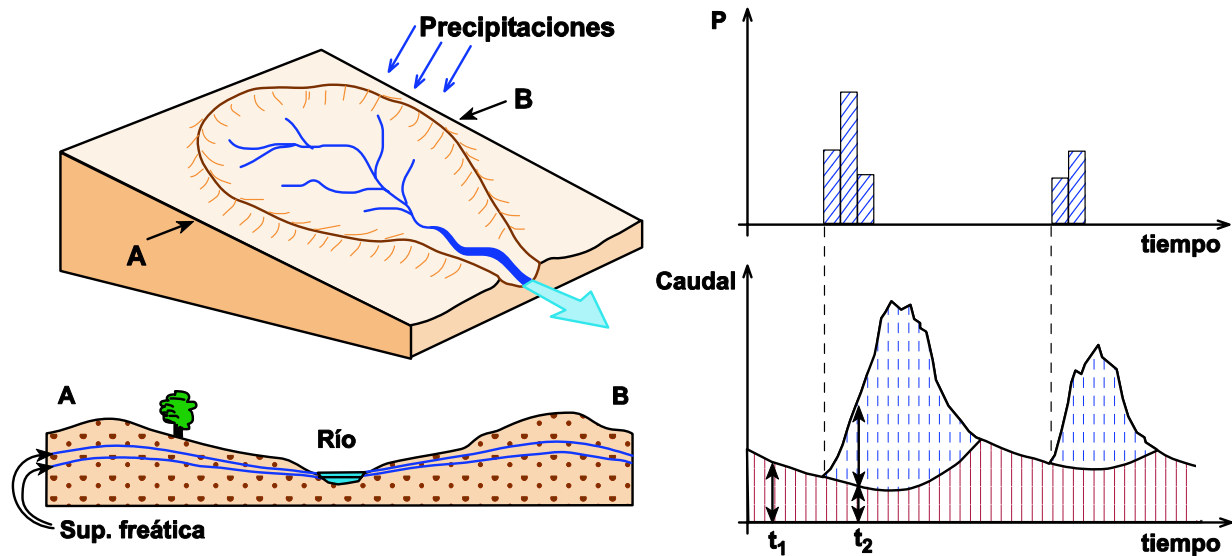
Cuando hace tiempo que no se producen precipitaciones, un río puede continuar llevando agua por las siguientes causas:

- Nieve o hielo que se están fundiendo

⁴ También podemos decir "cuenca hidrológica" si queda claro en el contexto que nos estamos refiriendo a todas las aguas (superficiales y subterráneas).

"Cuenca hidrográfica" o "cuenca topográfica" se refiere a la escorrentía superficial.

- Almacenamiento superficial: lagos, embalses
- Almacenamiento subterráneo: Acuíferos



Para simplificar, pensemos en una cuenca sin las dos primeras causas, representada en la figura adjunta. Antes de producirse las precipitaciones, el caudal se iba agotando paulatinamente hasta que, al comenzar las precipitaciones, el caudal comienza a aumentar. En el instante t_1 todo el caudal es debido a escorrentía básica (en este caso, escorrentía subterránea). En el instante t_2 , parte del caudal (líneas continuas) será debido a la escorrentía básica, y otra parte (área de trazos) será debida a la escorrentía directa.

Con las mismas precipitaciones, el hidrograma resultante será distinto según se trate de una cuenca permeable con importantes acuíferos, o de una cuenca impermeable, sin acuíferos.

Vemos, por tanto, que el conjunto de acuíferos de una cuenca se comportan realmente como un “embalse subterráneo”, ya que guardan el agua cuando hay exceso y la sueltan lentamente cuando no hay precipitaciones.

Por tanto, si consideramos una cuenca hidrogeológicamente cerrada, y un periodo de varios años, *el volumen total de Precipitaciones no evapotranspiradas ha de ser igual a la aportación* (volumen aportado) *del río en la desembocadura durante ese mismo periodo.* Efectivamente, para un periodo largo estamos integrando la escorrentía superficial y la subterránea que alimentó al cauce en los periodos de estiaje.

Para un **año hidrológico** (1 Oct-30 Sept⁵) el **balance hídrico** sería:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \pm \Delta \text{ almacenamiento}$$

$$\text{Precip (+ Agua de otras cuencas)} = \text{ET} + \text{Esc. Sup} + \text{Esc Subt (+ Agua a otras cuencas)} \pm \Delta \text{ almac.}$$

Si es una cuenca cerrada:

$$\text{Precip} = \text{ET} + \text{Esc. Sup} + \text{Esc Subt} \pm \Delta \text{ almac.}$$

Y si, además es para un periodo de más de 20 años:

$$\text{Precip} = \text{ET} + \text{Esc. Sup} + \text{Esc Subt}$$

⁵ A veces se considera del 1 Septiembre al 31 de Agosto, lo que es más lógico, puesto que en Septiembre comienzan las precipitaciones.

Parece muy simple pero para conocer el funcionamiento de una cuenca como unidad hidrogeológica es necesario cuantificar su balance hídrico. Como término medio, para todas las cuencas españolas, la última ecuación presenta aproximadamente estos valores:

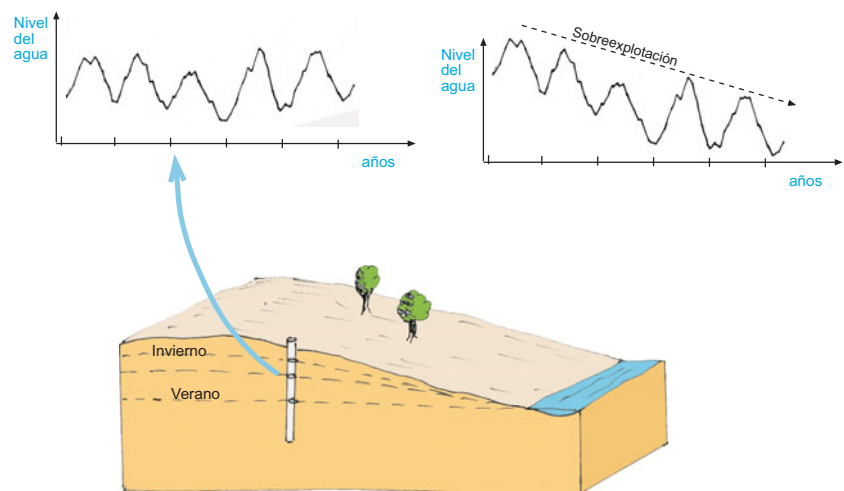
$$670 \text{ mm.} = 480 \text{ mm.} + 130 \text{ mm.} + 60 \text{ mm.}$$

$$100 \% = 72\% + 19\% + 9\%$$

También se establece el **balance hídrico de un acuífero** concreto o de un “*sistema acuífero*” (=conjunto de acuíferos que se consideran conjuntamente). La ecuación general (Entradas = Salidas $\pm$ Δ almacenamiento) es la misma que para la cuenca como unidad, pero en un acuífero hay que considerar entradas y salidas desde y hacia otros acuíferos, infiltración o recarga artificial, bombeo, salida hacia los cauces o el mar, etc.

Recursos, reservas y sobreexplotación

Si explotamos el agua que se puede renovar (considerando un periodo de unos años) se dice que explotamos los **recursos**. Si utilizamos más agua de la que puede renovarse, se dice que estamos explotando las **reservas**, y estamos produciendo **sobreexplotación**. Los niveles del agua en los pozos cada año se encuentran más bajos.



Mantener inalterado el balance hídrico de una región mantiene los ecosistemas en su estado natural, pero no nos permite evaluar la máxima explotación de los recursos hídricos sin llegar a sobreexplotación.

La evaluación de los recursos hídricos de una zona en base al balance hídrico “natural” (previo a la explotación) ha sido denominado el *mito del balance hídrico* (*Water Budget Myth*, Alley et al., 1999, pág. 15).

Una cierta sobreexplotación inicial puede provocar un equilibrio distinto, pero que da lugar a un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos, disminuyendo la ET, incrementando la infiltración, y provocando la alimentación de los acuíferos a partir de los cauces superficiales.⁶

Veámoslo con un ejemplo esquemático:

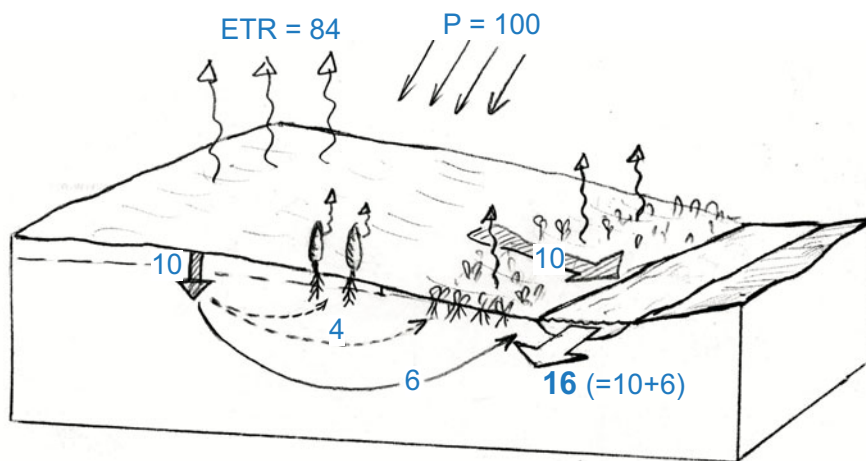
⁶ Lecturas imprescindibles sobre estos aspectos:

Llamas, M. R.; N. Hernández y Luís Martínez (2000).- *El uso sostenible de las aguas subterráneas*

Custodio, E. (2000).- *The complex concept of overexploited aquifer*

Pueden encontrarse (junto con otros interesantes trabajos) en:

<http://www.fundacionmbotin.com/CTAguas.htm>

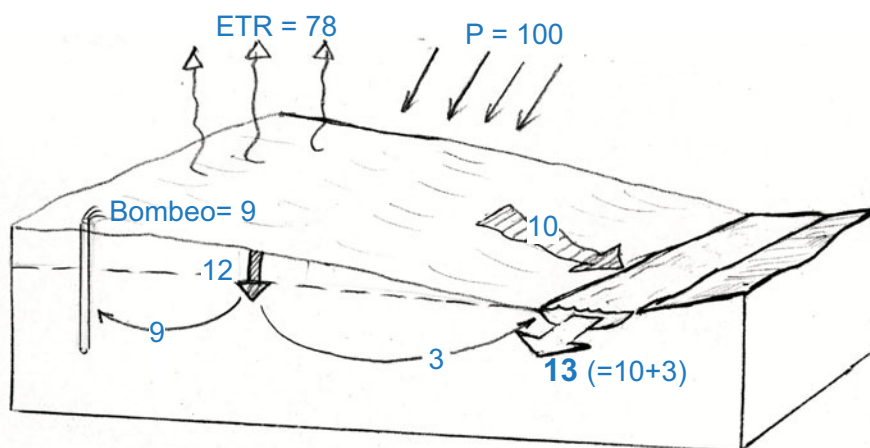


$$\text{Precipitaciones (100)} = \text{ETR (84)} + \text{Escorr Sup (10)} + \text{Escorr Subt (6)}$$

$$\text{Precipitaciones (100)} = \text{ETR (84)} + \text{Escorr Total (16)}$$

Balance en condiciones naturales:

De los 100 que se reciben por precipitaciones, 84 se pierden como ET, 16 salen de la cuenca (Escorrentía total).



$$\text{Precipitaciones (100)} = \text{ETR (78)} + \text{Escorr Sup (10)} + \text{Escorr Subt (3)} + \text{Bombeos (9)}$$

$$\text{Precipitaciones (100)} = \text{ETR (78)} + \text{Escorr Total (13)} + \text{Bombeos (9)}$$

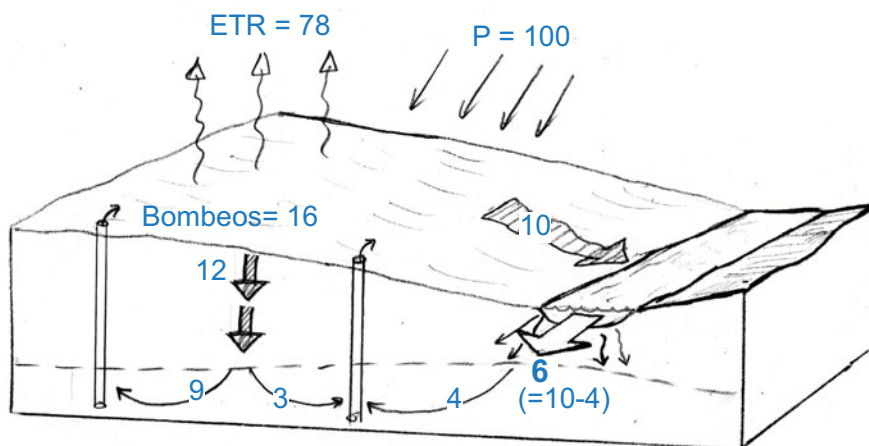
Comienzan los bombeos:

La superficie freática desciende. Esto provoca:

a) **La infiltración aumenta** (de 10 a 12), ya que la humedad del suelo ha disminuído.

b) **La ET disminuye**: los árboles de largas raíces ya no toman agua bajo la superficie freática, y la franja de la ribera ya no recibe alimentación desde abajo.

b) **La escorrentía subterránea que alimenta el río disminuye** (de 6 a 3) ya que la pendiente de la superficie freática es menor,



$$\text{Precipitaciones (100)} = \text{ETR (78)} + \text{Escorr Sup (10)} + \text{Escorr Subt (-4)} + \text{Bombeos (16)}$$

$$\text{Precipitaciones (100)} = \text{ETR (78)} + \text{Escorr Total (6)} + \text{Bombeos (16)}$$

Bombeos más intensos, el río se hace influente:

Suponemos que la ET no ha disminuído, pero el río ahora no se alimenta con parte de la escorrentía subterránea, sino que él mismo pierde alimentando los acuíferos

(El volumen de los bombeos se reincorporará posteriormente al ciclo: si son para uso agrícola acabará, en su mayor parte, como ET. Si el uso es urbano, pasará a la escorrentía superficial)

En el sencillo esquema anterior, hemos visto que mediante una sobreexplotación inicial se ha conseguido explotar el 16% de las precipitaciones. Si se bombea un volumen mayor lo único que se conseguiría es que la superficie freática estuviera cada año más abajo y que el bombeo fuera más costoso, y, al final, inviable.

El precio que se ha debido pagar por esa explotación de los recursos hídricos ha sido la desaparición de vegetación y zonas húmedas y la disminución del caudal del río. Si ese precio es aceptable o no para la rentabilidad obtenida, es una decisión difícil.

Bibliografía: Textos fundamentales

Hidrología Superficial

- Aparicio, F.J. (1997).- *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Limusa, 303 pp.
- Chow, V.T.; D.R. Maidment & L.W. Mays (1993).- *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill, 580 pp.
- Hornberger, G. (1998).- *Elements of Physical Hydrology*. Johns Hopkins University Press
- Singh, V.P (1992).- *Elementary Hydrology*. Prentice Hall, 973 pp.
- Viessman, W. & G. L. Lewis (2003).- *Introduction to Hydrology*. Pearson Education, 5ª ed., 612 pp.
- Wanielista, M. (1997).- *Hydrology and Water Quality Control* 2ª edición. Ed. Wiley
- Ward, A.D. & S.W. Trimble (2004).- *Environmental Hydrology*. CRC Lewis, 2ª ed., 475 pp.

Hidrología Subterránea

- Custodio, E. y M. R. Llamas (Eds.) (1983) .- *Hidrología Subterránea*. (2 tomos). Omega, 2350 pp.
- Domenico, P. A. & Schwartz, F. W. (1998).- *Physical and chemical hydrogeology*. Wiley, 502 pp.
- Fetter, C. W. (2001).- *Applied Hydrogeology*. Prentice-Hall, 4ª ed., 598 pp.
- Freeze, R. A. y J. A. Cherry (1979).- *Groundwater*. Prentice-Hall, 604 pp.
- Hiscock, H. (2005).- *Hydrogeology. Principles and practice*. Blackwell, 389 pp.
- Price, M. (2003).- *Agua Subterránea*. Limusa, 341 pp.
- Schwartz, F. W. & H. Zhang (2003).- *Fundamentals of Groundwater*. Wiley, 592 pp.
- Watson, I. & Burnett (1995).- *Hydrology. An environmental approach*. CRC Lewis, 702 pp.

En Internet

- Alley, W.M. et al.- *Sustainability of Ground-Water Resources* (86 pp. 19 Mb)
<http://water.usgs.gov/pubs/circ/circ1186/>
- Ralph C. Heath, R.C. (1983) *Basic Ground-water Hydrology*, (88 p., 10 Mb)
<http://water.usgs.gov/pubs/wsp/wsp2220/>
- Winter, T.C. et al.- *Ground Water and Surface Water A Single Resource* (87 pp. 12 Mb)
<http://water.usgs.gov/pubs/circ/circ1139/>