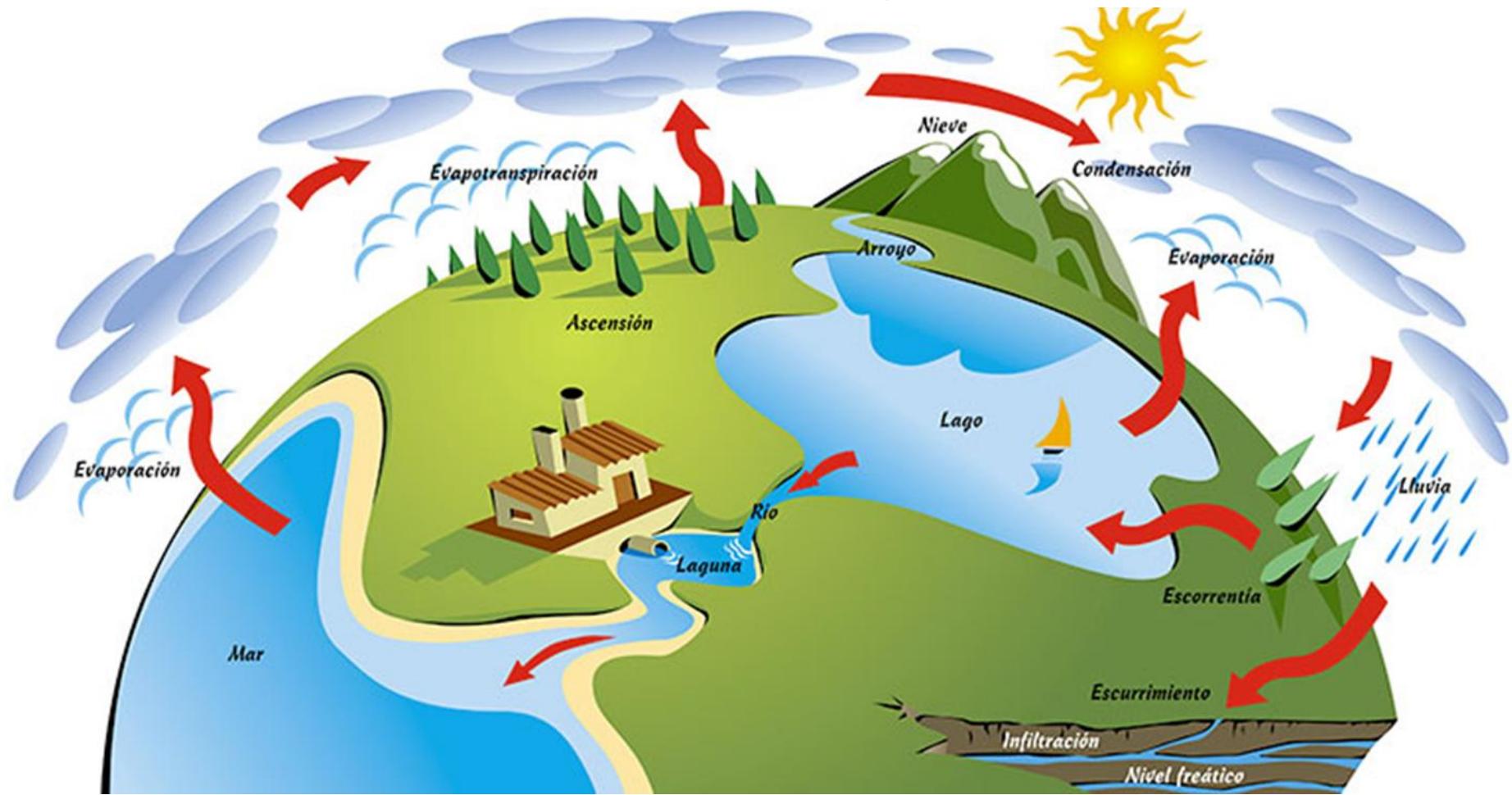




Curso de Hidrología

Unidad 1. Introducción y Balance hídrico

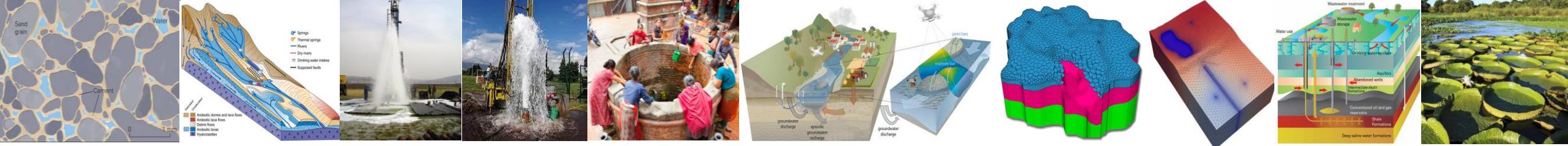




¿Qué es la hidrología?

La hidrología (del griego ὕδωρ, hýdōr, "agua", y λόγος, lógos, "estudio") es una **rama de las ciencias de la Tierra que se enfoca en analizar el agua, su presencia, distribución, movimiento y características físicas, químicas y mecánicas**, tanto en océanos como en la atmósfera y la superficie terrestre. Entre sus campos de estudio se encuentran las precipitaciones, escorrentía superficial, humedad del suelo, evapotranspiración y el balance de masas glaciares, entre otros.

Por otro lado, el análisis específico del agua subterránea es abordado por la hidrogeología.



¿Qué es la hidrogeología?

La hidrogeología es la rama de la hidrología que se enfoca en el estudio de las aguas subterráneas.

Estudio de la fase terrestre subterránea del ciclo hidrológico, sus aspectos físicos (**hidrogeología**), sus aspectos dinámicos (**hidrodinámica**), sus aspectos químicos (**hidroquímica**) y su relación con los seres vivos.

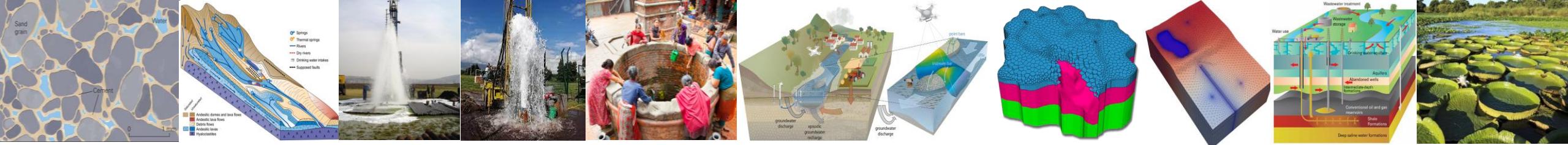
- **Distribución del agua subterránea.**
- **Movimiento del agua a través de diferentes tipos de suelos y rocas.**
- **Interacción del agua con el medio ambiente geológico**



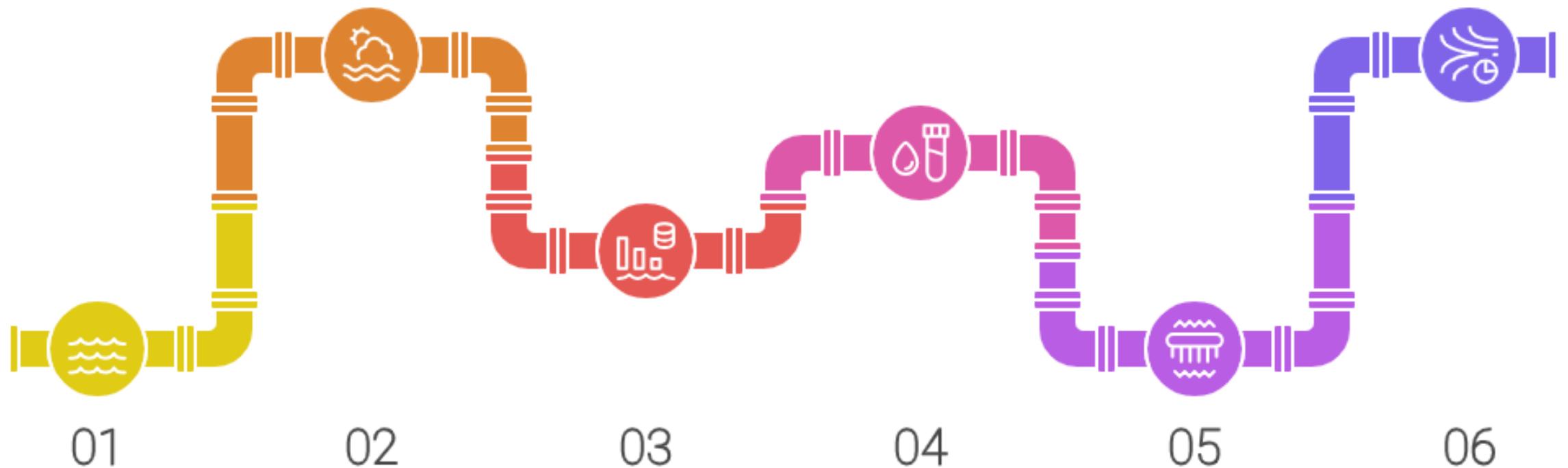
Conexiones interdisciplinarias de la hidrología

Integra conocimientos de diversas disciplinas científicas:

- **Principios de física** (mecánica de fluidos, termodinámica, balance energético) para comprender el movimiento y almacenamiento del agua.
- **Conceptos de química** (calidad del agua, ciclos biogeoquímicos, transporte de contaminantes) para evaluar la salud y la contaminación del agua.
- **Principios de biología** (ecología acuática, microbiología, dinámica de ecosistemas) para comprender el papel del agua en la vida.
- **Conocimientos de geología** (hidrogeología, geomorfología, sedimentología) para estudiar las interacciones del agua con la Tierra.
- **Ciencias atmosféricas** (meteorología, climatología, teledetección) para investigar el papel del agua en el tiempo y el clima.



Desarrollo Histórico de la Hidrología



Período Especulativo

Creencias tempranas sobre el agua

Período de Observación

Observaciones naturales del agua

Período de Medida

Introducción de herramientas de medición

Período de Experimentación

Experimentos científicos con agua

Período de Modernización

Avances tecnológicos en hidrología

Período de Empirismo

Enfoque basado en datos en hidrología



PERÍODO ESPECULATIVO

Aunque las fechas no son exactas, varios autores como O.E. Meinzer, definen este período, desde la antigüedad hasta el 1400. Durante este período el concepto de ciclo hidrológico fue especulado por muchos filósofos como [Homero](#), [Tales](#), [Platón](#), y [Aristóteles](#), entre otros en Grecia; por [Séneca](#) y [Plinio](#) en Roma. La mayoría de los conceptos desarrollados en esta época resultaron ser erróneos, con excepción del propuesto por **Marco Vitruvio**, quien **estableció que el agua subterránea provenía de la infiltración del agua de lluvia y del derretimiento de la nieve.**

La Evolución de la Comprensión Hidrológica

A este período pertenecen las grandes construcciones hidráulicas de la antigüedad las que requirieron un conocimiento hidrológico práctico, entre ellos los pozos de Arabia, los Kanats de Persia, los acueductos de Roma, los canales y sistemas de irrigación y obras de control de inundaciones en China, y zonas de riego en Egipto, Mesopotamia, India y en los Andes.

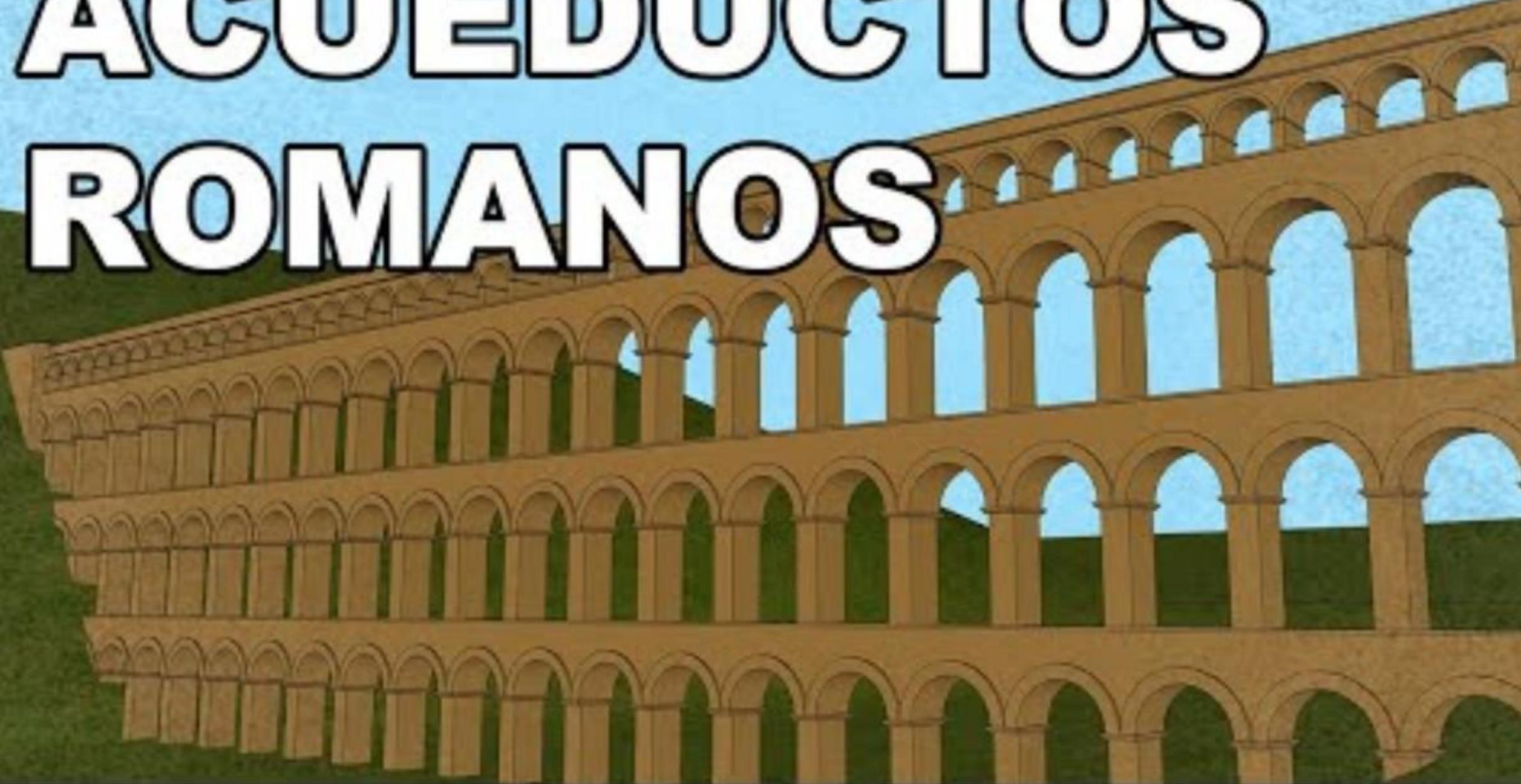
Los filósofos
especulan sobre el
ciclo hidrológico

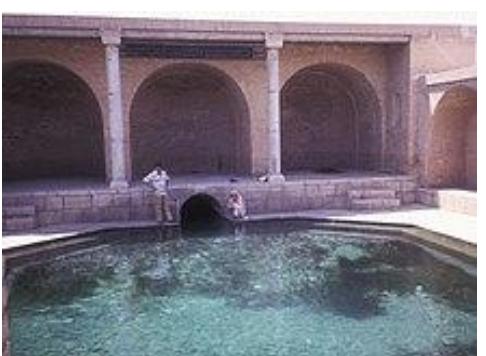
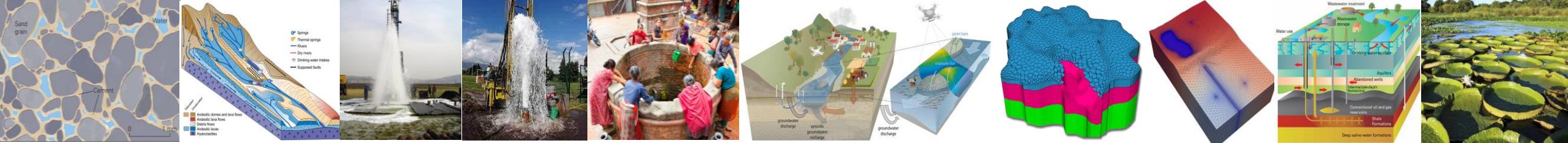
Tiempos
Antiguos

La teoría de aguas
subterráneas de
Marco Vitruvio

1400

ACUEDUCTOS ROMANOS





Babilonia,Persia,Egipto...

Qanats- foggaras

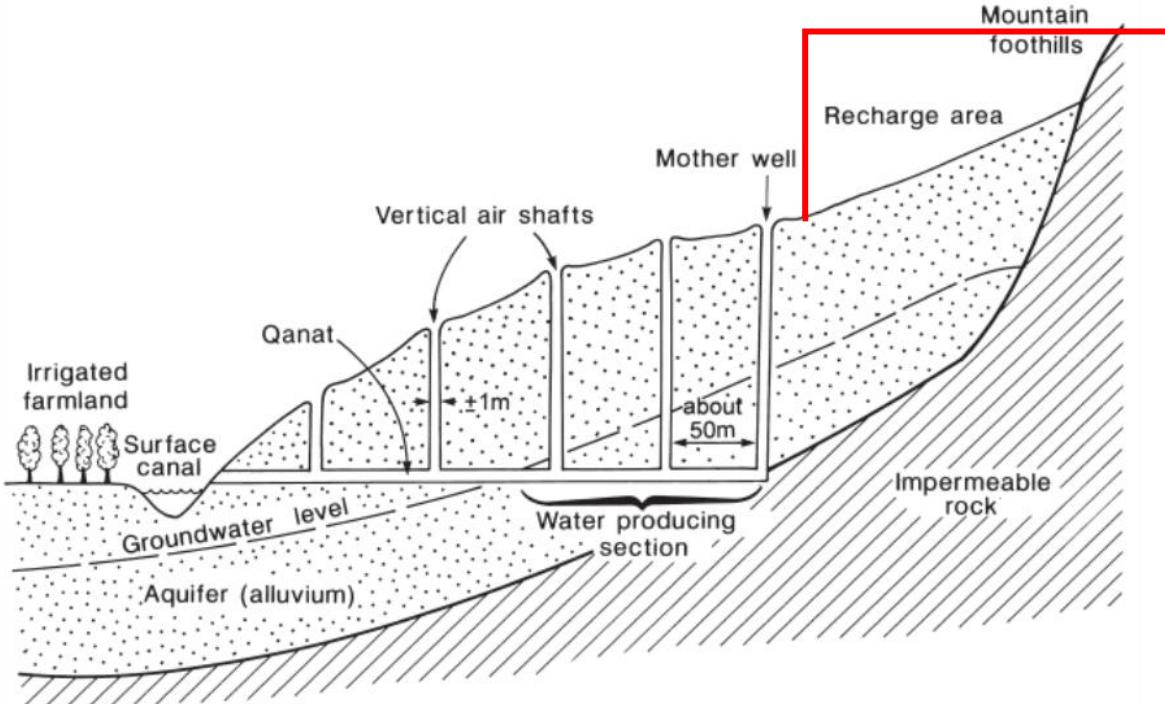
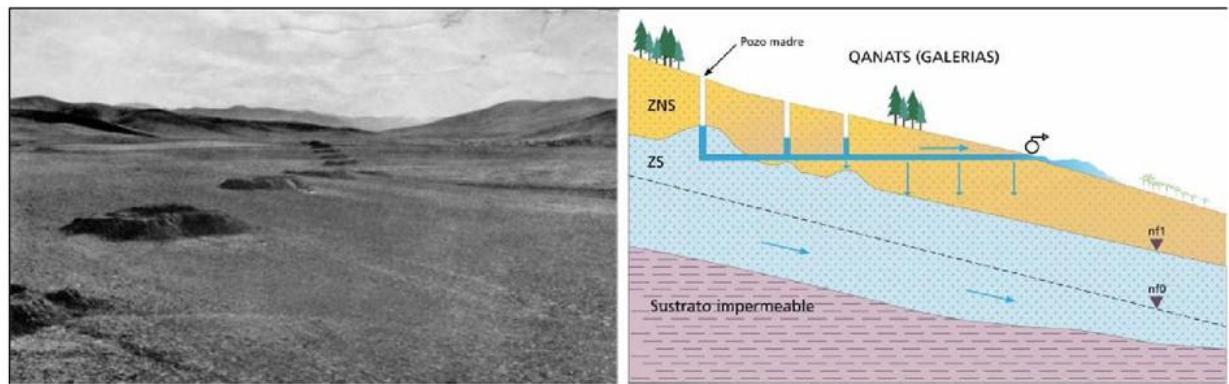


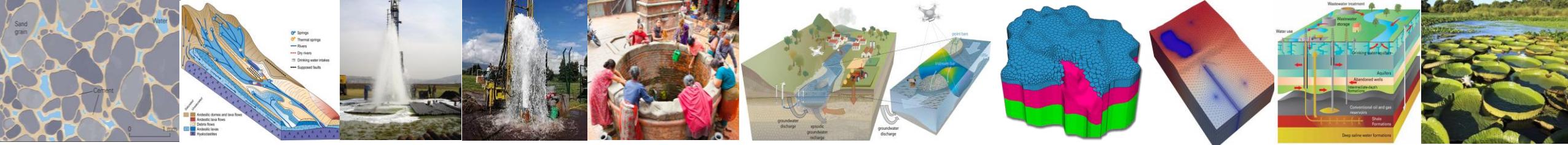
Fig. 1.3 Longitudinal section of a qanat. Based on Beaumont (1968) and Biswas (1972).



Water flow in the foggara

a) through rainfall



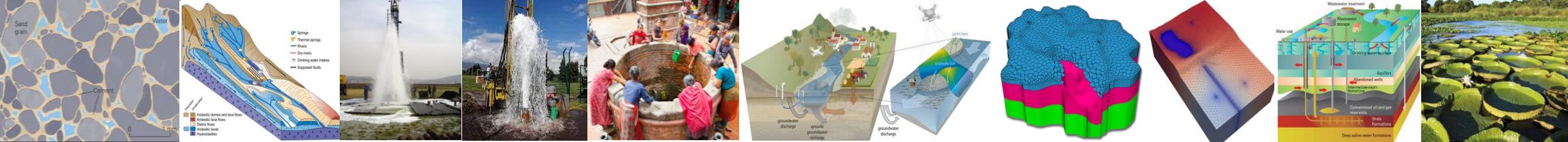


Los primeros en aprovechar las aguas superficiales y subterráneas fueron los griegos y romanos, quienes ya reconocían la importancia del agua y desarrollaban métodos para su utilización y manejo.



China Pozos y sondeos

Los pozos de bambú típicamente se construían perforando manualmente el suelo blando y utilizando secciones de bambú para encamisar y sostener las paredes del pozo. Esto prevenía el colapso de las paredes del pozo y permitía un acceso más seguro y duradero al agua subterránea. Estos pozos no solo se utilizaban para extraer agua para uso doméstico y agrícola, sino también en la creación de sistemas de irrigación innovadores.



Viernes 21 de diciembre 2012

En Alemania descubren cuatro pozos de agua

Dichos pozos habrían estado Fueron abiertos entre 5206 – 5098 a.J.C.

[Twittear](#)

Me gusta

0

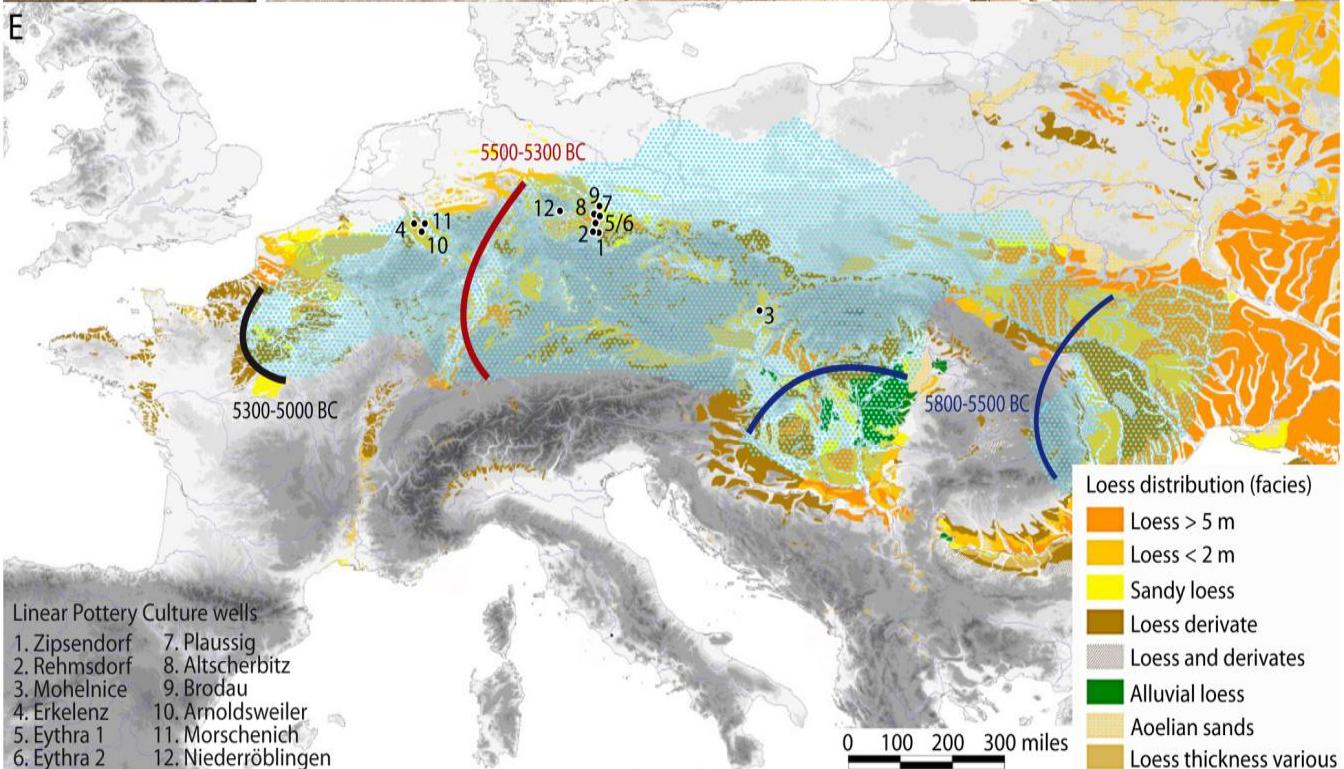
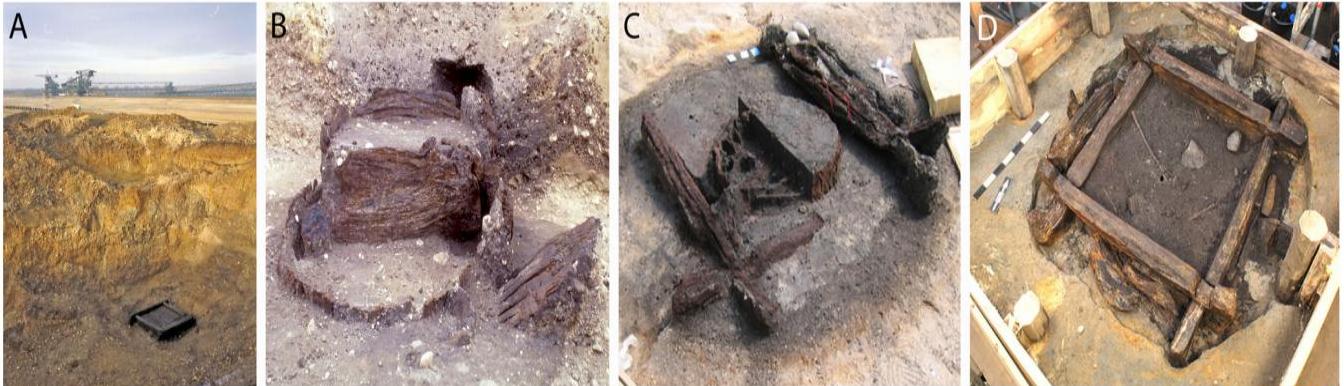


Foto:Generacion.com

Hoy se dio a conocer que arqueólogos de la Universidad de Friburgo, Suiza, hallaron en el este de Alemania antiguos pozos desconocidos hasta ahora en territorio de Europa.

Son cuatro pozos de hasta siete metros de profundidad. Se encuentran cerca de Leipzig, Sajonia. Fueron abiertos entre 5206 – 5098 a.J.C., supuestamente para abastecer de agua un pequeño poblado. La madera de sus paredes se ha conservado bien bajo tierra en un medio sin aire.

"El hallazgo testimonia que el nivel de vida y de desarrollo de la gente de aquella época era mucho más alto de lo que creíamos antes", dijo Willy Tegel, jefe del grupo que descubrió los pozos.

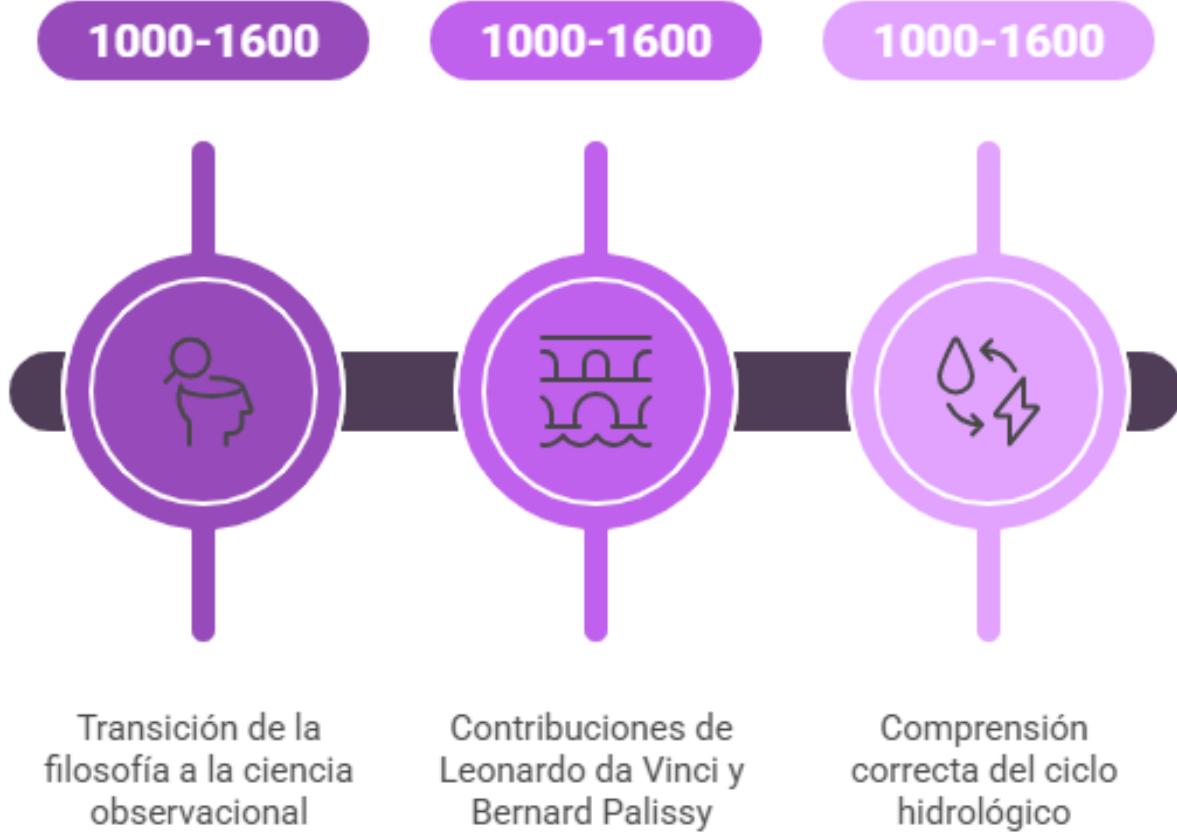




PERÍODO DE OBSERVACIÓN

La Evolución de la Comprensión Hidrológica

Entre el 1000 y el 1600. En el período conocido como el Renacimiento, se tuvo un cambio gradual de los conceptos filosóficos puros de la hidrología a la ciencia observacional de tal época. Por ejemplo, basándose en observaciones, Leonardo da Vinci y Bernard Palissy lograron una correcta comprensión del ciclo hidrológico, especialmente en lo relativo a la infiltración de la lluvia y retorno del agua a través de manantiales.





PERÍODO DE EXPERIMENTACIÓN

Primeros Estudios de Pozos

Investigación inicial de las dinámicas de agua subterránea



Mediciones de Perrault

Mediciones precisas en el río Sena que contribuyen a la comprensión hidrológica

Mediciones de Halley

Estudio del mar Mediterráneo que proporciona información sobre los ciclos de agua

Mediciones de Mariotte

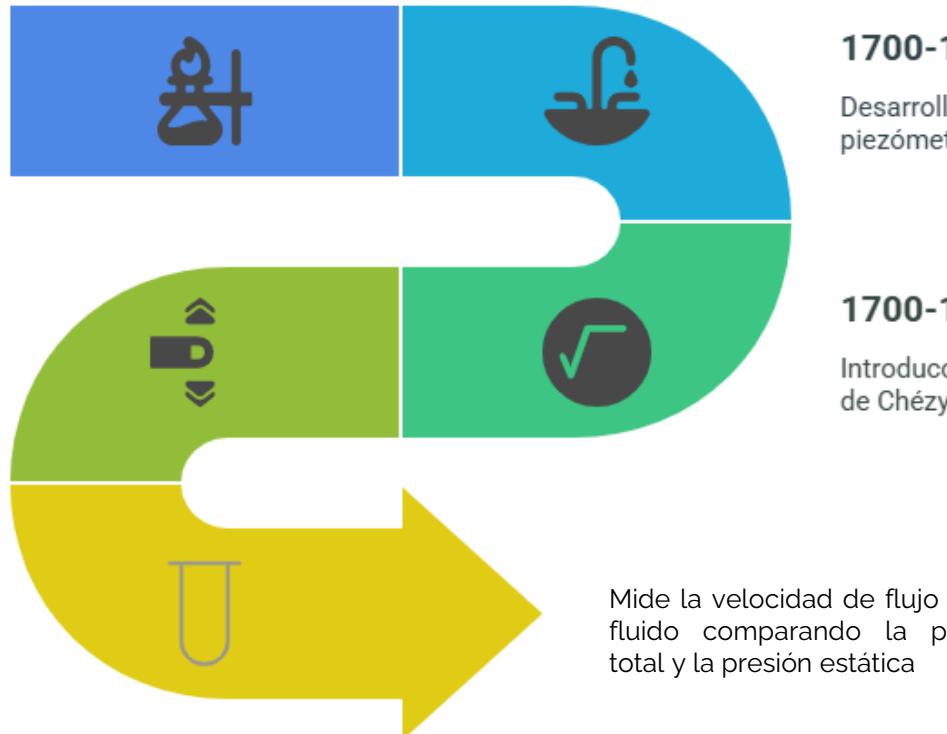
Observaciones detalladas en el Sena que mejoran el conocimiento de los patrones de flujo

El teorema de Bernoulli establece que en un flujo de fluido ideal ([incompresible y sin viscosidad](#)), la suma de la energía de presión, la energía cinética y la energía potencial se mantiene constante a lo largo de una línea de corriente.

Entre el 1700 y el 1800. Durante el Siglo XVIII, los estudios experimentales hidráulicos tuvieron gran auge y como resultado de ellos muchos principios hidráulicos fueron obtenidos, por ejemplo:

1700-1800

Los estudios experimentales hidráulicos florecen



1700-1800

Desarrollo del teorema y piezómetro de Bernoulli

1700-1800

Establecimiento del principio de D'Alembert

1700-1800

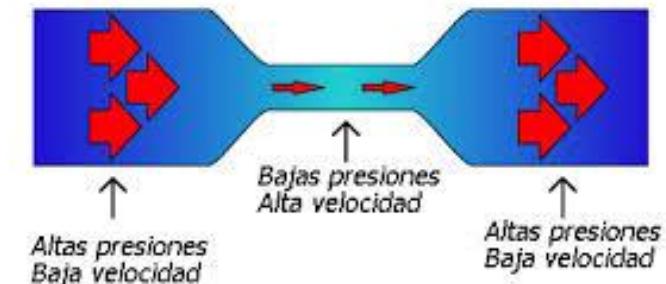
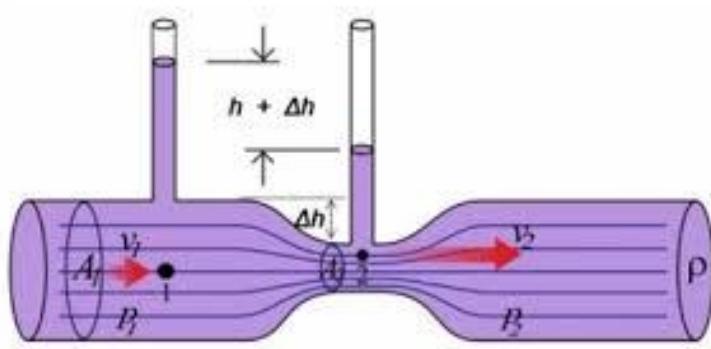
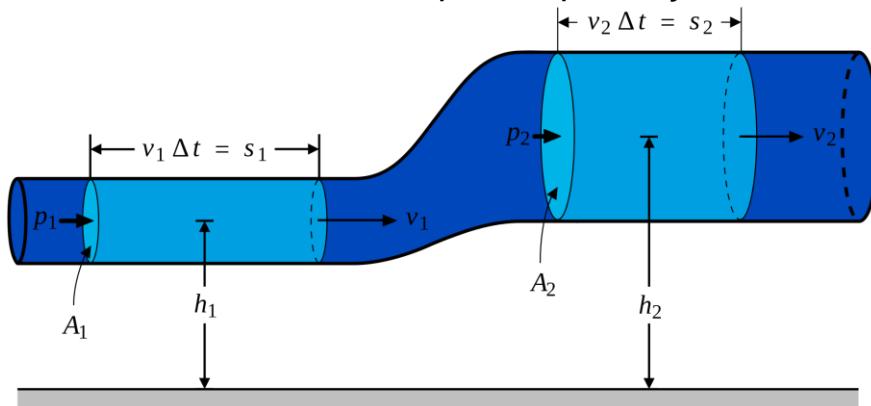
Innovación de los tubos de Pitot y Borda

Mide la velocidad de flujo de un fluido comparando la presión total y la presión estática

La **fórmula de Chézy** describe [la velocidad](#) media del flujo en [un flujo turbulento](#) en un canal abierto y se utiliza ampliamente en campos relacionados con [la mecánica](#) y [la dinámica de fluidos](#). Los canales abiertos se refieren a cualquier conducto abierto, como ríos, zanjas, canales o tuberías parcialmente llenas. La fórmula de Chézy se define para flujos en equilibrio uniforme y no uniformes, que varían gradualmente.



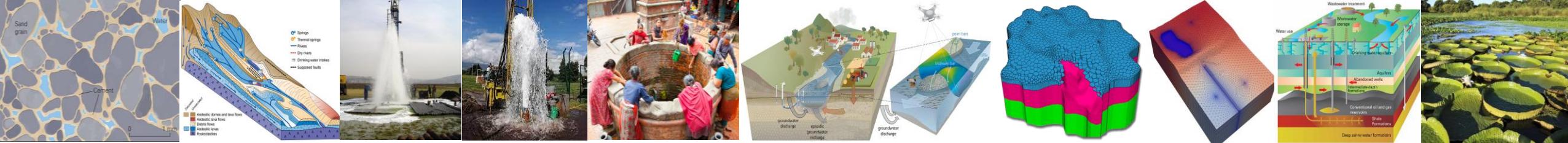
Imagina que estás soplando sobre una hoja de papel y, en lugar de caer, se levanta! Eso ocurre por el teorema de Bernoulli, que dice que cuando el aire (o el agua) se mueve rápido, la presión disminuye. Entonces, al soplar rápido sobre la hoja, el aire arriba tiene menos presión que el aire debajo, que la empuja hacia arriba. Este principio ayuda a los aviones a volar y a los barcos a moverse más rápido.



El teorema de Bernoulli establece que en un flujo de fluido ideal (incompresible y sin viscosidad), la suma de la energía de presión, la energía cinética y la energía potencial se mantiene constante a lo largo de una línea de corriente. Matemáticamente, se expresa como:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{constante}$$

Donde: P es la presión, ρ la densidad del fluido, v la velocidad, g la aceleración gravitacional y h la altura. Este principio explica fenómenos como la sustentación en las alas de los aviones, el efecto Venturi y el funcionamiento de algunos instrumentos de medición de flujo. Sin embargo, en aplicaciones reales, es necesario considerar efectos de viscosidad y turbulencia.



Imagina que tienes un tobogán de agua y quieres saber qué tan rápido baja el agua por él. La ley de Chézy-Manning nos ayuda a calcular la velocidad del agua en ríos y canales, dependiendo de qué tan inclinado esté el suelo y qué tan áspero sea el camino por donde fluye. Si el fondo es liso, el agua va más rápido; si es rugoso con piedras y arena, va más lento. Es como cuando deslizas una pelota en una pista lisa o en una con baches: en la lisa, se mueve más rápido.

La expresión más simple de la fórmula de Manning se refiere al [coeficiente de Chézy](#):

$$C = \frac{1}{n} (R(h))^{1/6}$$

De donde, por sustitución en la ya referida fórmula de Chézy, se deduce su forma más habitual:

$$V(h) = \frac{1}{n} (R(h))^{2/3} \sqrt{S}$$

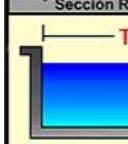
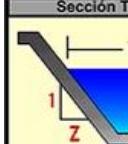
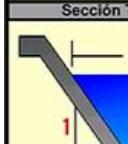
$$Q(h) = \frac{1}{n} A (R(h))^{2/3} \sqrt{S}$$

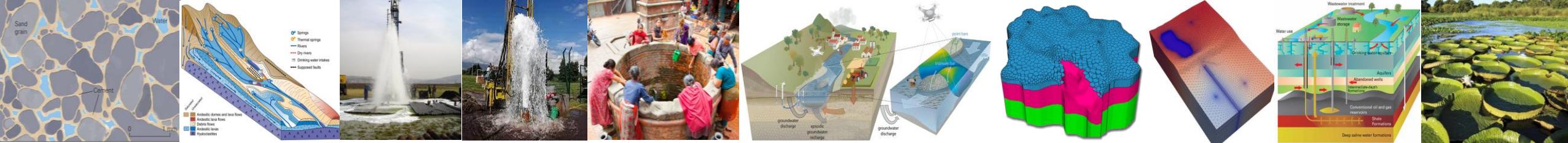
siendo:

- C = coeficiente de proporcionalidad que se aplica en la [fórmula de Chézy](#): $V(h) = C \sqrt{R(h) * S}$;
- $R(h)$ = [radio hidráulico](#), en m, que es función del tirante hidráulico h ;
- n = coeficiente que depende de la [rugosidad](#) de la pared;
- $V(h)$ = velocidad media del agua, en [m/s](#), que es función del tirante hidráulico h ;
- S = la pendiente de la [línea de agua](#) en m/m;
- A = área de la sección del flujo de agua;
- $Q(h)$ = caudal del agua en m^3/s .

$$V(h) = \frac{1}{n} * \left(\frac{A(h)}{P(h)} \right)^{2/3} * S^{1/2}$$

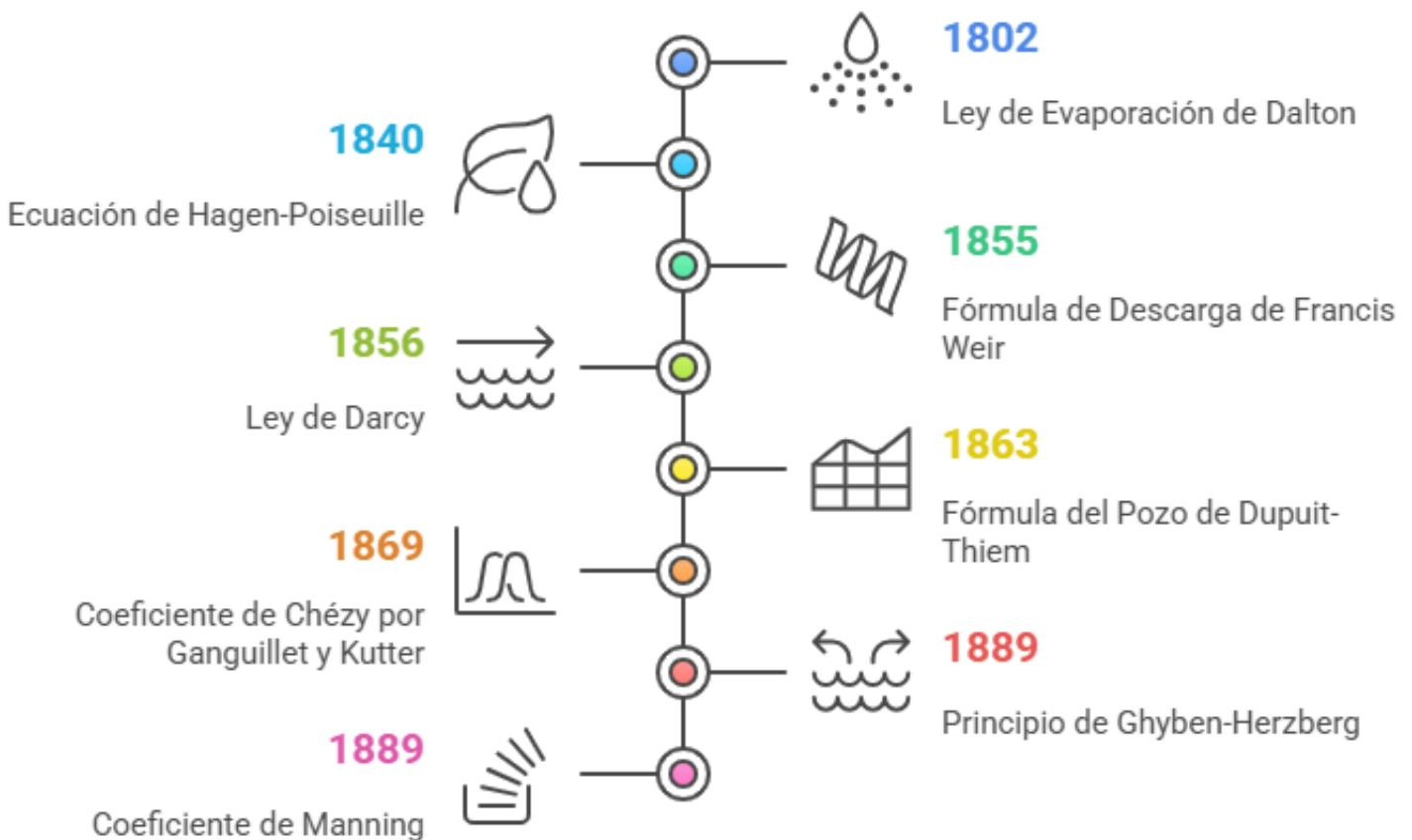


Tabla 3-1 Relaciones geométricas de las secciones transversales más frecuentes (Fuente: V.T.Chow)			
Sección Rectangular	Área mojada	Perímetro mojado	Radio hidráulico
	by	$b + 2y$	$\frac{by}{b + 2y}$
Ancho superficial	Profund. hidráulica	Factor de sección	$by^{1.5}$
	y		
Sección Trapezoidal	Área mojada	Perímetro mojado	Radio hidráulico
	$(b + Zy)y$	$b + 2y \sqrt{1 + Z^2}$	$\frac{(b + Zy)y}{b + 2y \sqrt{1 + Z^2}}$
Ancho superficial	Profund. hidráulica	Factor de sección	$\frac{(b + Zy)y}{b + 2Zy}$
$b + 2Zy$			
Sección Triangular	Área mojada	Perímetro mojado	Radio hidráulico
	Zy^2	$2y \sqrt{1 + Z^2}$	$\frac{Zy}{2 \sqrt{1 + Z^2}}$
Ancho superficial	Profund. hidráulica	Factor de sección	$\frac{1}{2}y$
$2Zy$			
Sección Circular	Área mojada	Perímetro mojado	Radio hidráulico
	$\frac{1}{8}(\theta - \sin\theta)\phi^2$	$\frac{1}{2}\theta \cdot \phi$	$\frac{1}{4}(1 - \frac{\sin\theta}{\theta})\phi$
Ancho superficial	Profund. hidráulica	Factor de sección	$\frac{(\sin \frac{1}{2}\theta)\phi}{2\sqrt{y(D-y)}}$
$\left(\frac{\sin \frac{1}{2}\theta}{2}\right)\phi$	$\frac{1}{8}(\theta - \sin\theta)^{1.5} \phi^{2.5}$		$32 \left(\frac{\sin \frac{1}{2}\theta}{2}\right)^{0.5} \phi^{2.5}$
Sección Parabólica	Área mojada	Perímetro mojado	Radio hidráulico
	$\frac{2}{3}Ty$	$T + \frac{8}{3} \frac{y^2}{T} *$	$\frac{2T^2y}{3T^2 + 8y^2} *$
Ancho superficial	Profund. hidráulica	Factor de sección	$\frac{3A}{2y}$



PERÍODO DE MODERNIZACIÓN

Principales Avances Hidrológicos del Siglo XIX



El Siglo XIX fue una gran era de hidrología experimental que tuvo su inicio en el período precedente y que marcó más firmemente el comienzo de la ciencia de la hidrología. Sin embargo la mayoría de contribuciones se tuvieron en la geohidrología y en la medición de las aguas superficiales (Hidrometría). Por ejemplo: la ecuación de Hagen-Poiseuille del flujo capilar (1840), la Ley de Darcy (1856), la fórmula del pozo de Dupuit-Thiem (1863)² y el principio de Ghyben-Herzberg (1889).

En el campo de la hidrometría, en relación con el aforo de aguas superficiales, se tuvo un gran avance, incluyendo: el desarrollo de varias fórmulas del flujo e instrumentos de medida y el comienzo del aforo sistemático de corrientes. Entre las contribuciones principales se tiene la fórmula de descarga de los vertedores de Francis (1855), la determinación del coeficiente de Chézy propuesta por Ganguillet y Kutter (1869) y por Manning (1889) y en el campo de la evaporación, la ley de Dalton (1802), por último, en el campo de la precipitación, la correlación entre la lluvia y la altitud, determinada por Miller (1849).



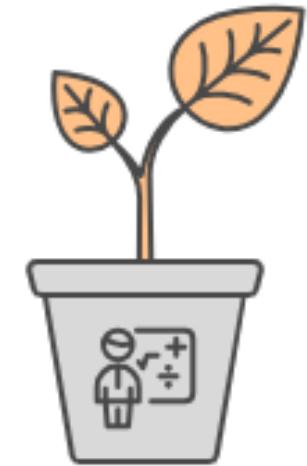
PERÍODO DE EMPIRISMO

Entre el 1900 y el 1930. Aunque muchos trabajos de hidrología moderna fueron iniciados en el [Siglo XIX](#), el desarrollo de la hidrología cuantitativa fue todavía inmaduro y entonces la ciencia de la hidrología fue enormemente empírica, debido a que la base física para varias determinaciones hidrológicas no era bien conocida, o bien porque se disponía de mucha información cuantitativa experimental para ser usada y procesada. Durante la parte final del Siglo XIX, y los siguientes 30 años, el empirismo hidrológico fue evidente, por ejemplo: cientos de fórmulas empíricas fueron propuestas, seleccionando sus coeficientes y parámetros con base en el juicio y experiencia.

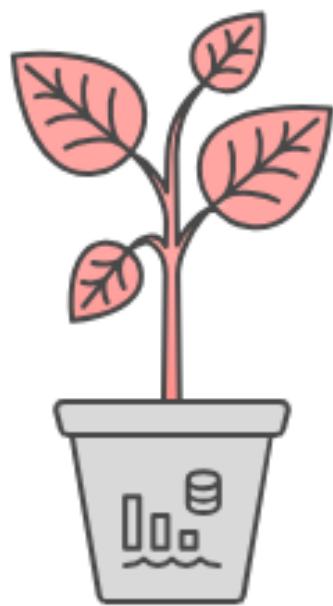
Evolución de la Ciencia Hidrológica



Empirismo Inicial



Desarrollo de Fórmulas



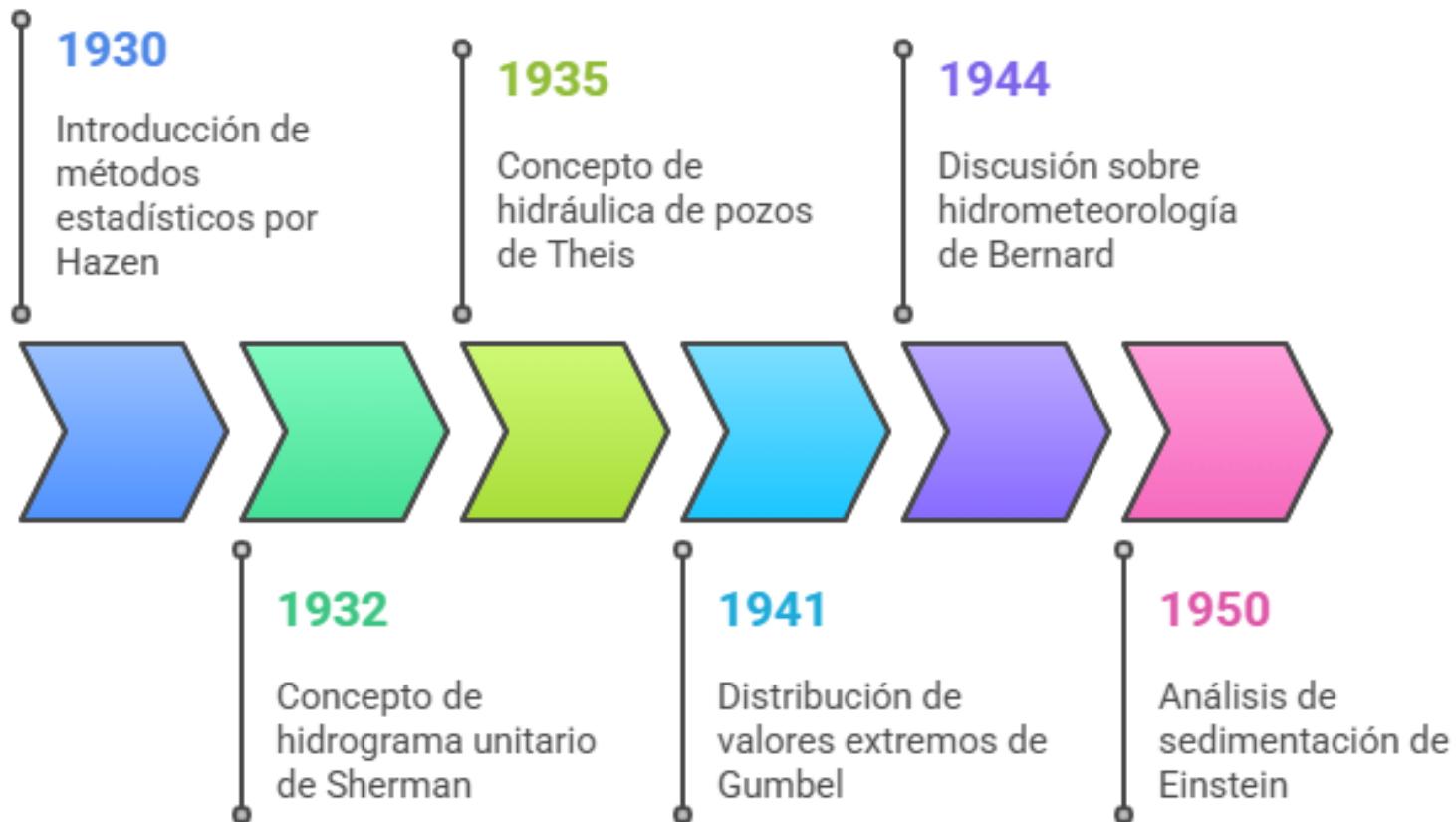
Madurez Cuantitativa



PERÍODO DE RACIONALIZACIÓN

Entre el 1930 y el 1950. En este período se inician los grandes hidrólogos que utilizan el análisis racional para resolver los problemas hidrológicos planteados, así por ejemplo se tienen a: [Sherman](#) (1932) con el concepto de [hidrograma unitario](#). [Horton](#) (1953) con la teoría de la infiltración de la lluvia, [Theis](#) (1935) que introduce el concepto de noequilibrio en la hidráulica de pozos, [Gumbel](#) (1941) que propone la distribución de probabilidades de valores extremos, [Hazen](#) (1930) que promueve el uso de la estadística en la hidrología, [Bernard](#) (1944) que discute el papel de la meteorología y marca el inicio de la hidrometeorología y [Einstein](#) (1950) quien introduce el análisis teórico en los estudios de sedimentación. Otro notable desarrollo de este período fue el establecimiento de muchos laboratorios hidráulicos e hidrológicos en el mundo.

Avances en Hidrología: 1930-1950





Progreso en la Ciencia Hidrológica

PERÍODO DE TEORIZACIÓN

Desde el 1950 hasta el presente. Alrededor del año 1950, las aproximaciones teóricas tienen uso extensivo a los problemas hidrológicos, ya que muchos principios racionales propuestos anteriormente, pueden ser sujetos a un verdadero análisis matemático. Los instrumentos sofisticados y las computadoras de alta velocidad empiezan su desarrollo y entonces, se pueden tomar medidas delicadas del fenómeno hidrológico y resolver ecuaciones matemáticas complicadas involucradas en la aplicación de modernas teorías hidrológicas

1

Enfoques Teóricos

Introducción de métodos matemáticos para resolver problemas hidrológicos.

2

Desarrollo de Instrumentos

Avance y sofisticación de herramientas de medición hidrológicas.

3

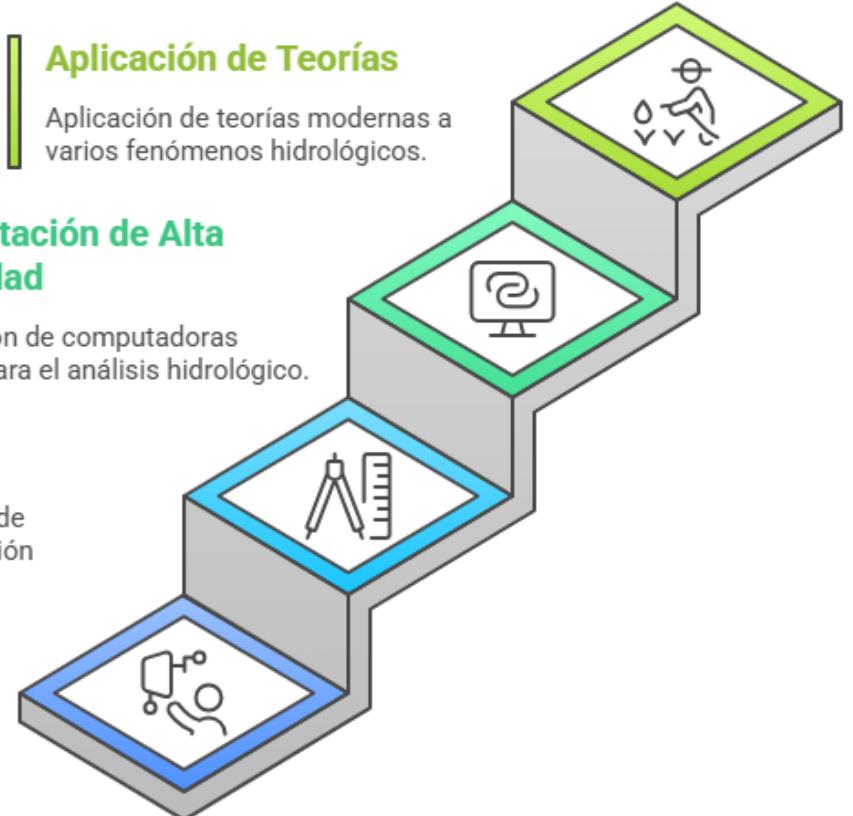
Computación de Alta Velocidad

Integración de computadoras rápidas para el análisis hidrológico.

4

Aplicación de Teorías

Aplicación de teorías modernas a varios fenómenos hidrológicos.



Son ejemplos de los estudios hidrológicos teóricos: el análisis linear y no linear de sistemas hidrológicos, la adopción de conceptos estadísticos y transitorios en la hidrodinámica del agua subterránea y superficial, La aplicación de las teorías de transferencia de masa y calor al análisis de evaporaciones, al estudio energético y dinámico de la [humedad del suelo](#), la generación secuencial de datos hidrológicos sintéticos y el uso de la investigación de operaciones en el diseño de sistemas de [recursos hídricos](#).

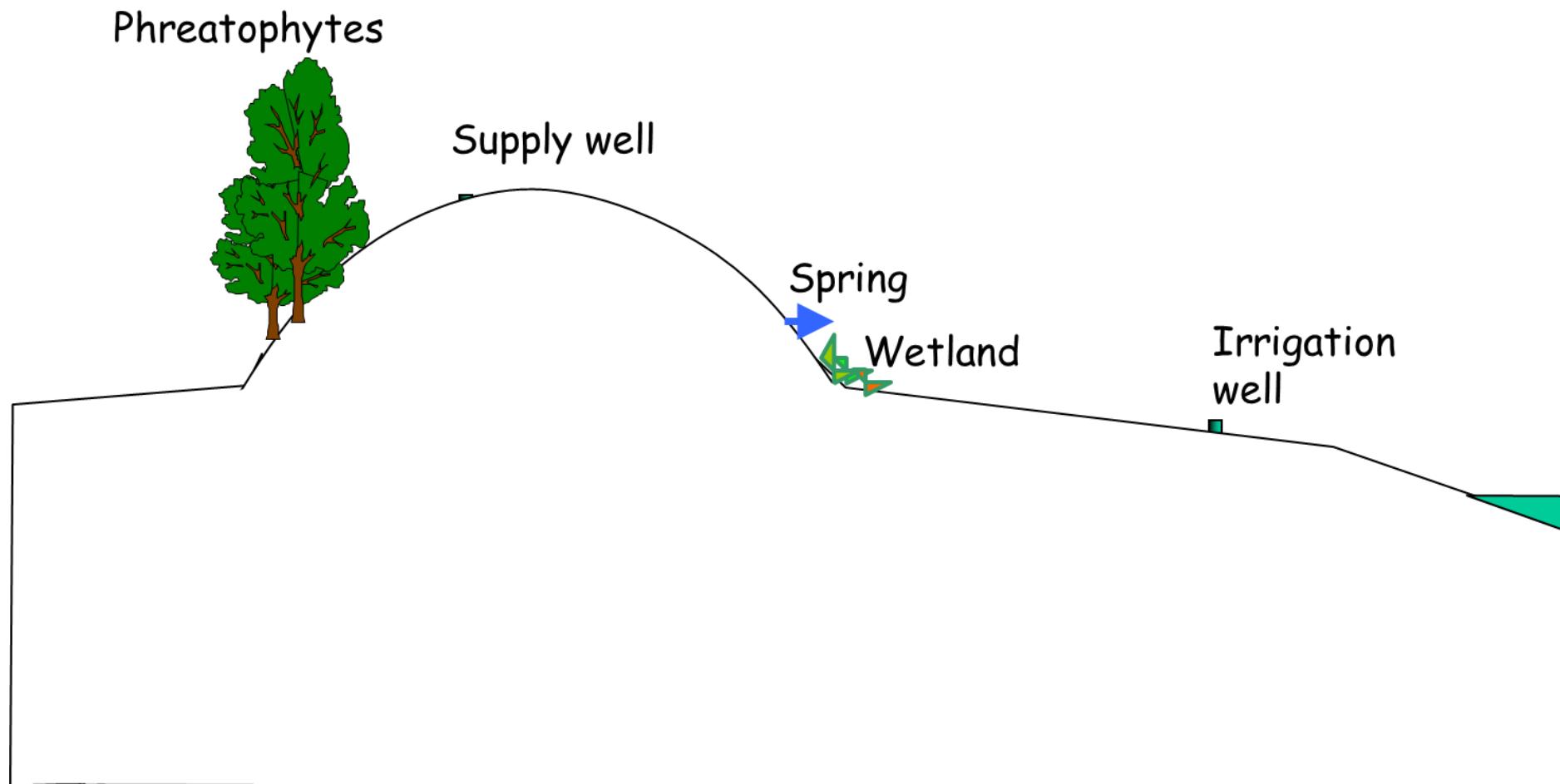


Groundwater and the landscape



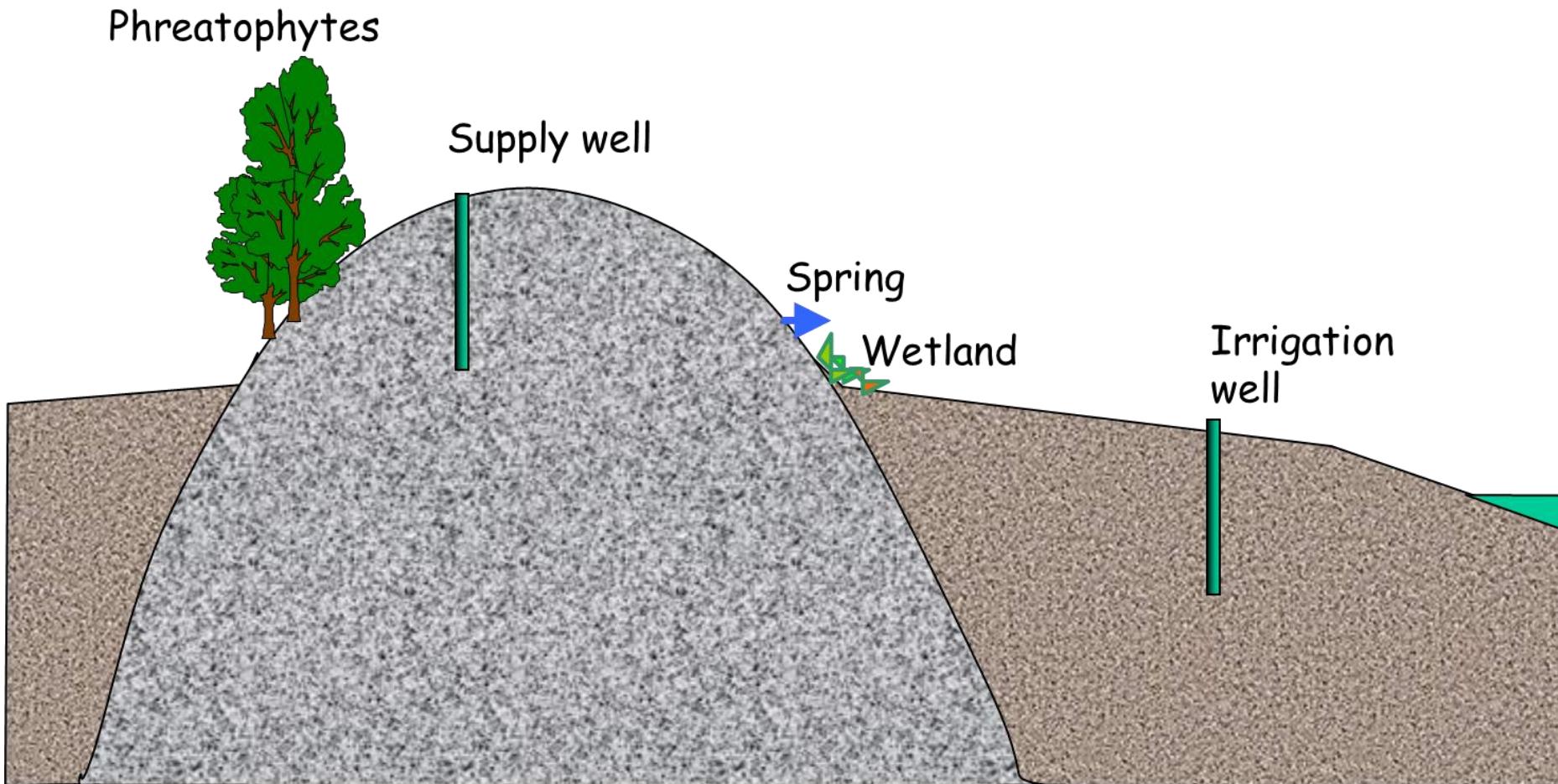


Landscape for a lay person



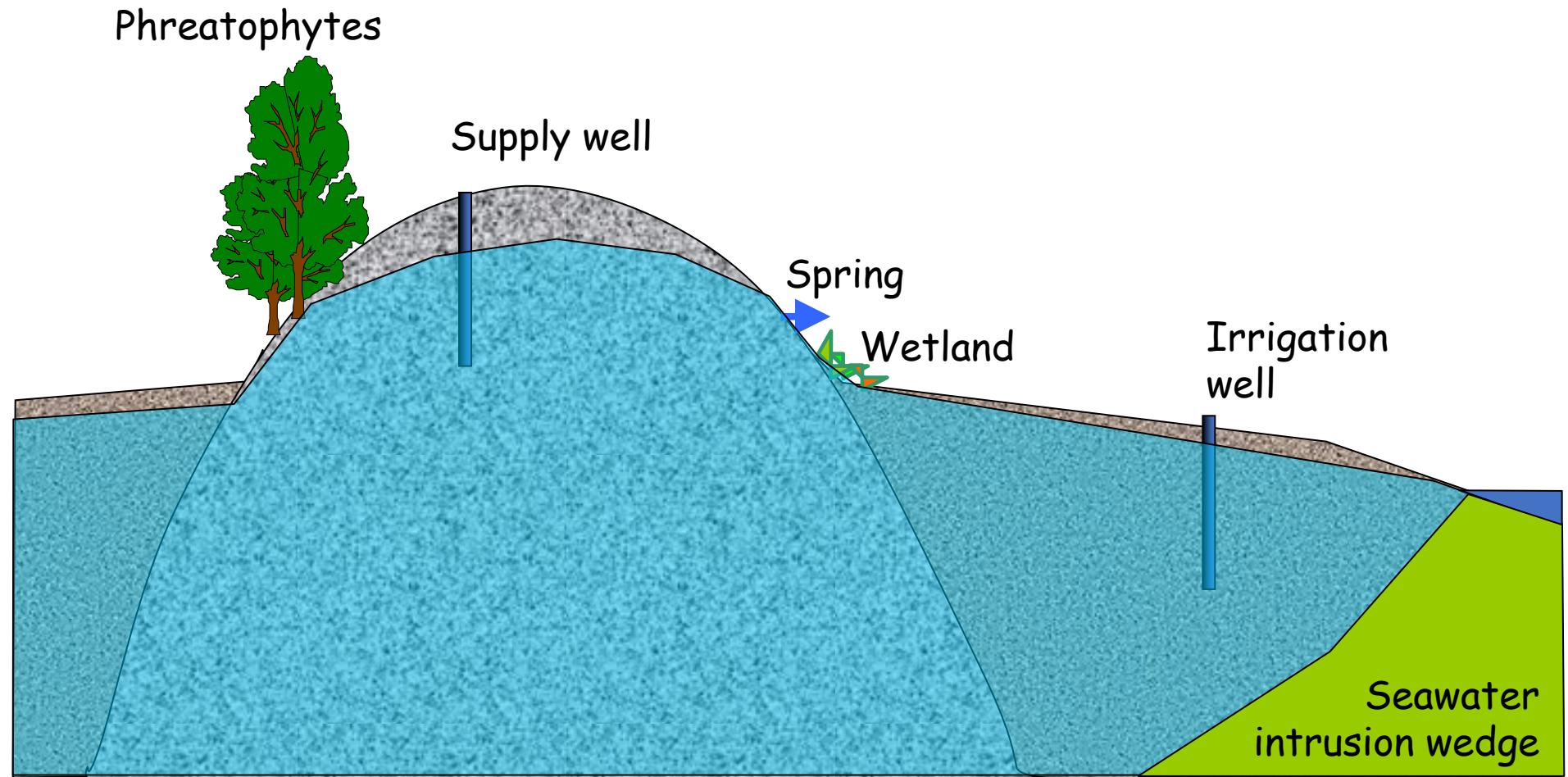


Landscape for a geologist



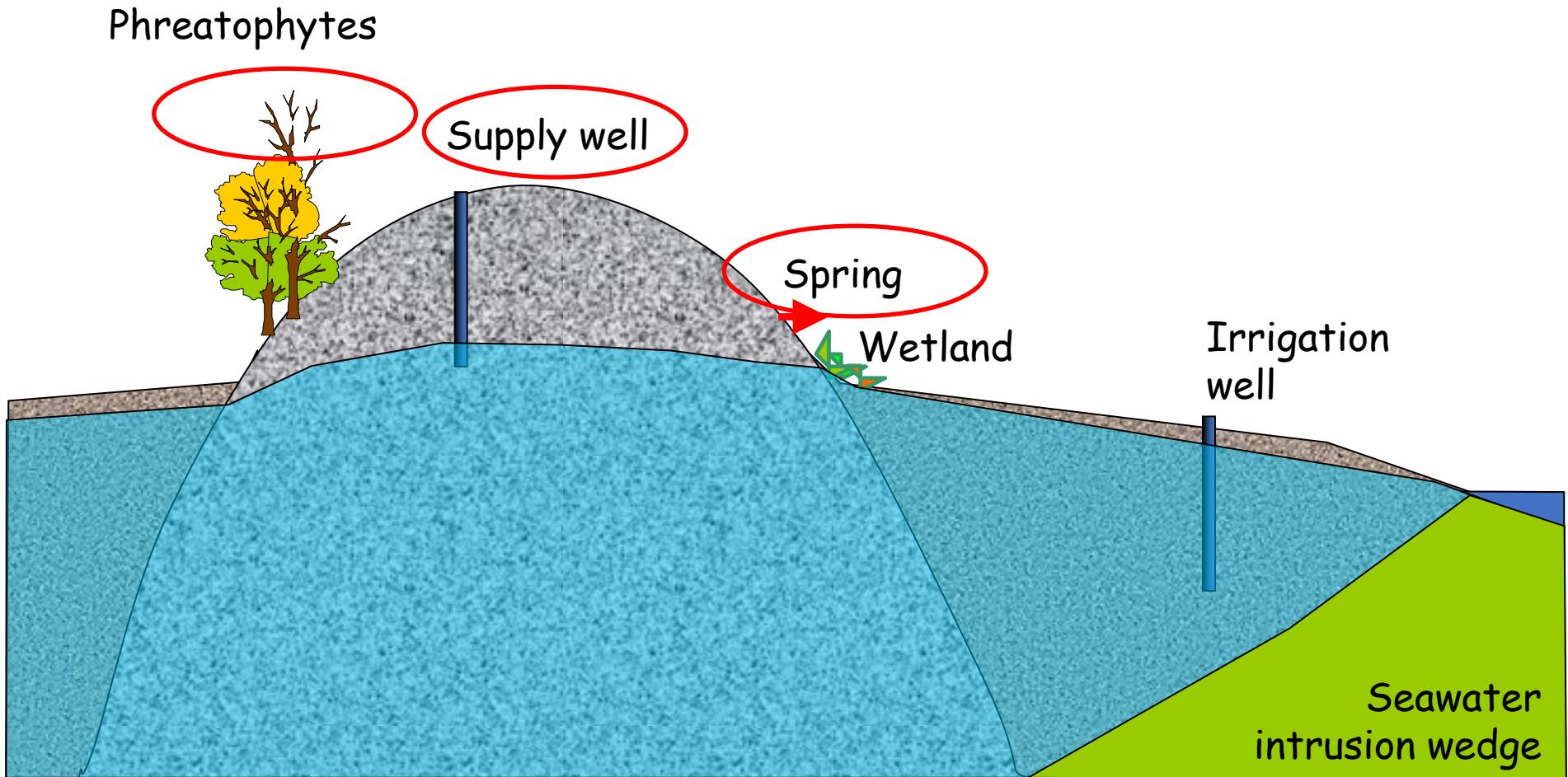


Landscape and the subsurface (as seen by hydrogeologists)



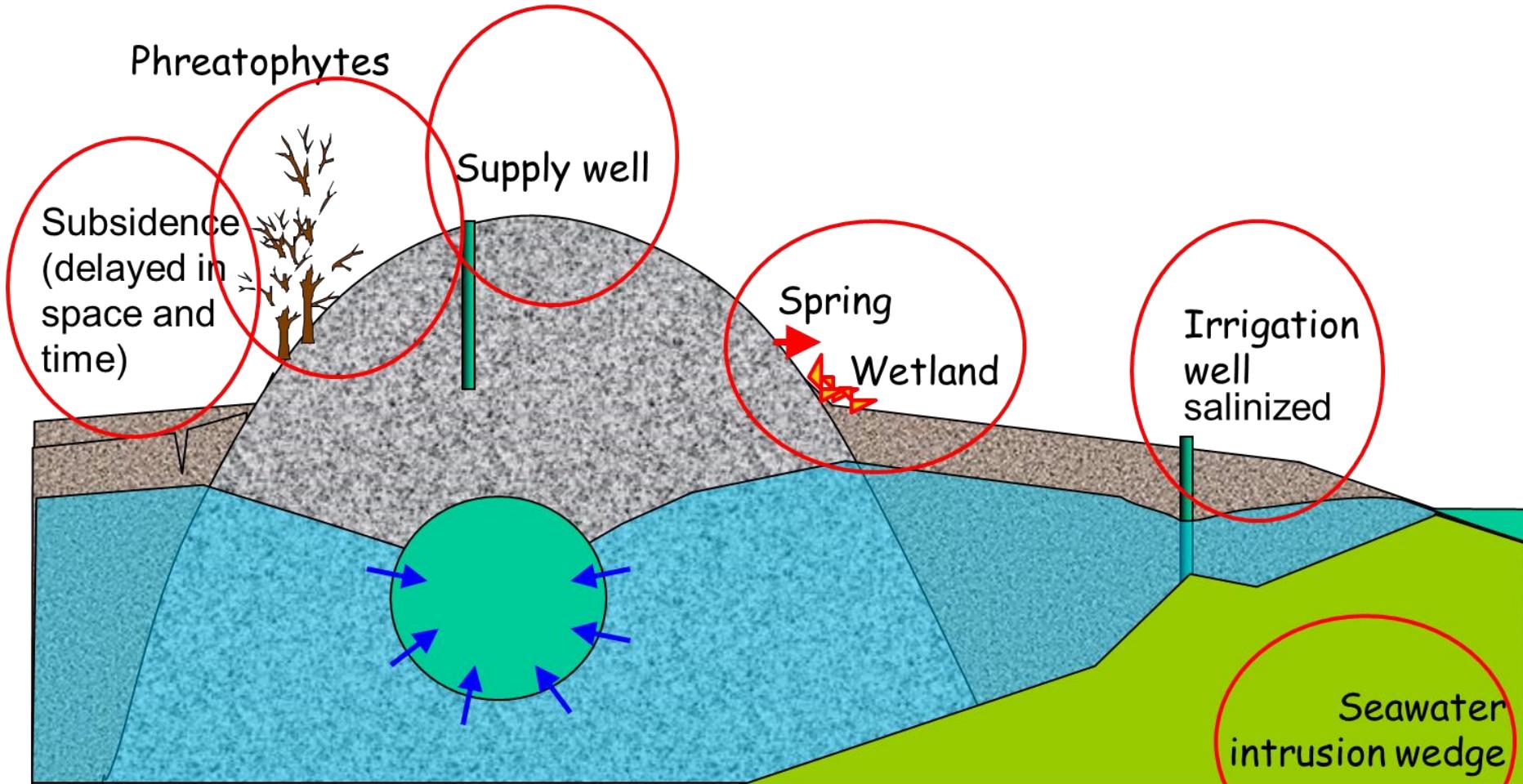


Landscape and the subsurface after long term heavy pumping





Landscape and the subsurface after long term very heavy extractions



La extracción de grandes volúmenes de agua subterránea reduce la **presión de poros** lo que provoca la compactación de sedimentos y la subsidencia del terreno, siendo irreversible en acuíferos no consolidados debido a la pérdida de espacio poroso. En acuíferos confinados, esta presión también se conoce como **presión piezométrica**, que impulsa el flujo del agua subterránea.



Typical subsidence pictures



Edge of Tucson (Arizona) basin.

San Joaquin Valley (California)
9 m settlement between 1925 y 1977

El Valle de San Joaquín tiene todos los ingredientes necesarios para el hundimiento: grandes cantidades de arcilla, agua subterránea a presión que sostiene la arcilla y grandes volúmenes de bombeo de agua subterránea que reduce drásticamente la capacidad de la arcilla para sostener el suelo sobre ella.

Un investigador se encuentra junto a un poste en el Valle de San Joaquín, al suroeste de Mendota, California. Los carteles muestran la altitud aproximada de la superficie terrestre en 1925, 1955 y 1977. La superficie terrestre disminuyó unos nueve metros entre 1925 y 1977 debido a la compactación del sistema acuífero. Dominio público/USGS

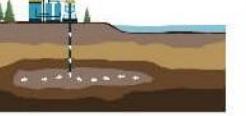
Oil / Natural Gas Extraction



Existing Condition



Disturbance



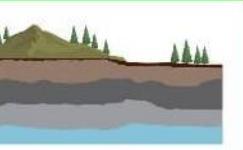
Effect of Disturbance



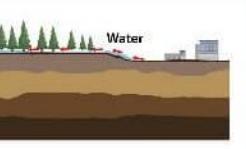
Mining

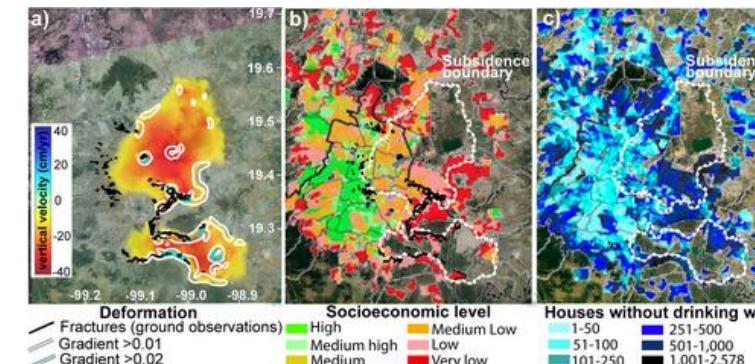
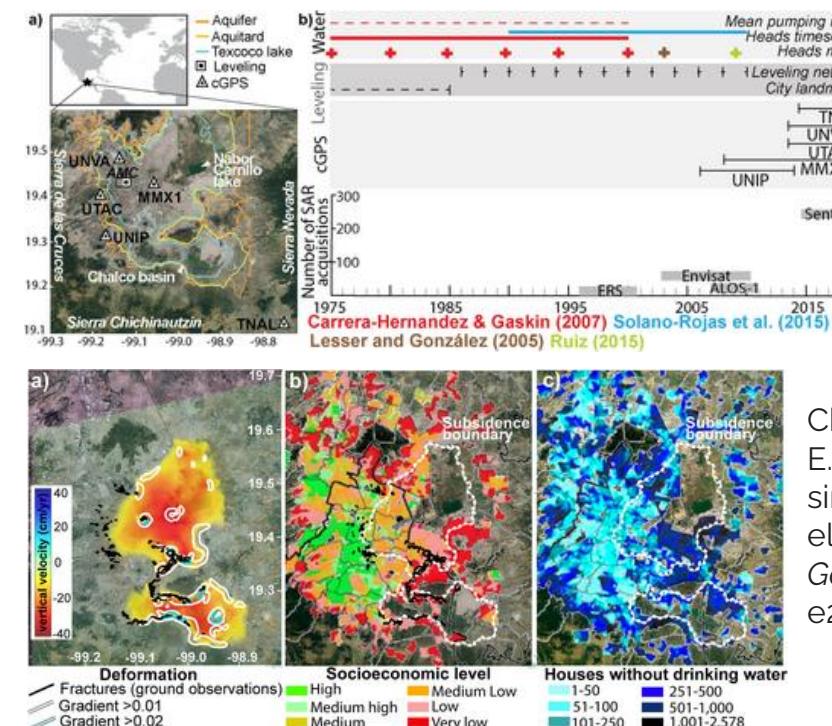
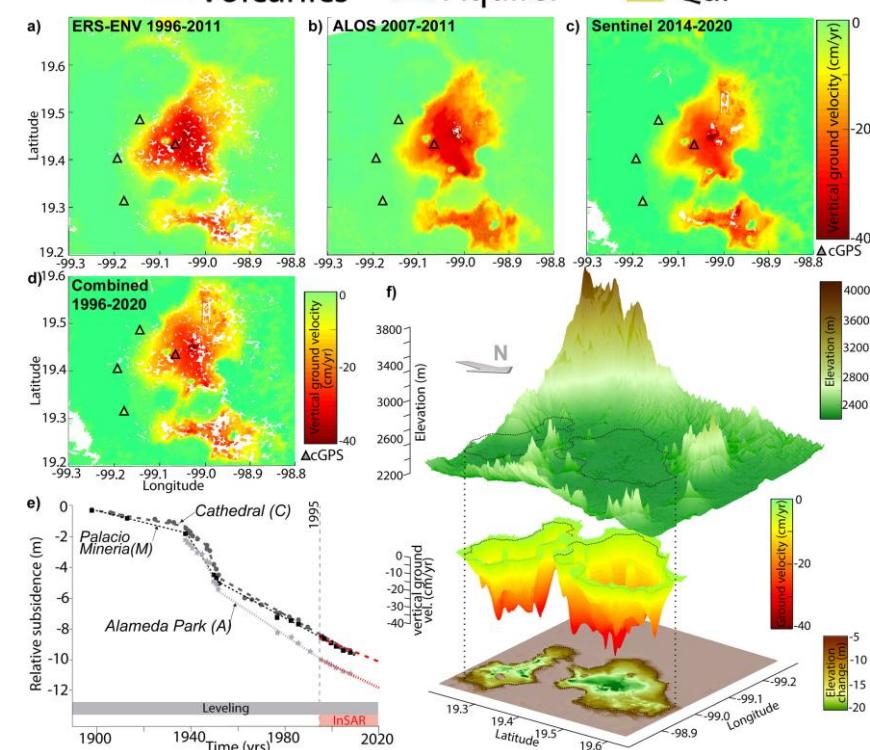
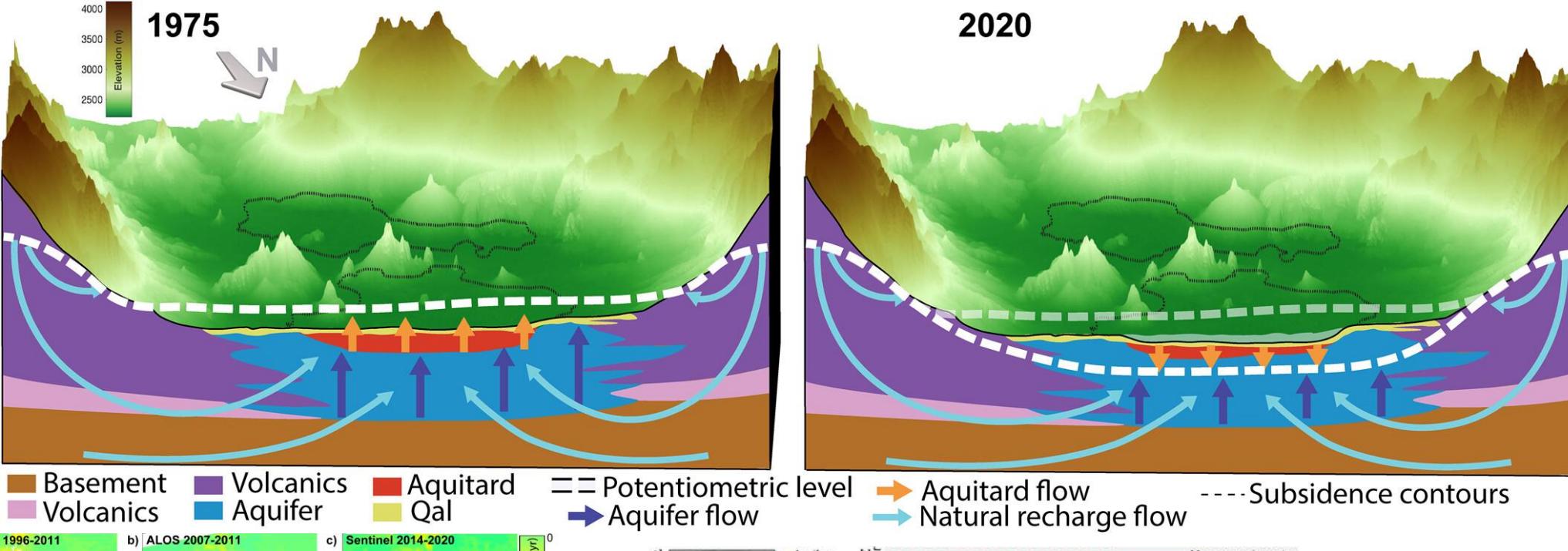


Dissolution of Limestone



Groundwater-Related



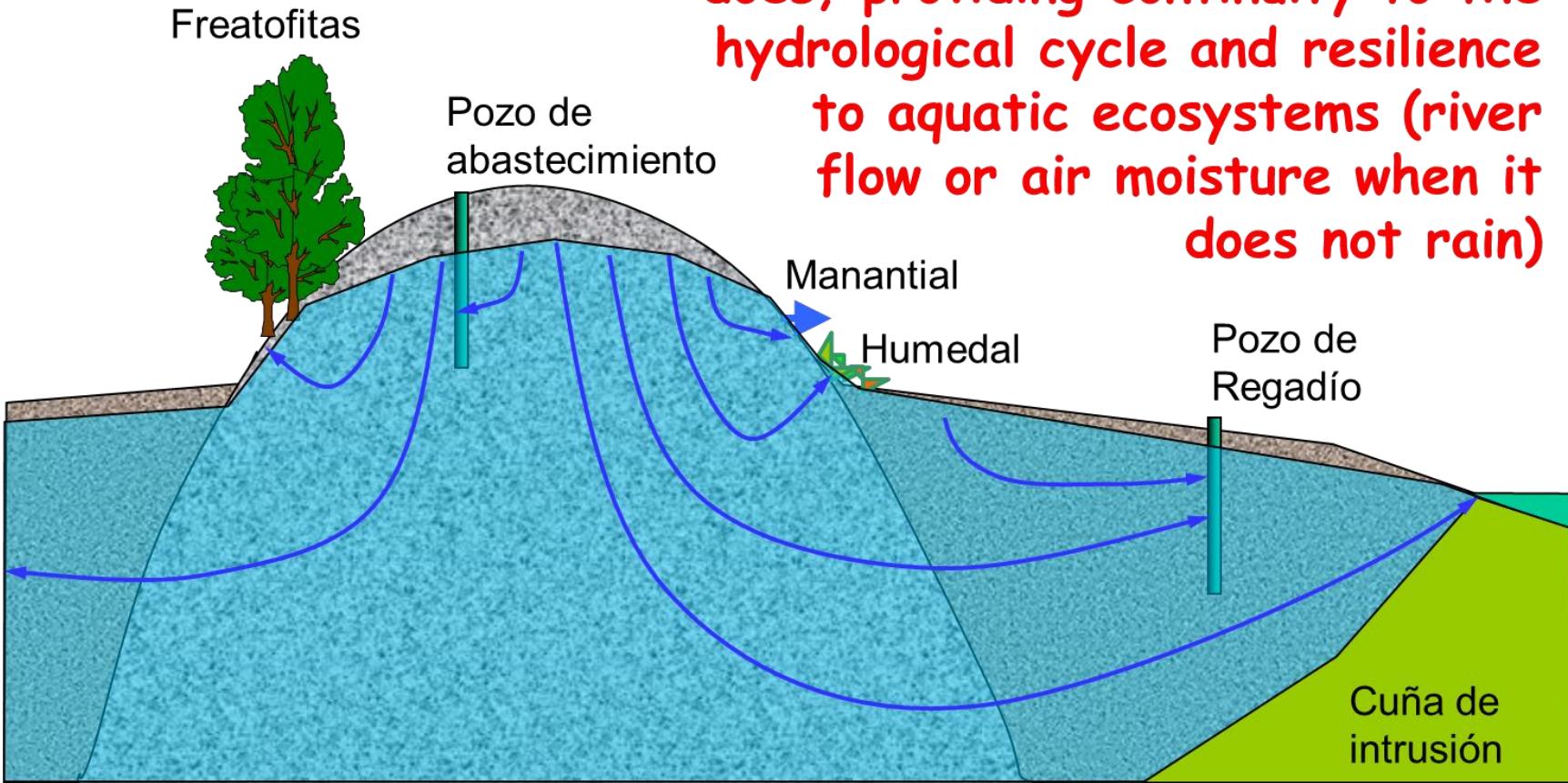


Chaussard, E., Havazli, E., Fattah, H., Cabral-Cano, E., & Solano-Rojas, D. (2021). Over a century of sinking in Mexico City: No hope for significant elevation and storage capacity recovery. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(4), e2020JB020648.



For a hydrologist, the landscape depends on water, which flows!

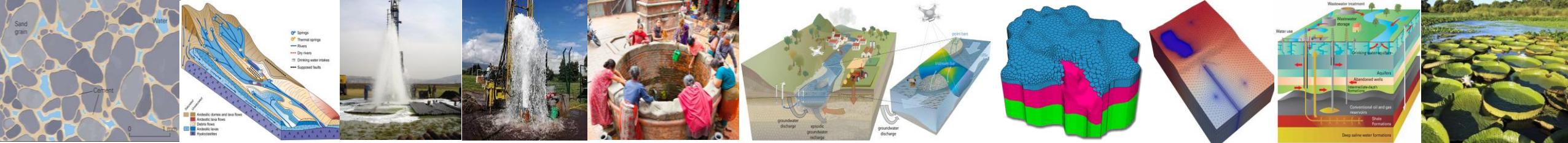
Groundwater flows slowly, but it does, providing continuity to the hydrological cycle and resilience to aquatic ecosystems (river flow or air moisture when it does not rain)





Whenever you
see luxurious
vegetation think
of “spoiled”
plants and GW





¿Qué es el balance hídrico?

El concepto de balance hídrico se deriva del concepto de balance de materia, es decir, que es el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen del mismo, en un intervalo de tiempo determinado.

$$I(t) - Q(t) = 0$$

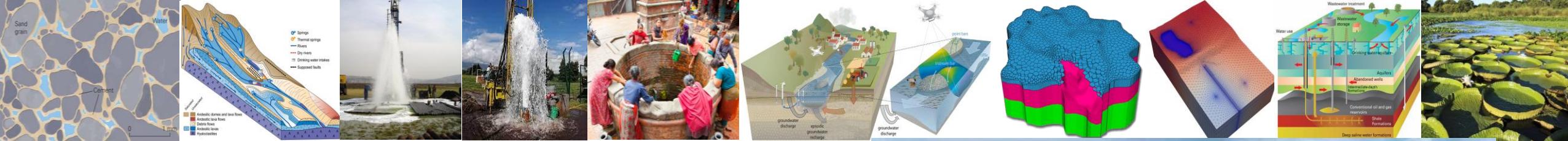
$$I(t) - Q(t) = \frac{dS}{dt}$$

Donde:

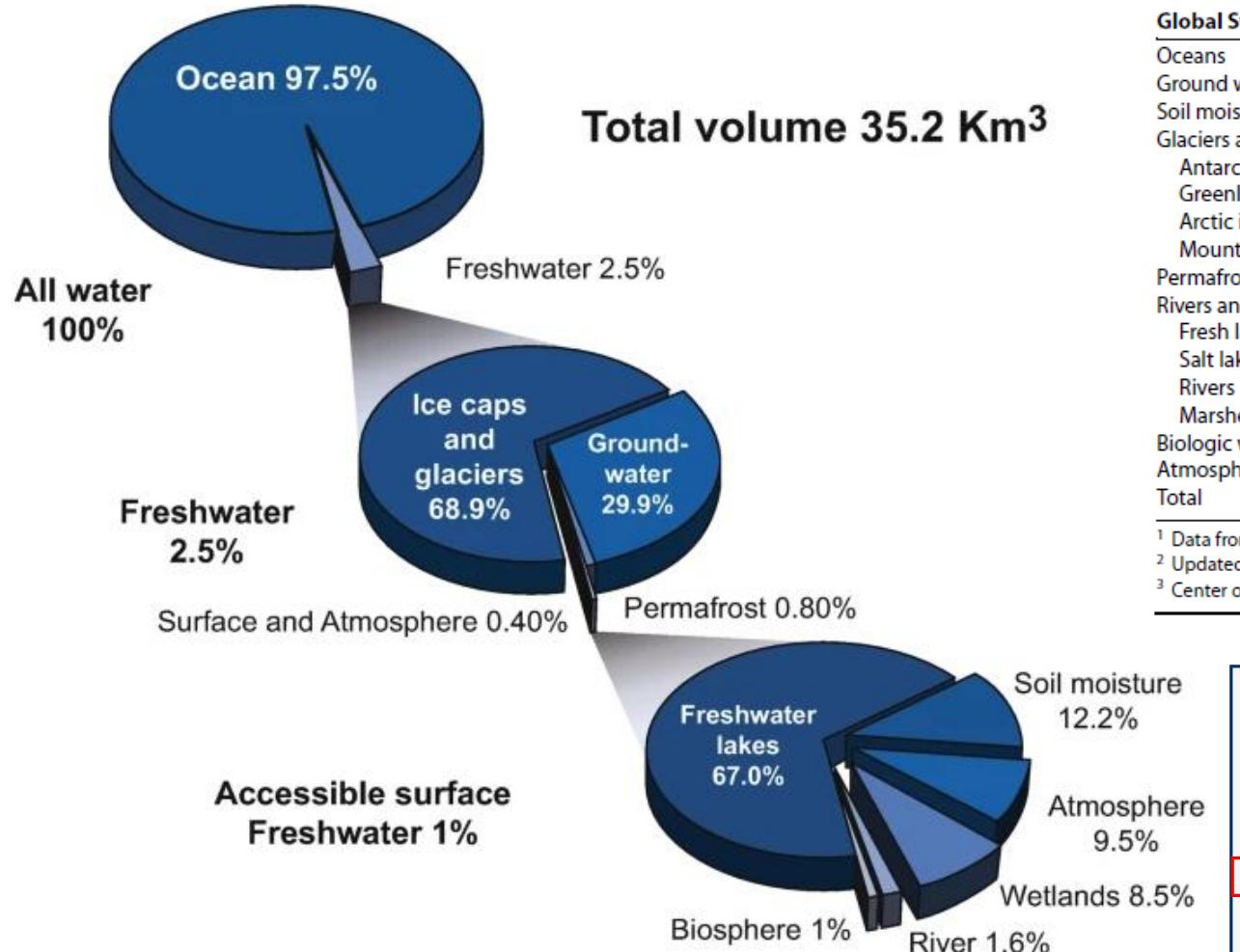
$I(t)$: Entradas al sistema (PCP, SNOW)

$Q(t)$: Salidas del Sistema (ET, SURQ, LATQ, BSFLOW)

$\frac{dS}{dt}$: Variación del almacenamiento (HMD, GWH)



Distribución del agua en la naturaleza



Distribution of the world's water. (Modified after Salih [1997](#); Dai [2012](#))

Table 2.5 M

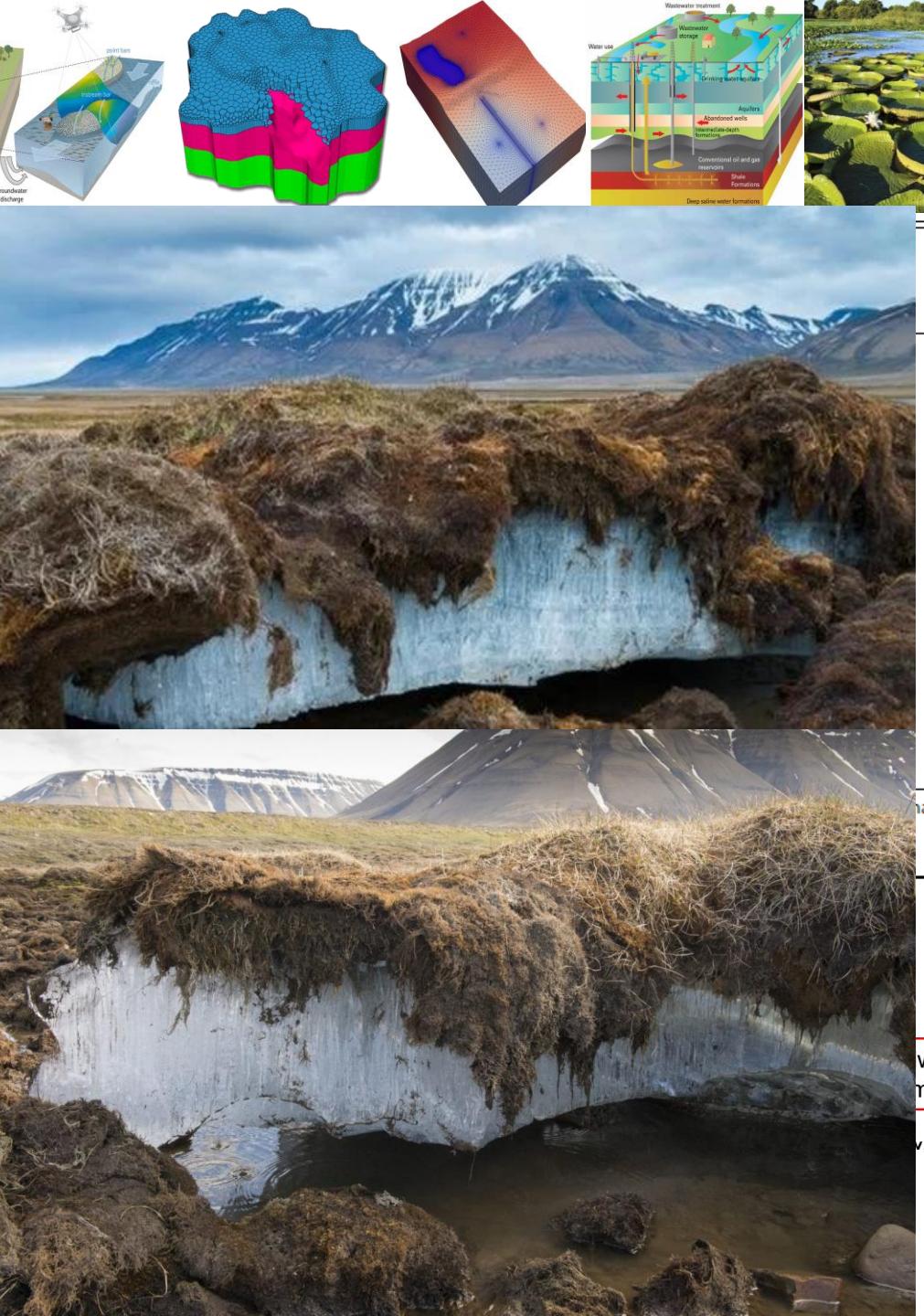
Global Stock

Oceans
Ground water
Soil moisture
Glaciers and permafrost
Antarctica
Greenland
Arctic islands
Mountains
Permafrost
Rivers and lakes
Fresh lakes
Salt lakes
Rivers
Marshes
Biologic water
Atmosphere
Total

¹ Data from Shikloman et al., 2005.

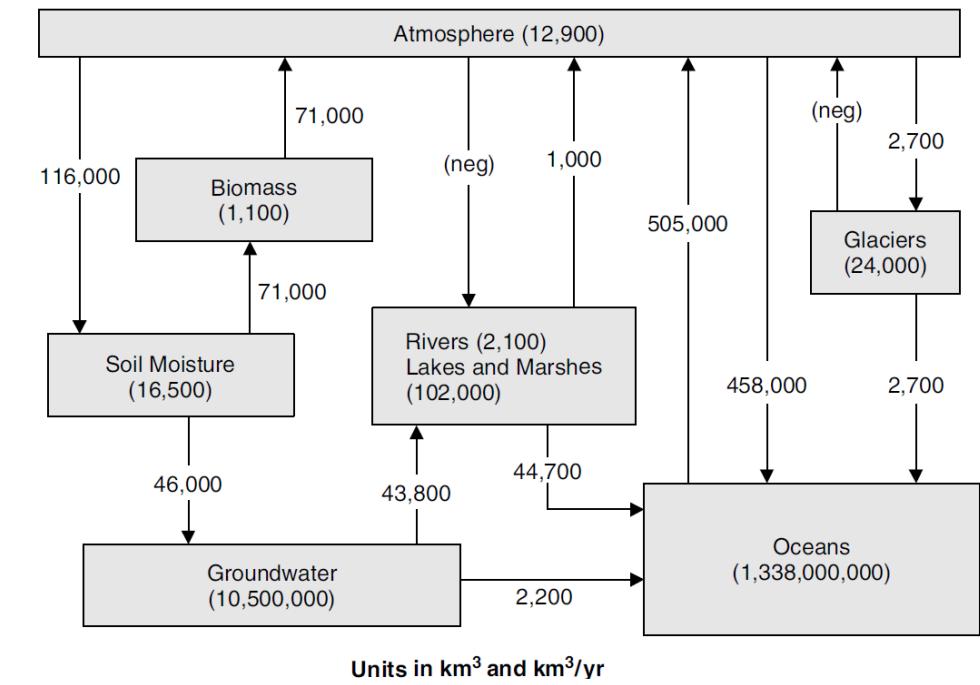
² Updated values.

³ Center of range.

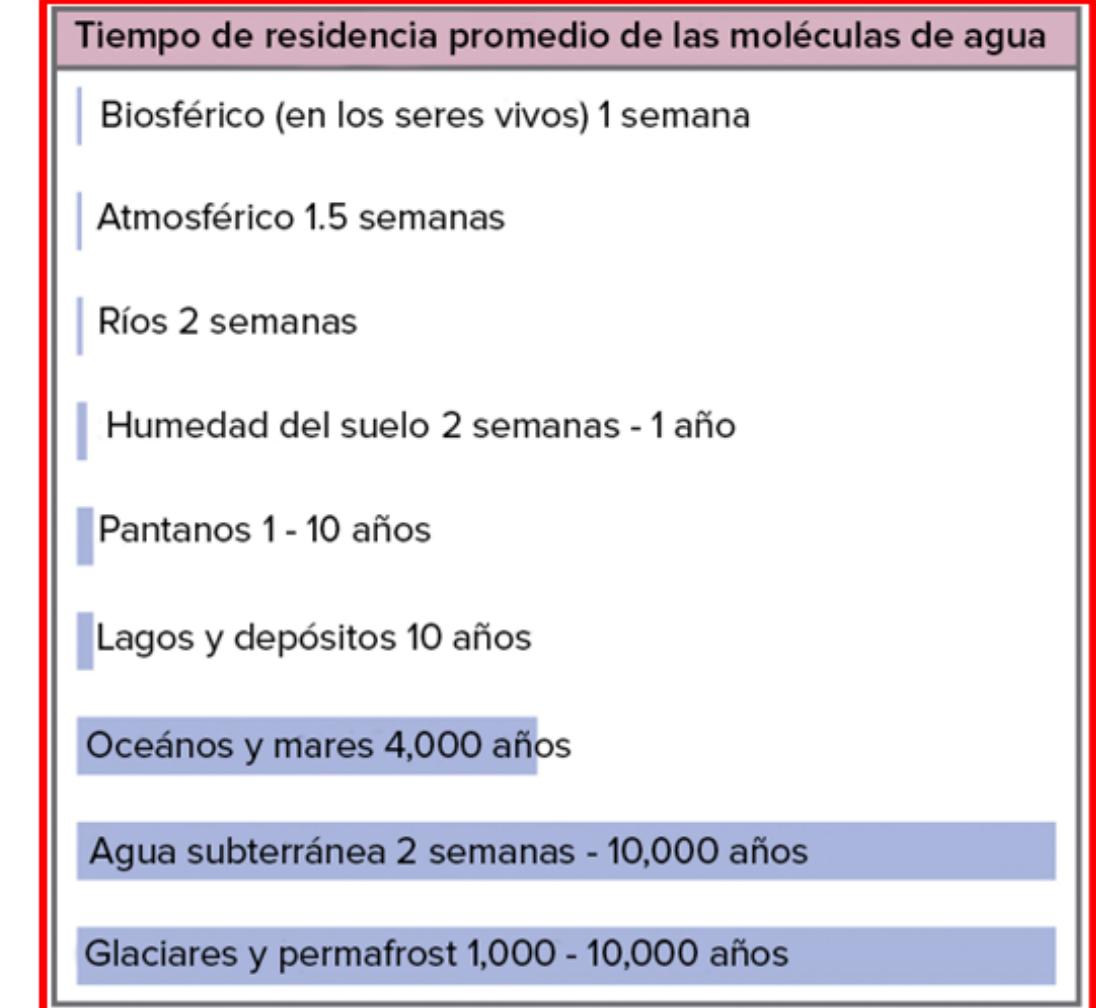


water:
m³x10⁶

(v, 1997)



Pinder, G. F., & Celia, M. A. (2006). Subsurface hydrology. John Wiley & Sons.





Volumes of water stored in the various components of the water cycle

Gleeson et al., 2015

Surface waters: 0.10 M km^3
 Modern gw (<50yr): 0.35 M km^3
 Older gw: 22.20 M km^3
 1/60 is modern gw

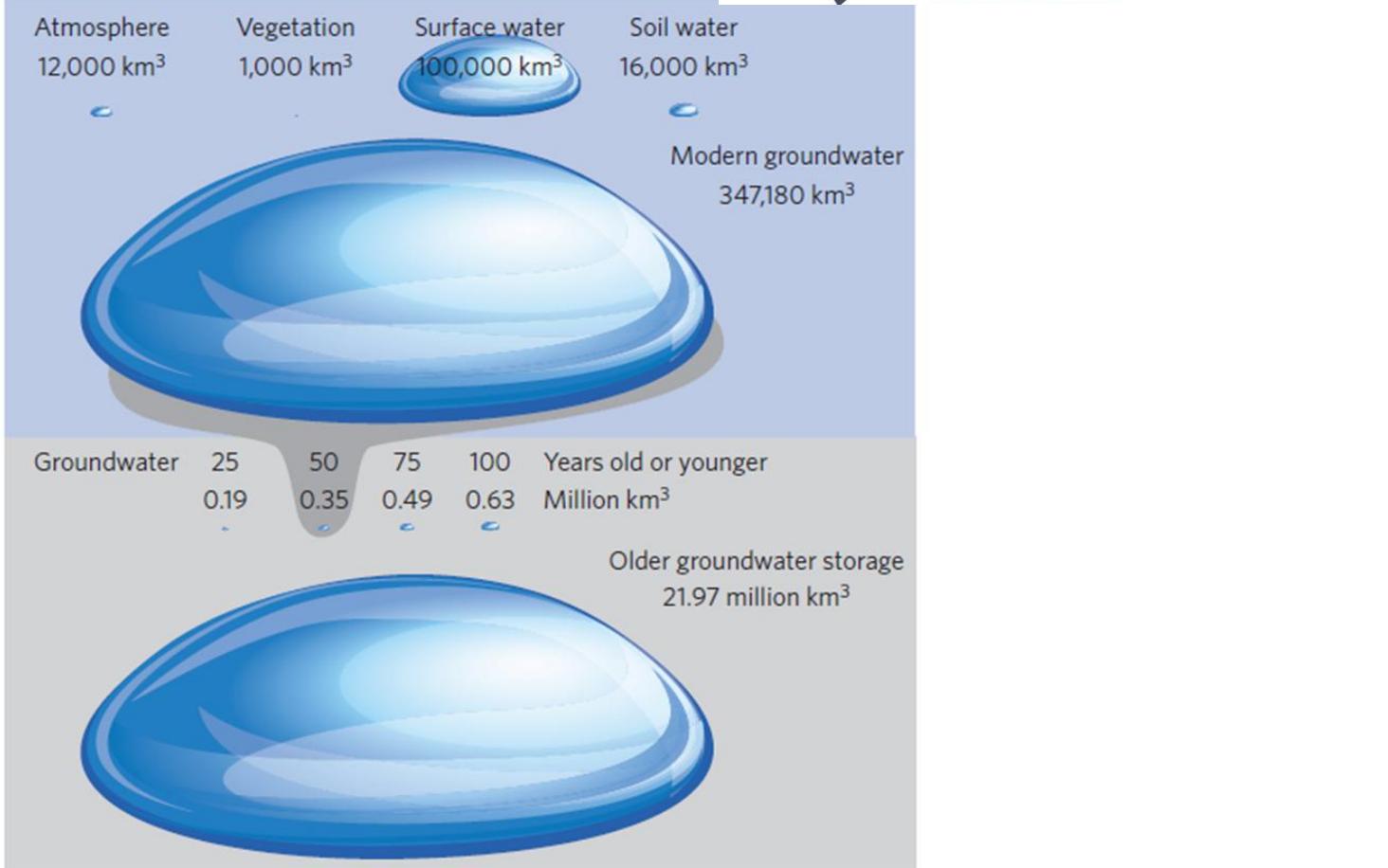
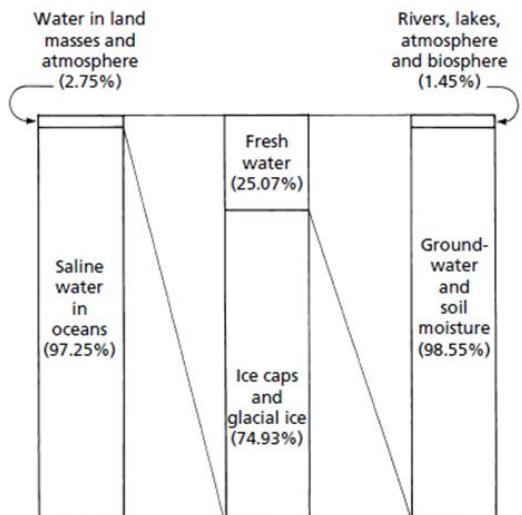
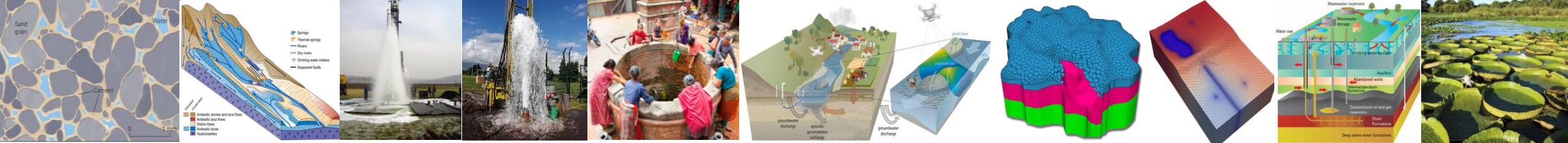
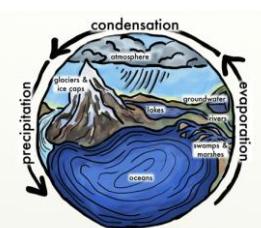
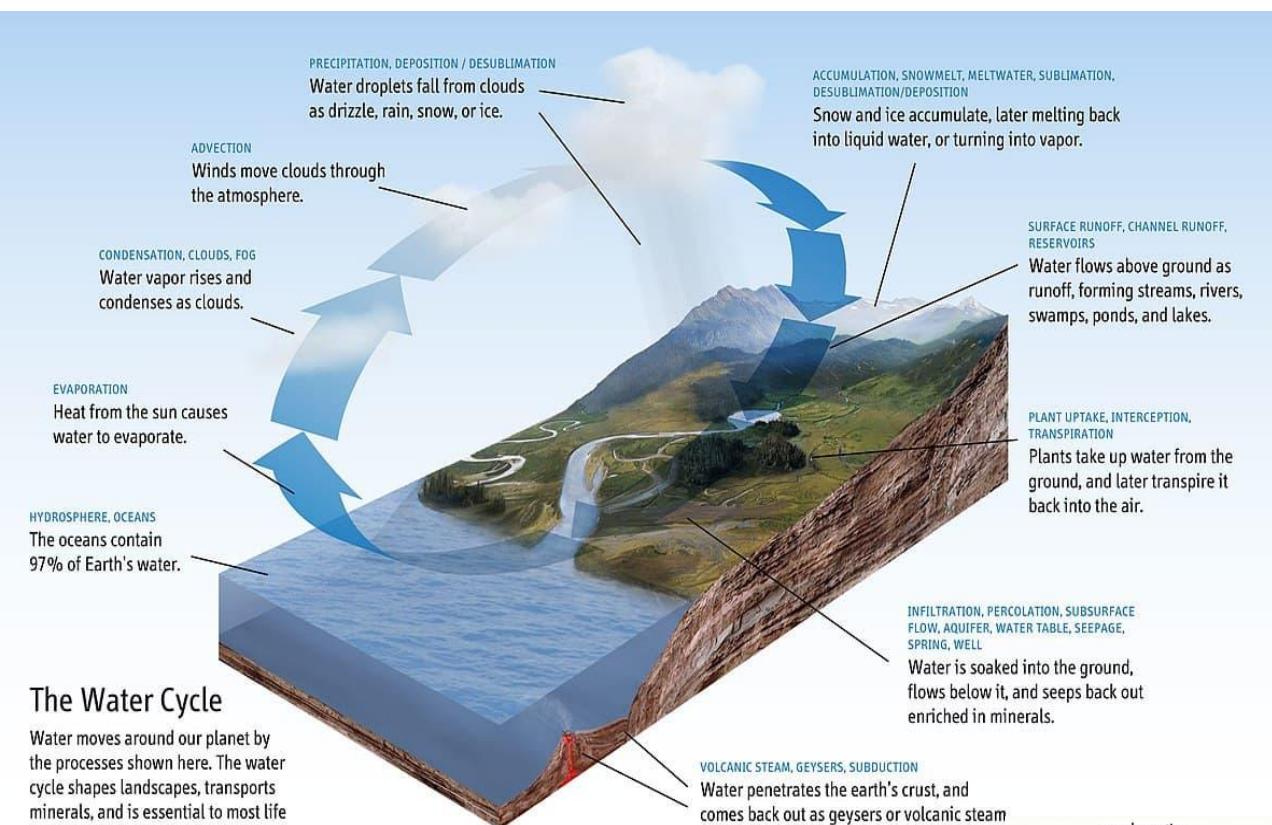
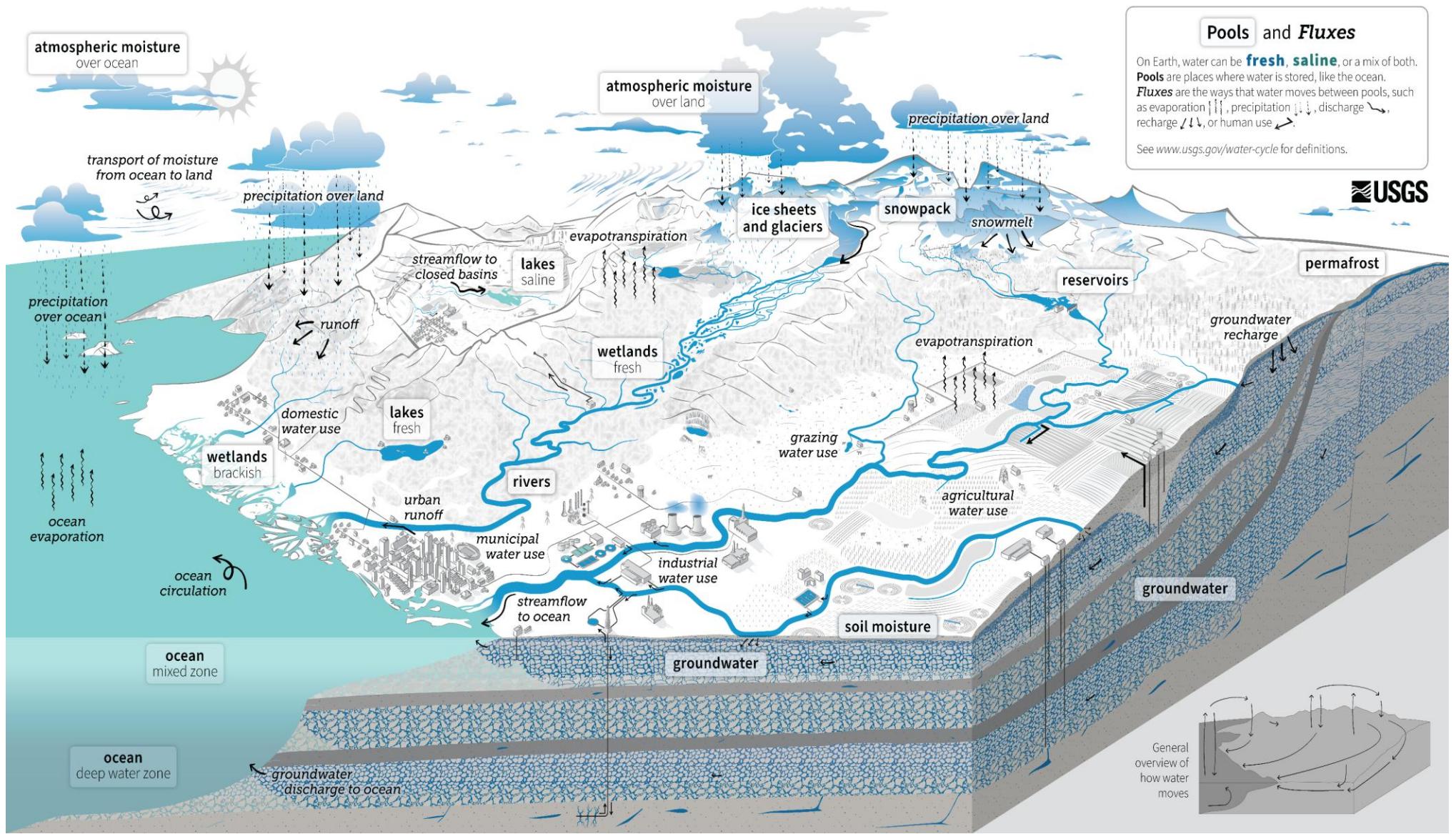


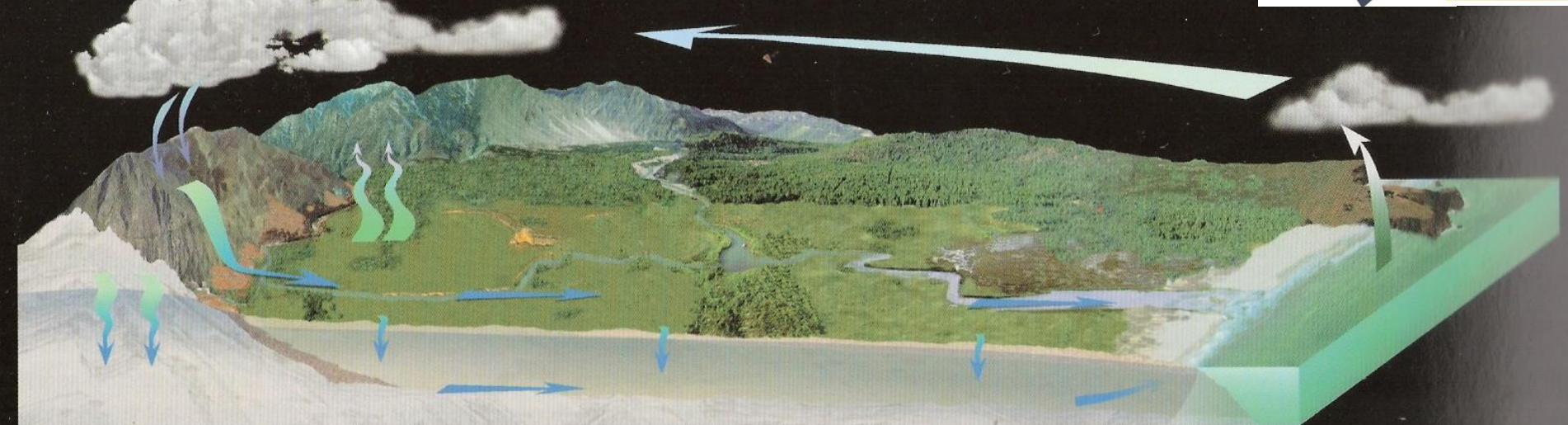
Figure 5 | The different volumes of water stored in the global water cycle.
 Global volumes of young (<100 years old), modern (<50 years old) and total groundwater to 2 km depth compared with other fresh water volumes stored in the atmosphere³³, in surface waters (that is, wetlands, rivers and lakes)³³, within plants or in soils³³.

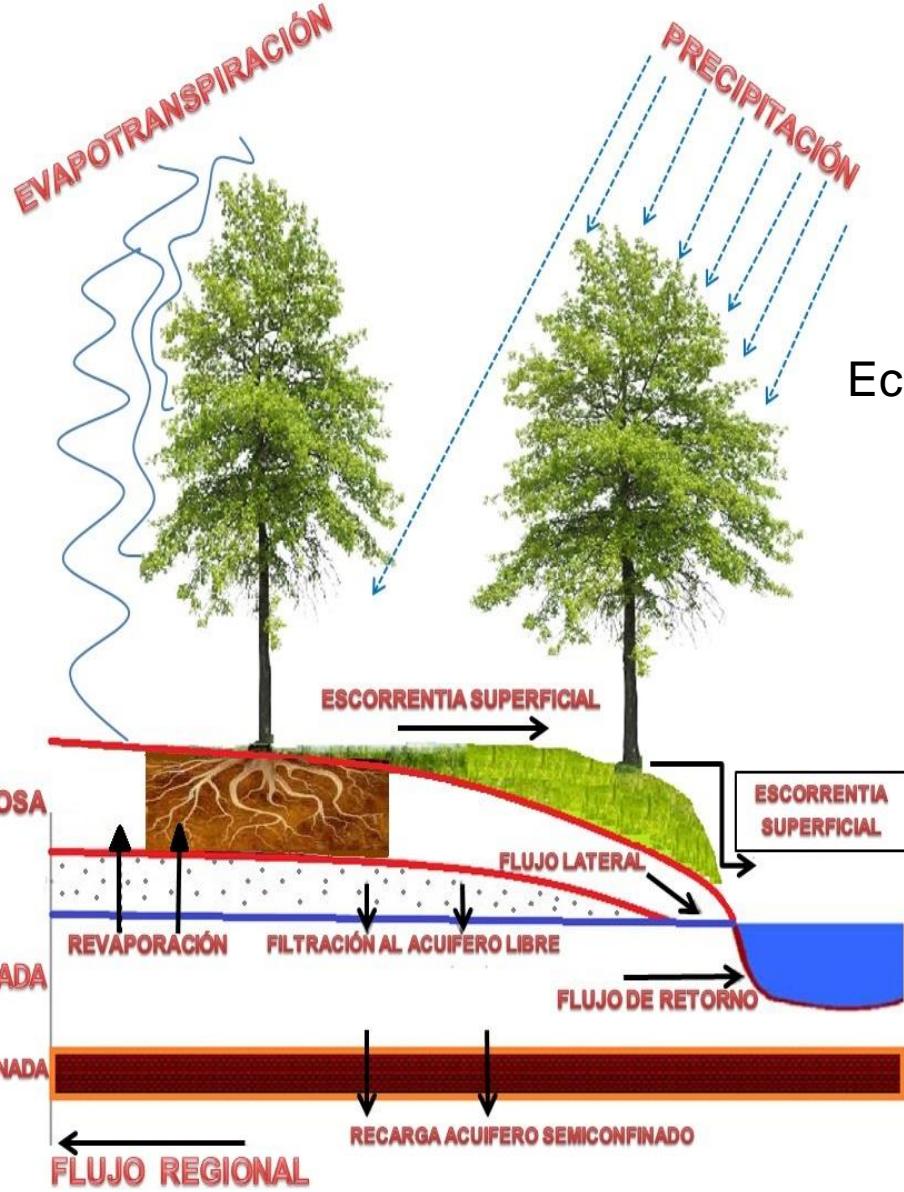


Movimiento del agua en la naturaleza









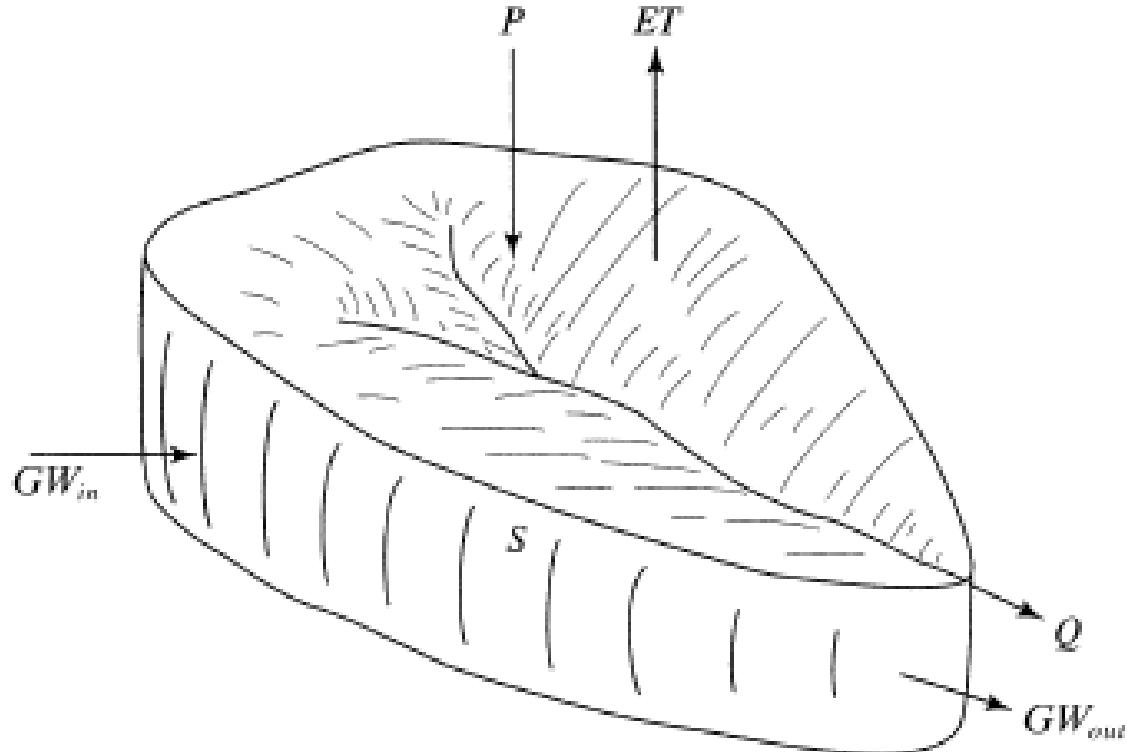
Ecuación del balance hídrico

$$SWt = SWo + \sum (Rday - Qsurf - Ea - Wseep - Qgw)$$

- SWt = Contenido final de agua del suelo (soil water content) (mm)
- SWo = Contenido Inicial de agua del suelo en el día i (mm)
- t = tiempo (días)
- $Rday$ = Lluvia caída en el día i (mm)
- $Qsurf$ = Escurrimiento ocurrido en el día i (mm)
- Ea = Evapotranspiración en el día i (mm)
- $Wseep$ = Cantidad de agua de percola del perfil de suelo a la napa freática en el día i (mm)
- Qgw = Flujo subterráneo en el día i (mm).



$$P + GW_{in} - (Q + ET + GW_{out}) = \Delta S,$$



$$P + I = ET + DR + RO - \boxed{\Delta W}$$

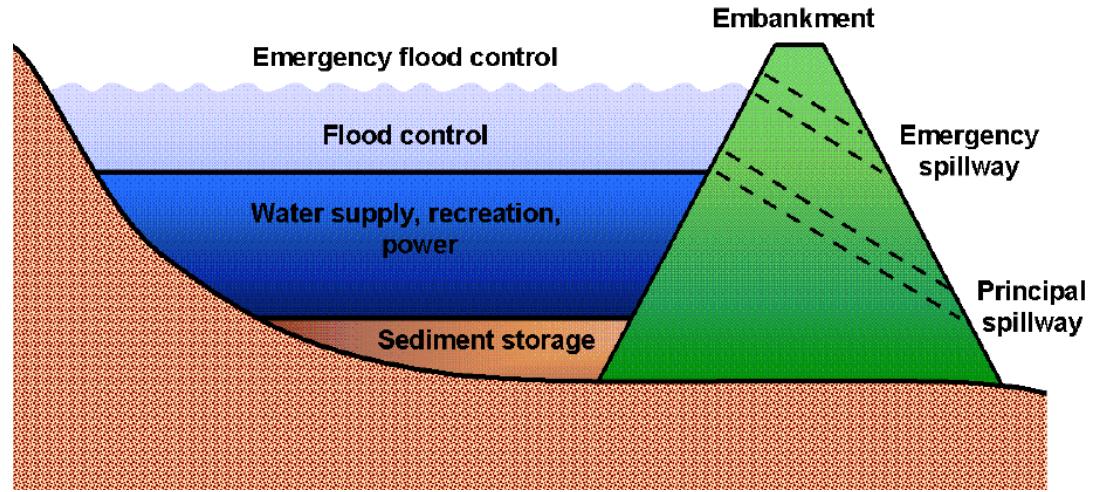
- P Precipitation
- I Irrigation
- ET Evapotranspiration (Soil and Plant)
- DR Drainage
- RO Surface Runoff
- ΔW Change in Water Storage within the Soil Profile
(Soil Water Depletion)

Figure 1.12 Schematic three-dimensional diagram of a watershed, showing the components of the regional water balance: P = precipitation, ET = evapotranspiration, Q = stream outflow, GW_{in} = ground-water inflow, GW_{out} = ground-water outflow.



RESERVORIOS

Donde:



$$V = V_{stored} + V_{flowin} - V_{flowout} + V_{pcp} - V_{evap} - V_{seep}$$



RES_ESA: Área del reservorio, se refiere al área cuando el depósito se llena hasta el aliviadero de emergencia (ha).

Para que SWAT calcule el volumen del reservorio cada día, debe definirse el área superficial en dos volúmenes de agua diferentes. Las variables que se refieren al vertedero principal se pueden considerar como variables que se refieren al volumen normal de almacenamiento del reservorio, mientras que las variables que se refieren al aliviadero de emergencia se pueden considerar como variables que se refieren al volumen máximo de almacenamiento del reservorio.

RES_PSA: Área superficial del reservorio cuando el reservorio se llena hasta el vertedero principal (ha).

RES_EVOL: Volumen de agua necesario para llenar el reservorio hasta el aliviadero de emergencia (10^4 m^3).

RES_PVOL: Volumen de agua necesario para llenar el reservorio hasta el vertedero principal (10^4 m^3).

RES_VOL: Volumen inicial del reservorio. Si el reservorio está en existencia al comienzo del período de simulación, el volumen del reservorio inicial es el volumen en el primer día de la simulación. Si el reservorio comienza a funcionar en medio de una simulación SWAT, el volumen inicial del depósito es el volumen del depósito el día en que el reservorio entra en funcionamiento (10^4 m^3).

RES_K: Conductividad hidráulica del fondo del reservorio

IRESCO: Código de simulación: 0. Reservorio no controlado con tasa de liberación promedio anual, 1. Reservorio controlado salida mensual medida, 2. Reservorio controlado por la simulación, 3. Reservorio controlado salida diaria medida.

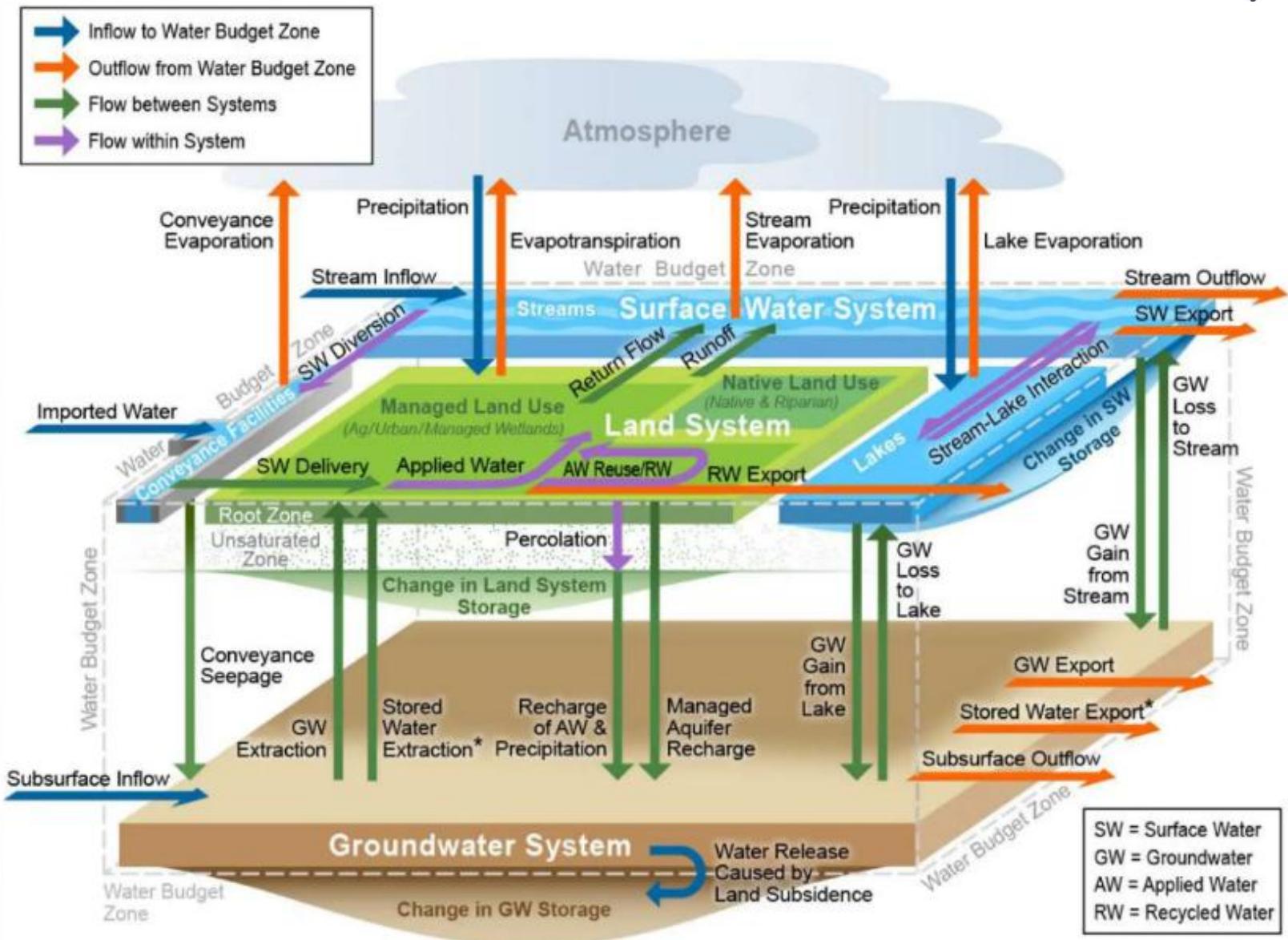
MORES: Mes en que el reservorio entró en funcionamiento (0-12).

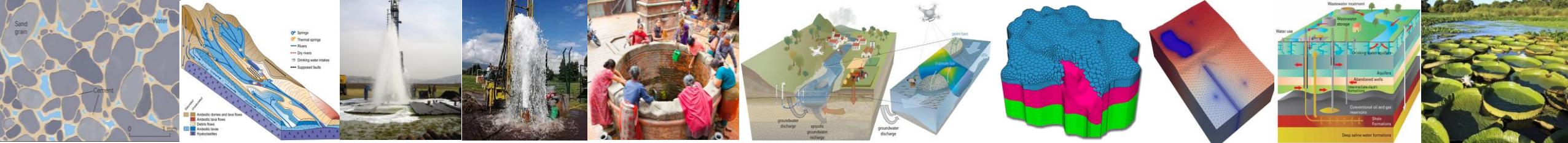
IYRES: Año en que el reservorio entró en funcionamiento (por ejemplo, 1980).

IFLOOD1R: Mes comienzo de temporada sin inundaciones.

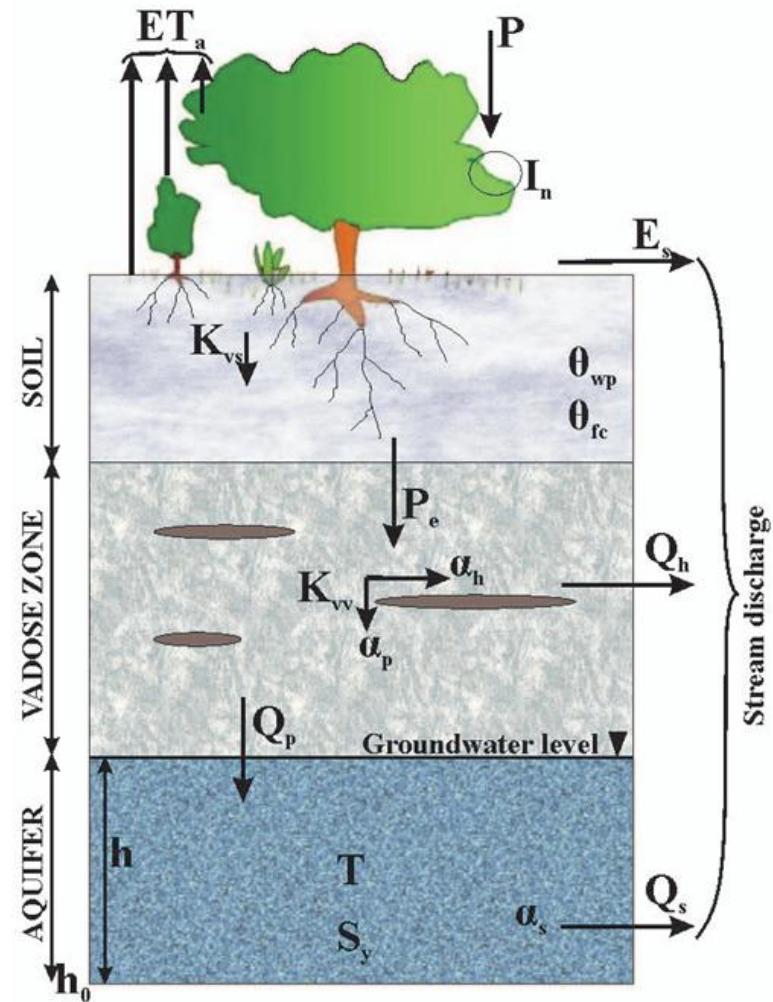
IFLOOD2R: Mes final de temporada sin inundaciones.

NDTARGR: Número de días requerido para llenar el almacenamiento del reservorio desde el cauce.

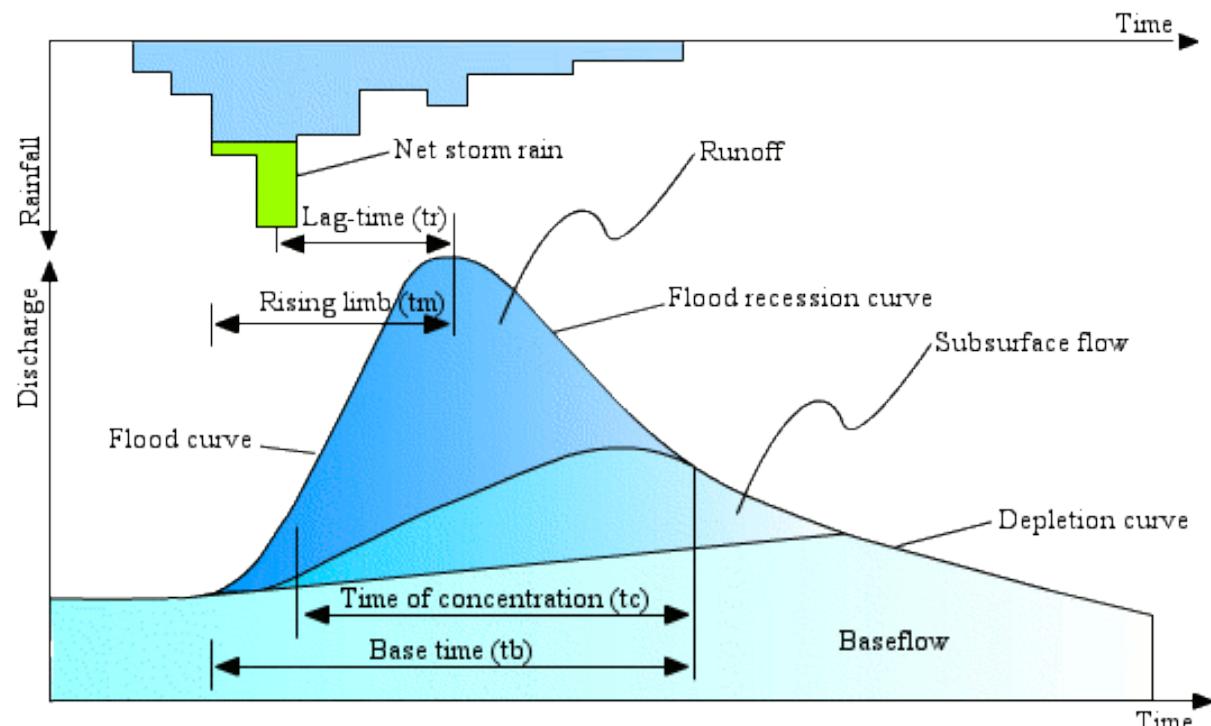




Procesos fundamentales del Balance Hídrico



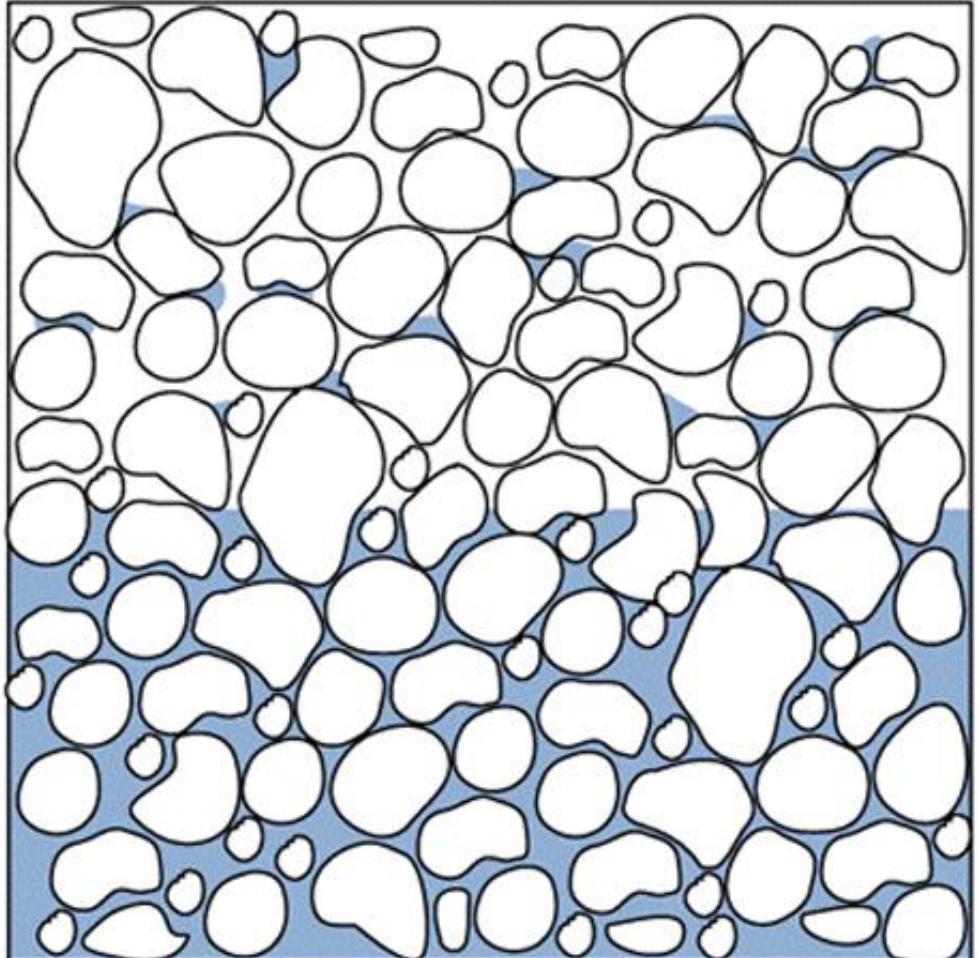
ET_a: Actual evapotranspiration
P: Precipitation
I_n: Canopy interception
E_s: Surface runoff
K_{vs}: Soil vertical hydraulic conductivity
θ_{wp}: Soil water content at wilting point
θ_{fc}: Soil water content at field capacity
P_e: Diffuse potential recharge to the vadose zone
K_v: Vertical hydraulic conductivity in the vadose zone
α_h: Inteflow recession coefficient
α_p: Percolation recession coefficient
Q_h: Interflow
Q_p: Percolation to the aquifer
h: Groundwater level
h₀: Base value of groundwater level
T: Transmissivity
S_y: Aquifer storage coefficient
α_s: Groundwater discharge recession coefficient
Q_s: Groundwater discharge



- 1. Infiltración o Percolación**
- 2. Escurrimiento superficial y subsuperficial**
- 3. Evapotranspiración**
- 4. Recarga del acuífero**
- 5. Flujo de aguas subterráneas**
- 6. Descarga de aguas subterráneas**
- 7. Interacciones con cuerpos de agua superficiales**



SURFACE



UNSATURATED
(VADOSE)
ZONE

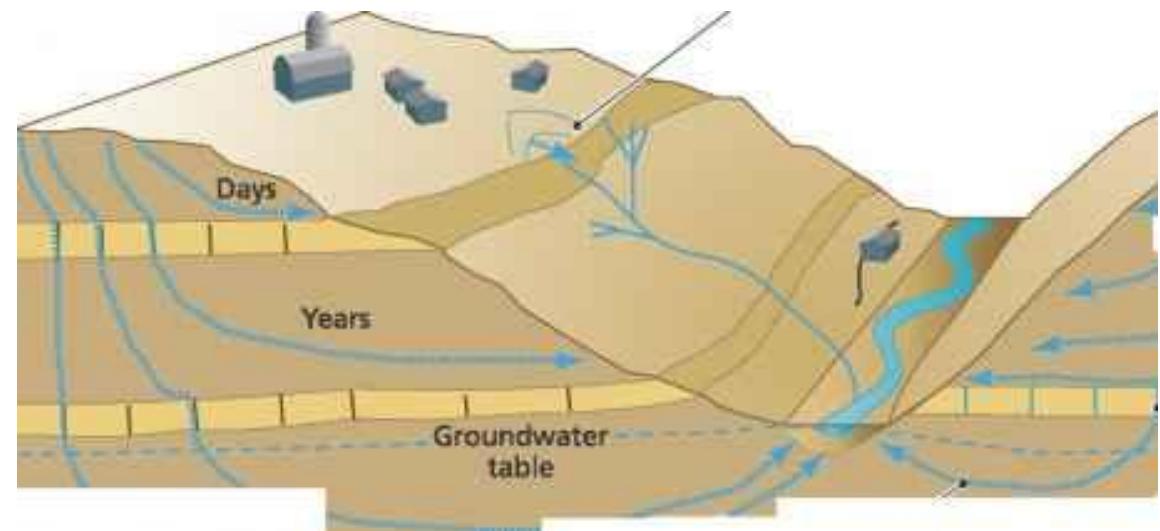
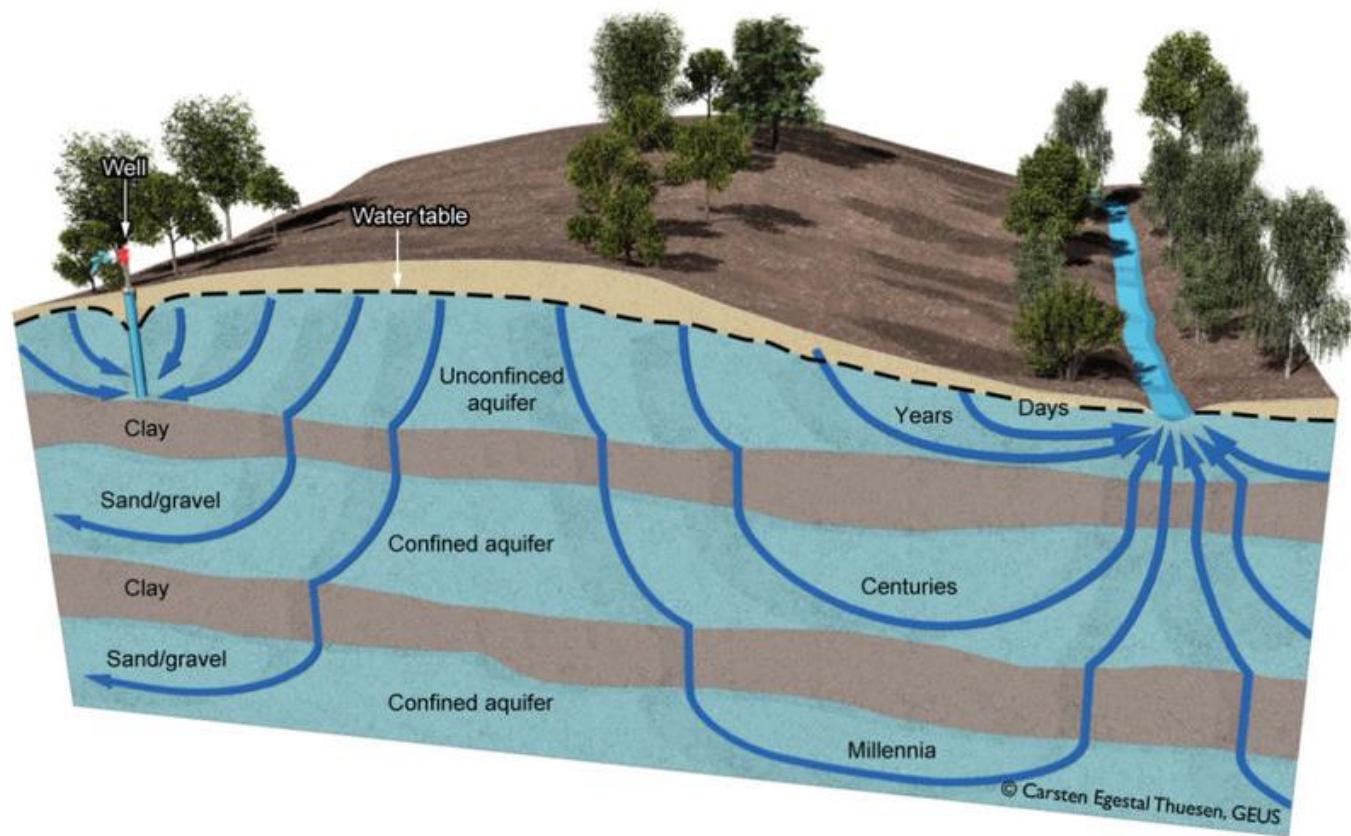
SATURATED
THICKNESS

BEDROCK

Medio poroso y distribución de fases

Sistema trifásico

Sistema bifásico





Global Freshwater Resources Quantity and Distribution by Region

Glaciers and permanent ice caps (km^3)



Wetlands, large lakes, reservoirs and rivers (km^3)



Groundwater (km^3)

North America

4 300 000

Europe

1 600 000

Asia

7 800 000

South America

3 000 000

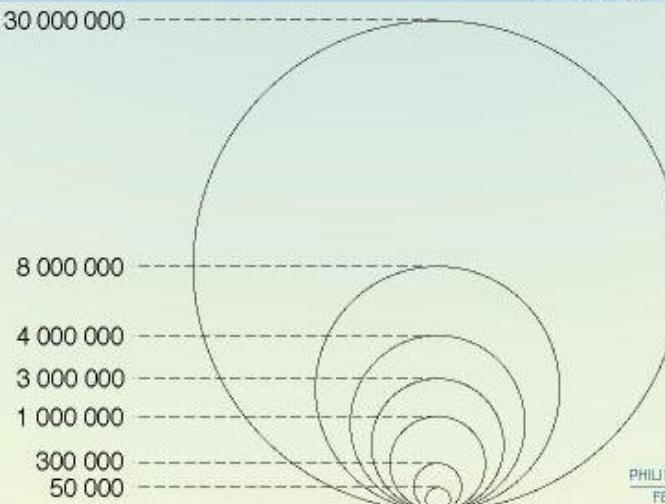
Africa

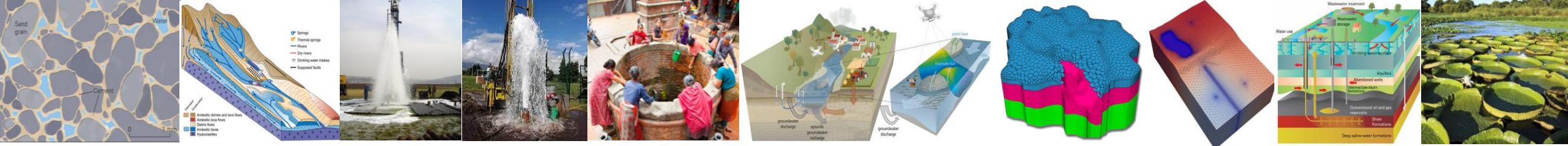
5 500 000

Australia

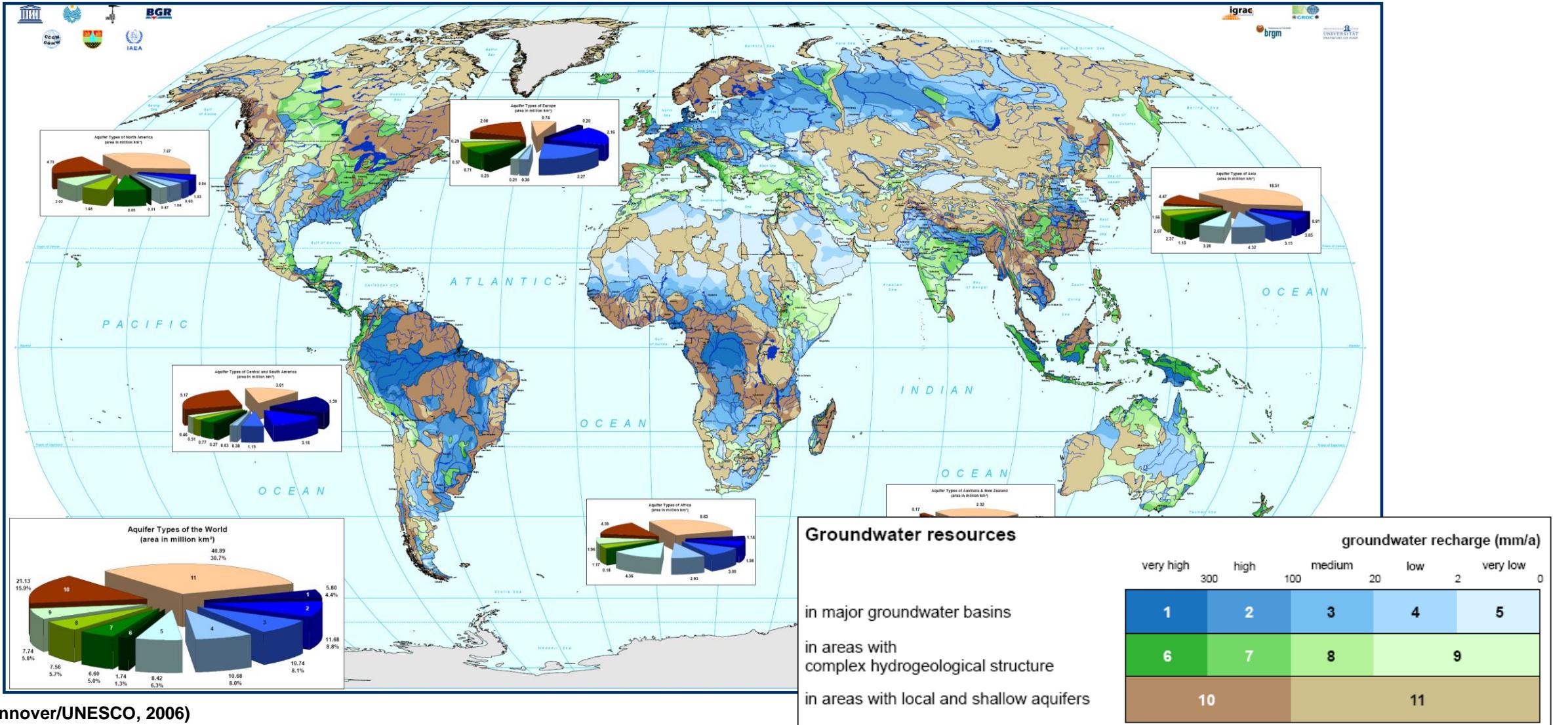
1 200 000

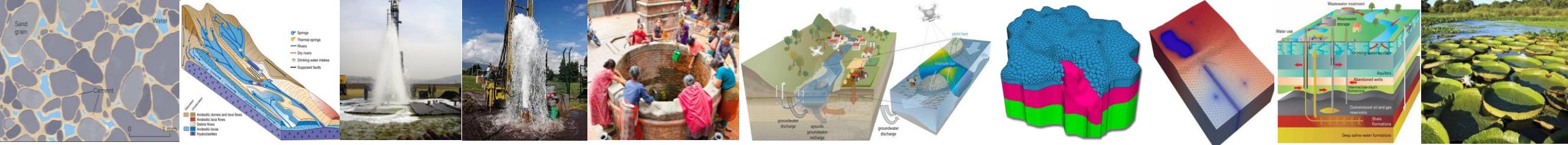
30 000 000



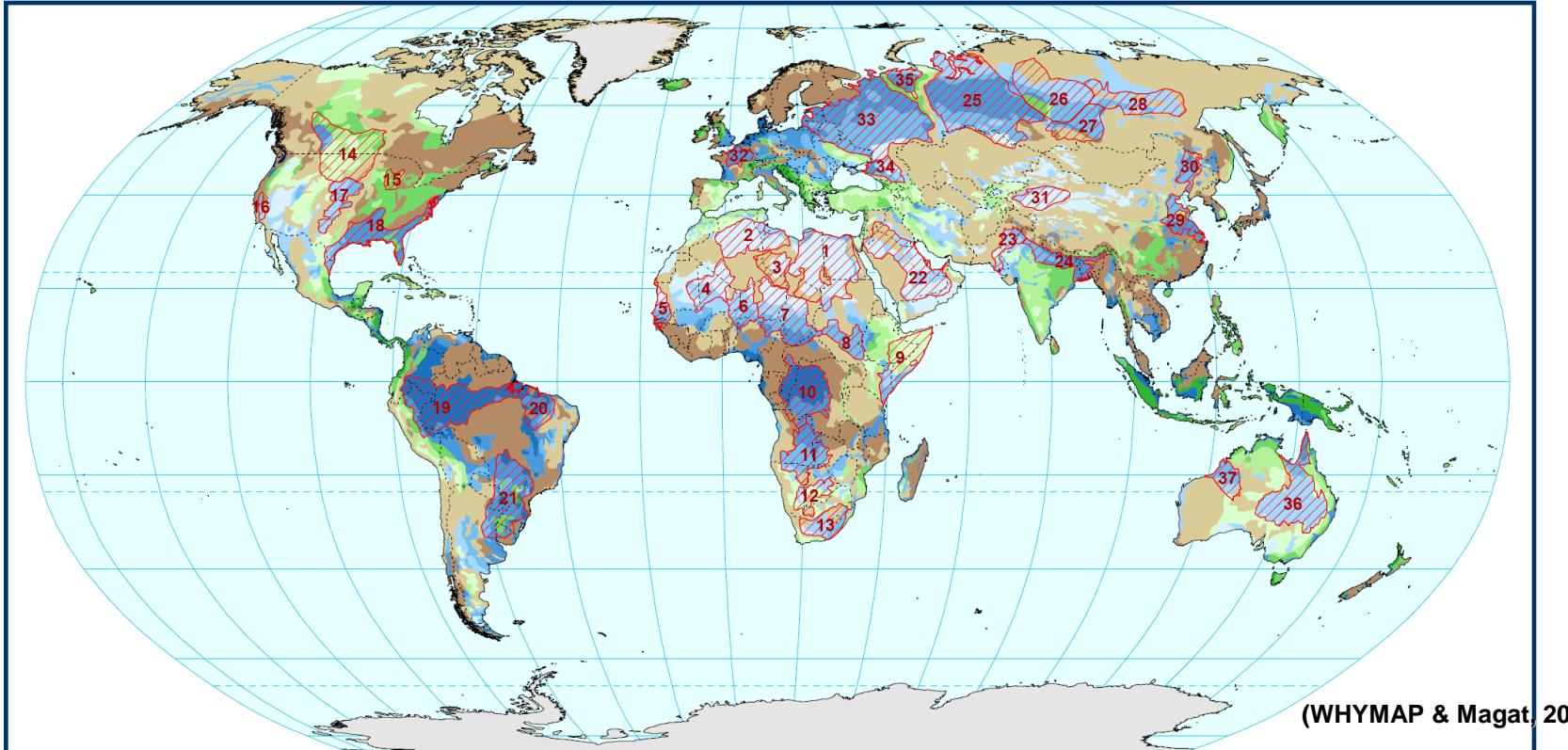


Groundwater resources of the world



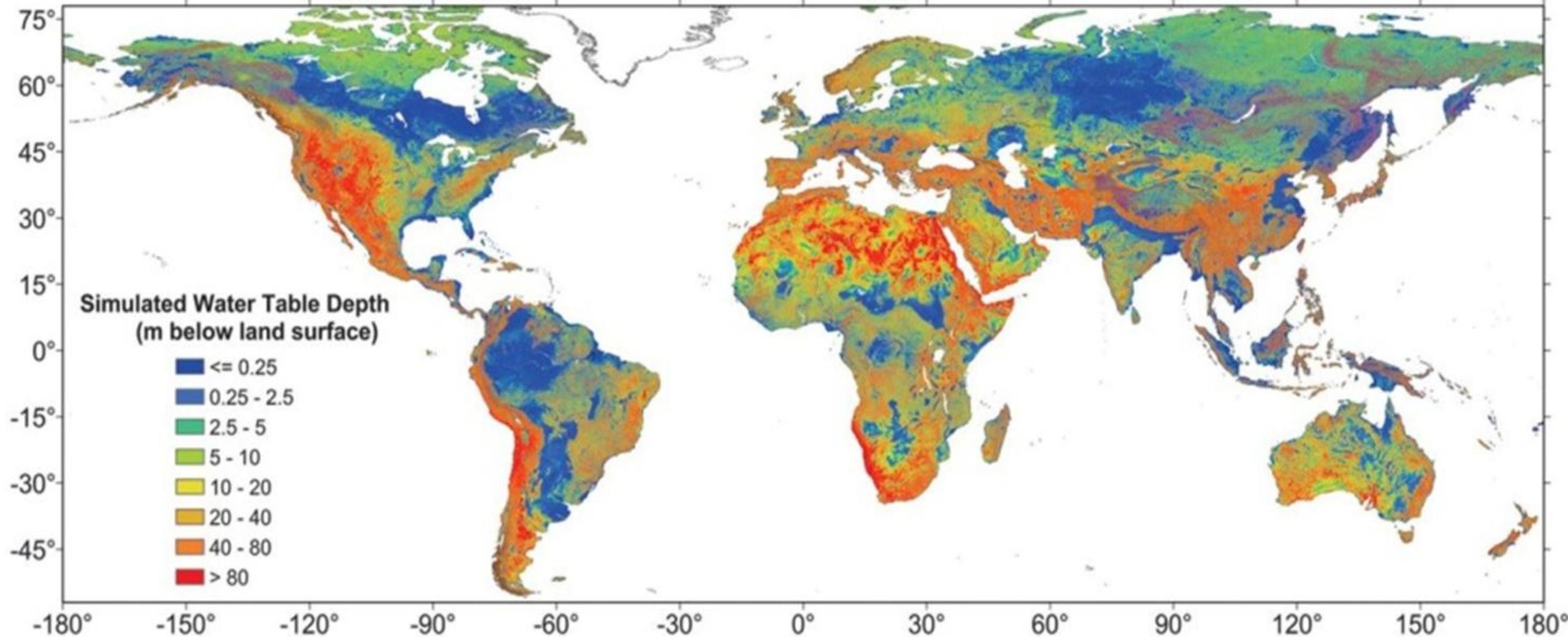


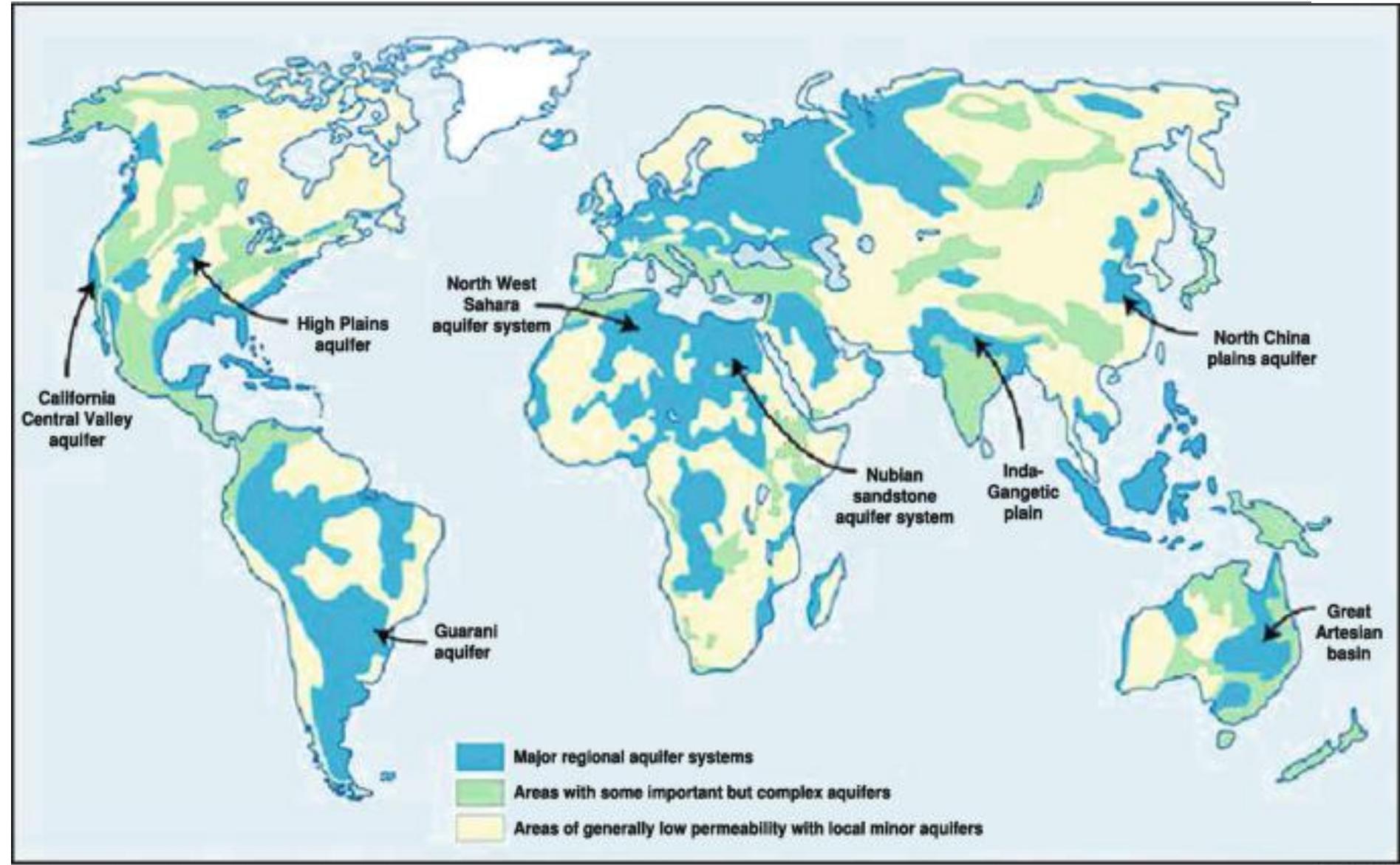
Mega-aquifers: Large aquifer systems containing very old groundwaters



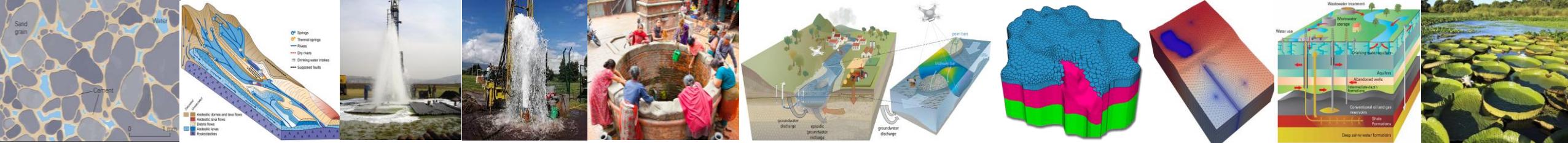
Large Aquifer Systems

- | | | | |
|--|---|--------------------------------------|----------------------------------|
| 1. Nubian Aquifer System (NAS) | 11. Northern Kalahari Basin | 21. Guarani Aquifer System | 31. Tarim Basin |
| 2. Northwest Sahara Aquifer System (NWSAS) | 12. Southeast Kalahari Basin | 22. Arabian Aquifer System | 32. Parisian Basin |
| 3. Murzuk-Djado Basin | 13. Karoo Basin | 23. Indus Basin | 33. East European Aquifer System |
| 4. Taoudeni-Tanezrouft Basin | 14. Northern Great Plains / Interior Plains Aquifer | 24. Ganges-Brahmaputra Basin | 34. North Caucasus Basin |
| 5. Senegalo-Mauritanian Basin | 15. Cambro-Ordovician Aquifer System | 25. West Siberian Artesian Basin | 35. Pechora Basin |
| 6. Iullemeden-Irhazer Aquifer System | 16. California Central Valley Aquifer System | 26. Tunguss Basin | 36. Great Artesian Basin |
| 7. Chad Basin | 17. High Plains-Ogallala Aquifer | 27. Angara-Lena Artesian Basin | 37. Canning Basin |
| 8. Sudd Basin (Umm Ruwaba Aquifer) | 18. Gulf Coastal Plains Aquifer System | 28. Yakut Basin | |
| 9. Ogaden-Juba Basin | 19. Amazonas Basin | 29. North China Plain Aquifer System | |
| 10. Congo Intracratonic Basin | 20. Maranhao Basin | 30. Songliao Basin | |

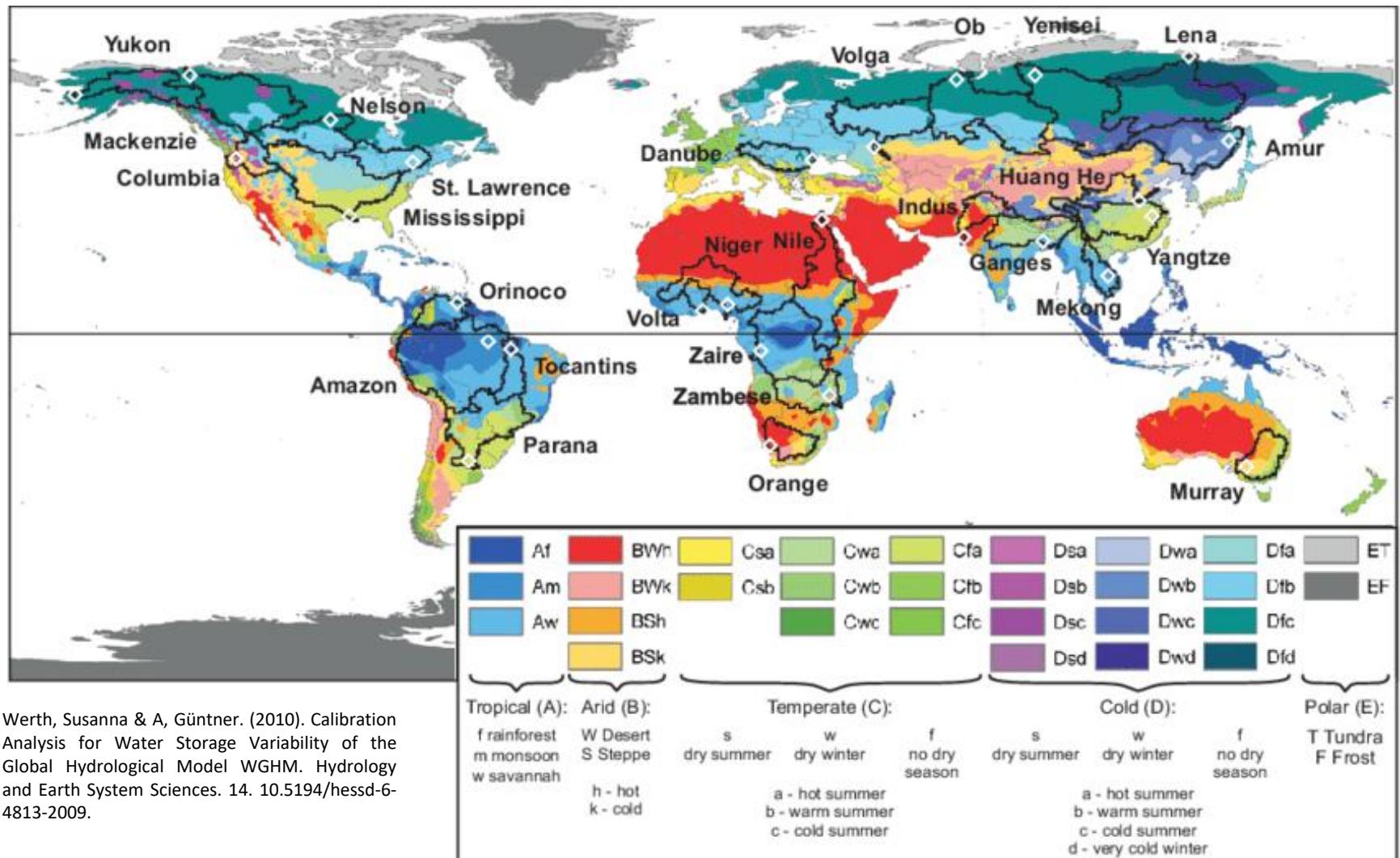




Alsharhan, A.S., Rizk, Z.E. (2020). Overview on Global Water Resources. In: Water Resources and Integrated Management of the United Arab Emirates. World Water Resources, vol 3. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31684-6_2

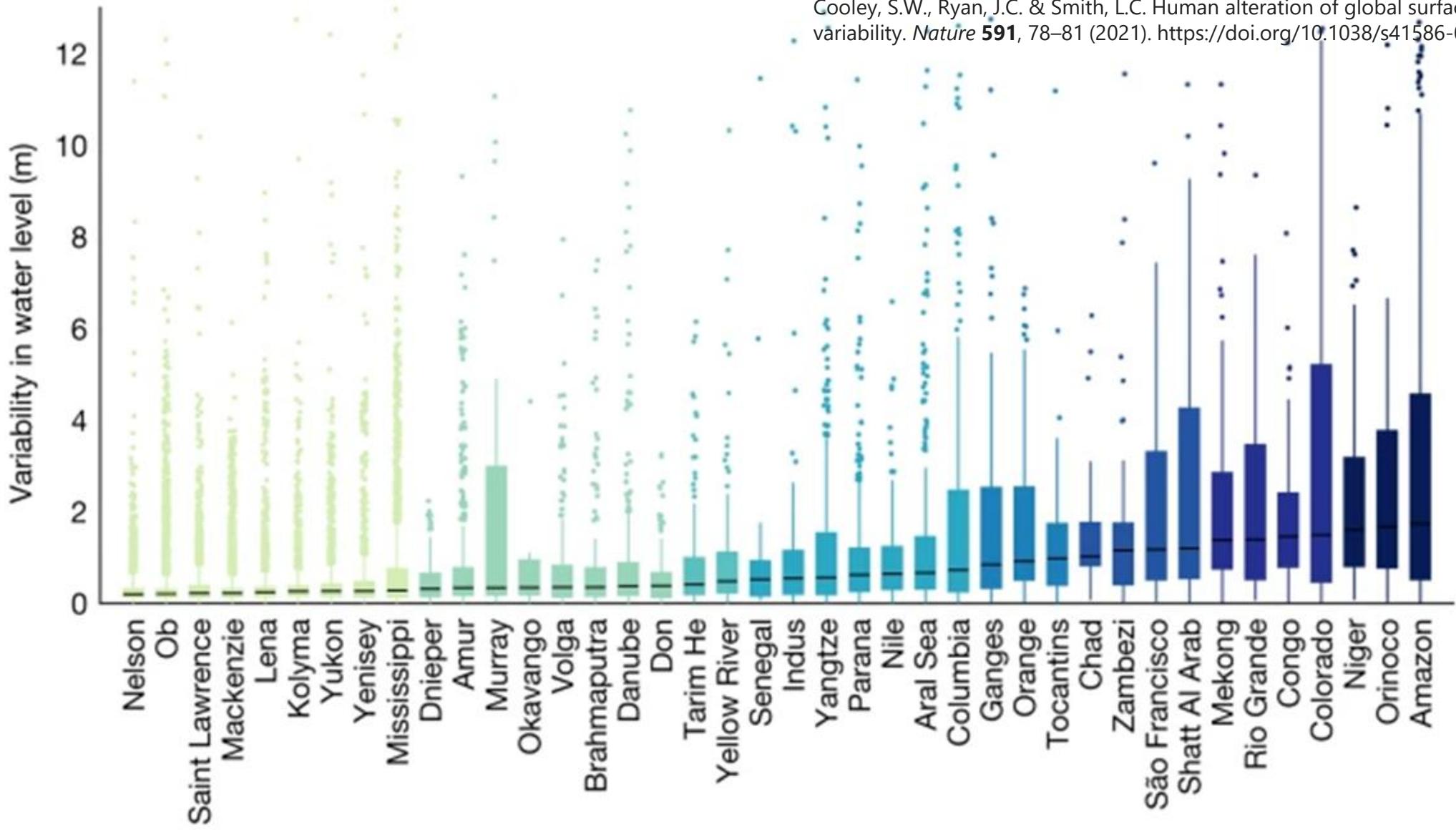


Las 28 cuencas fluviales más grandes e importantes del mundo (polígonos negros) con las zonas climáticas subyacentes de K " oppen-Geiger (para 1951-2000, por Peel et al., 2007)



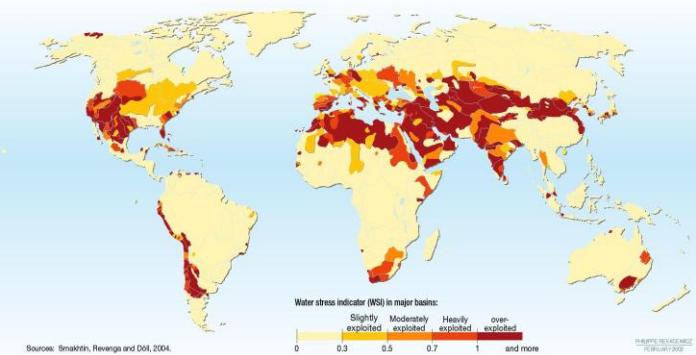


Cooley, S.W., Ryan, J.C. & Smith, L.C. Human alteration of global surface water storage variability. *Nature* **591**, 78–81 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03262-3>



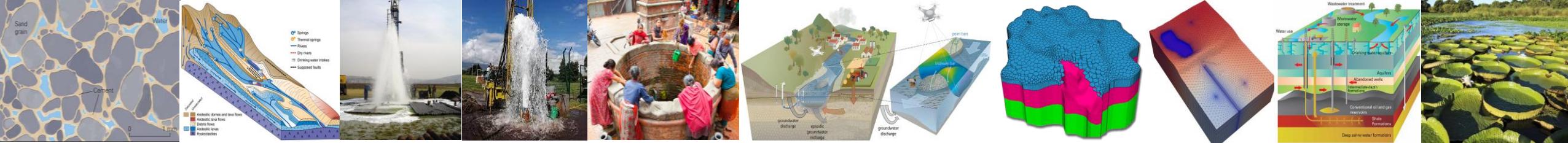


GLOBAL WATER STRESS HOTSPOTS

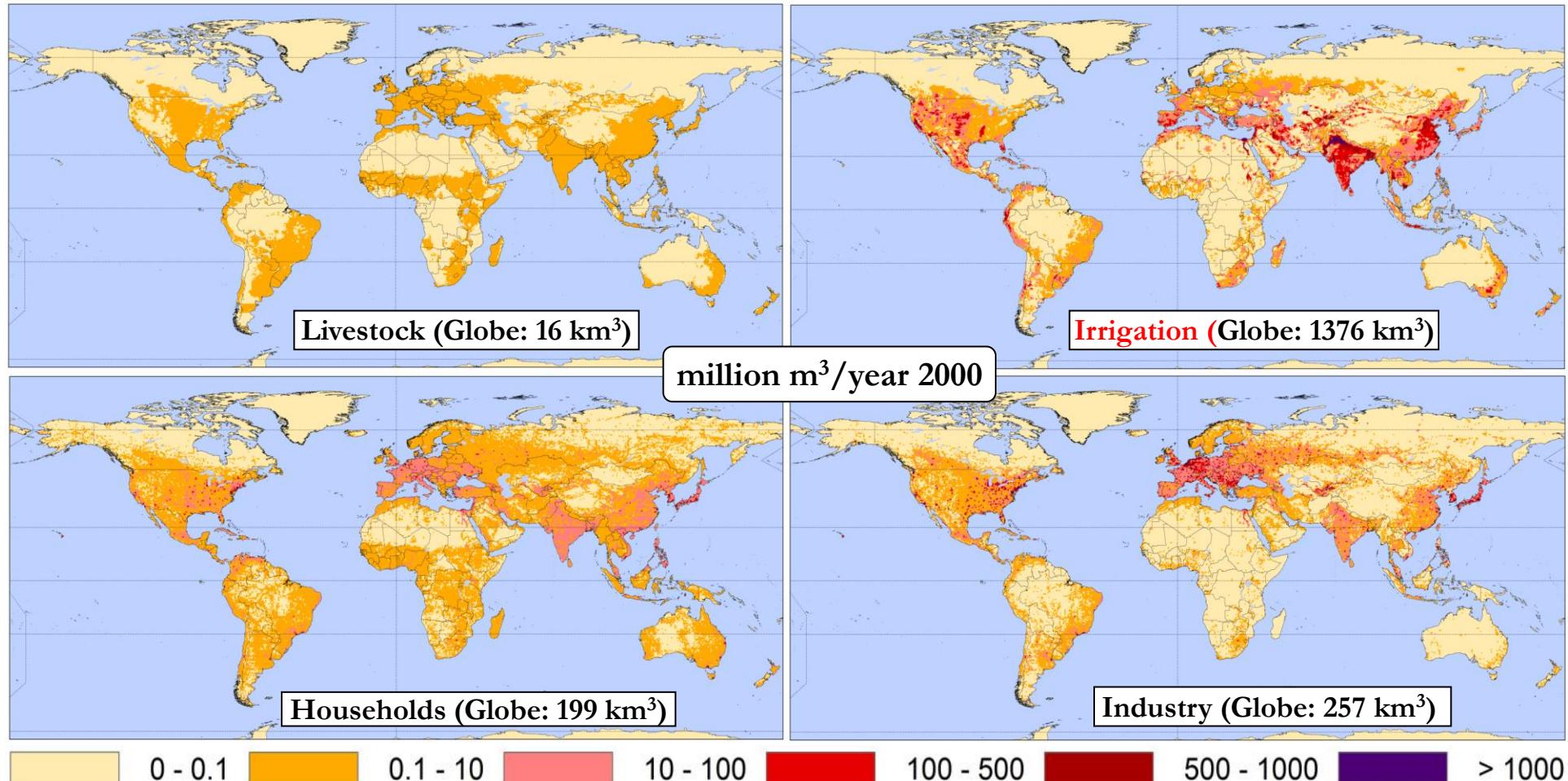


Global Water Stress Hotspot

World Meteorological Organization 2021
Based on data from the Food and Agriculture Organization and the World Resources Institute

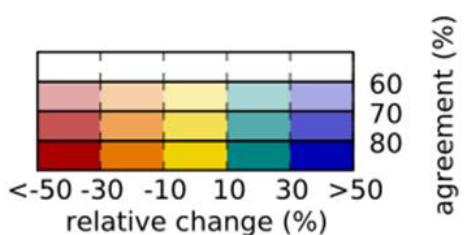
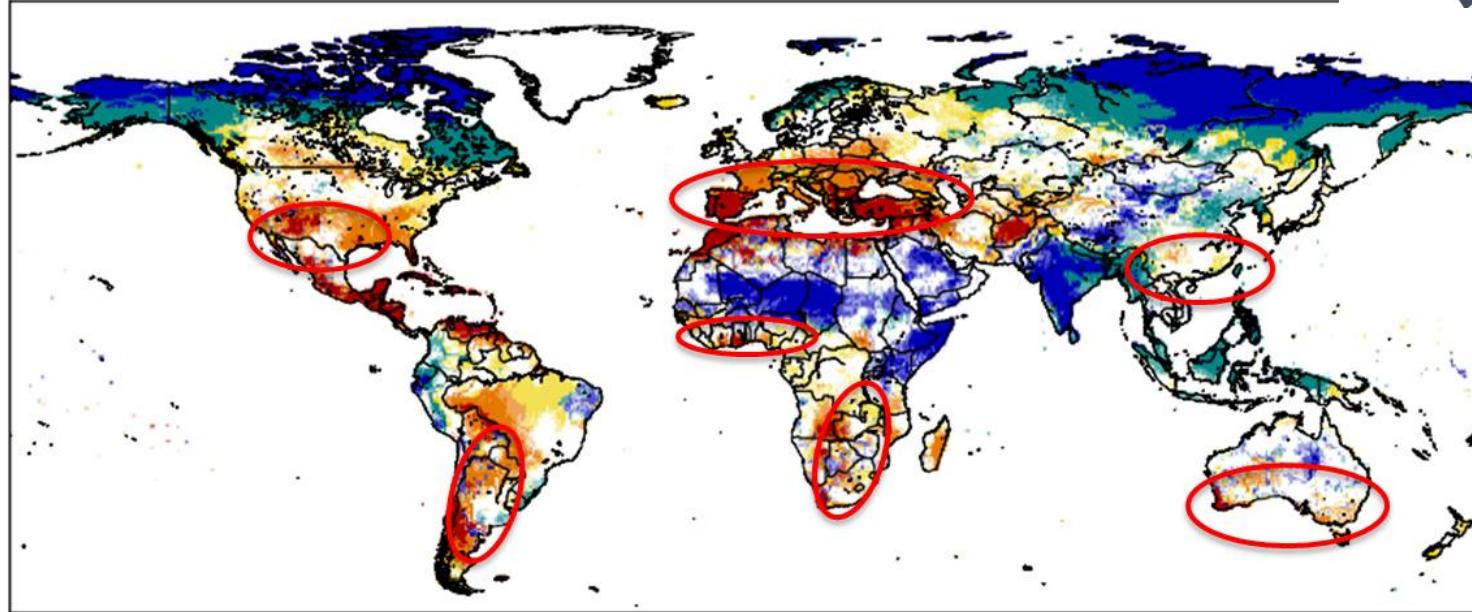


Global demand for surface water and groundwater



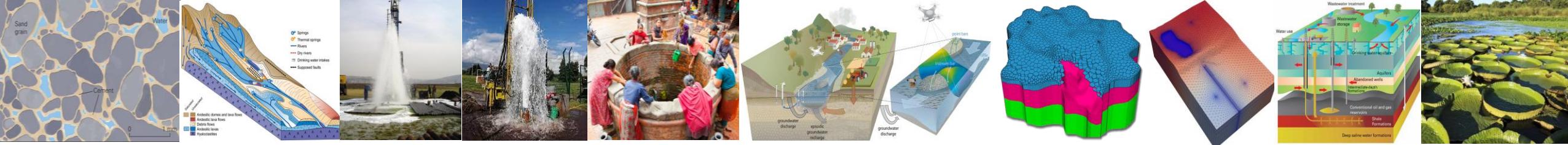
Agriculture = 74%

Wada et al., HESS, 2011

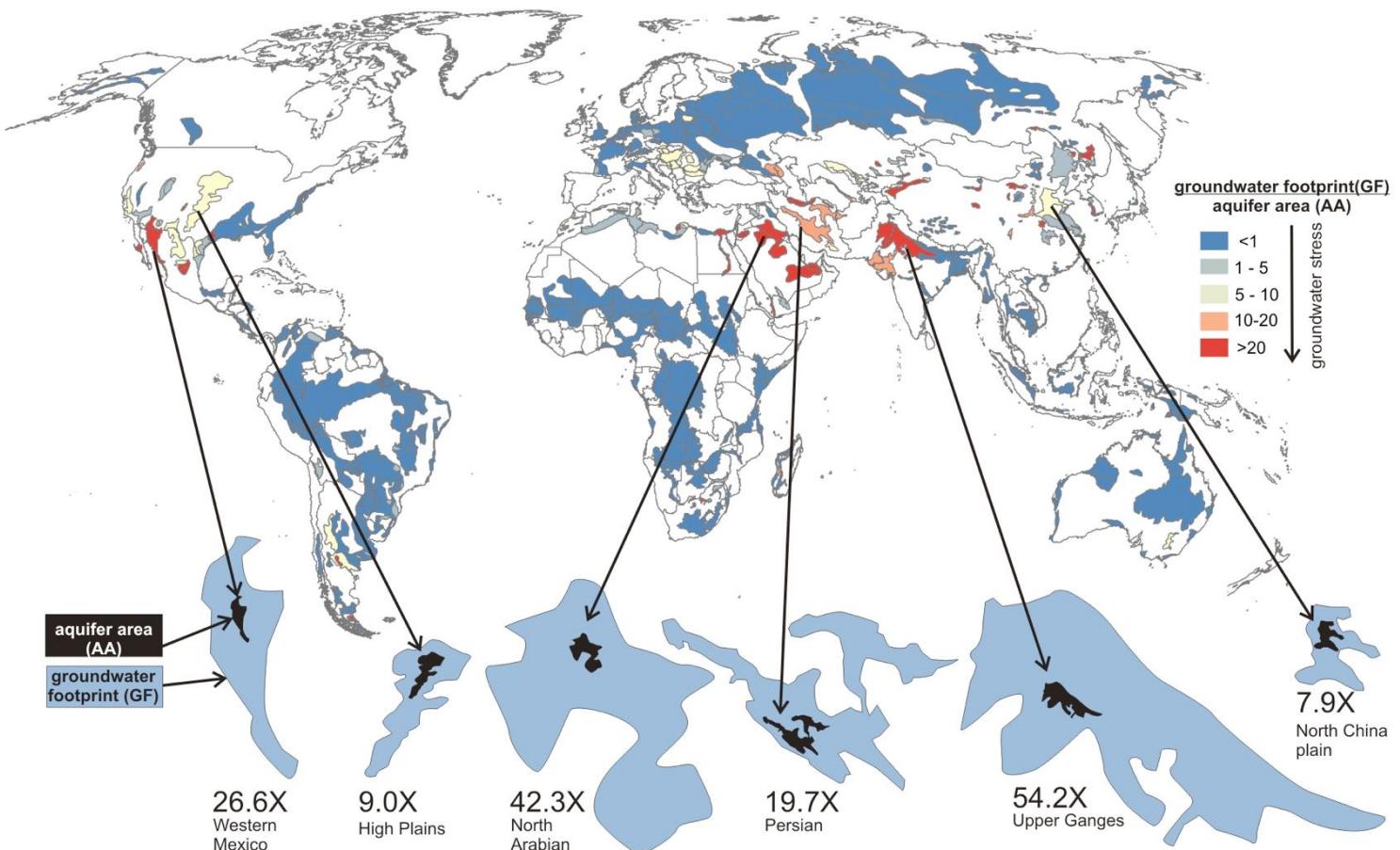


Demand to increase x3 in the Sahel
Towards 2100: Stream flow is
expected to decrease in many
other irrigated areas





Groundwater footprint of major aquifers

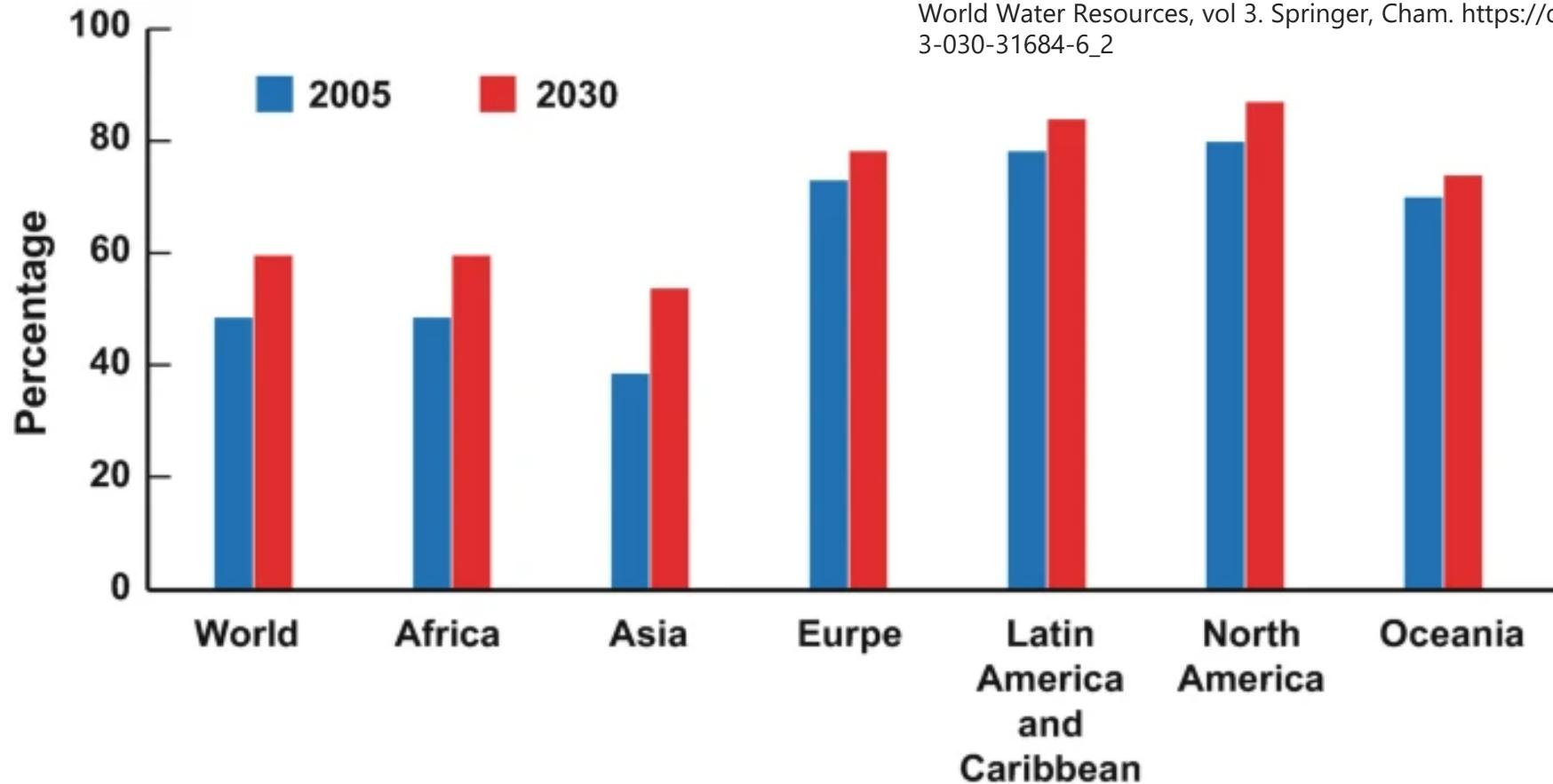


Gleeson, et al., Nature, 2012.

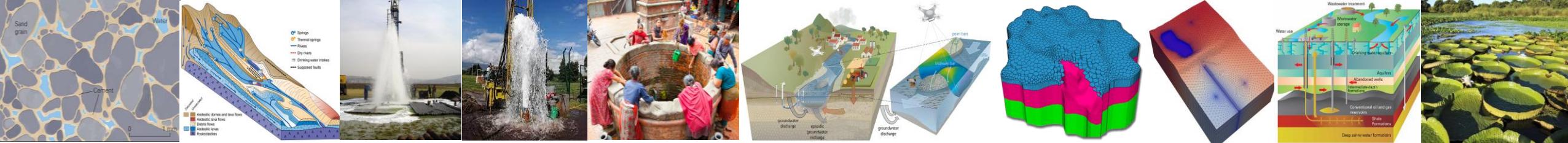
Global groundwater footprint = 3.5 times the global area of productive aquifers



Alsharhan, A.S., Rizk, Z.E. (2020). Overview on Global Water Resources. In: Water Resources and Integrated Management of the United Arab Emirates. World Water Resources, vol 3. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31684-6_2



The growth of the percentage of people living in urban areas around the globe in 2005 and 2030. (After UN [2007](#))



Need for better assessment and management of Surface and groundwater resources

Pressure on groundwater resources

- INCREASING DEMAND
- OVER-EXPLOITATION (impact on quality)
- POLLUTION OF SURFACE WATERS
- CLIMATE CHANGE

Better management of groundwater resources means:

- BETTER KNOWLEDGE OF AQUIFER SYSTEMS !!!
- GOOD LEGISLATION
- EFFICIENT ORGANIZATION
- FUNDING ...

While the intensity of groundwater use, partly encouraged by subsidized rural electrification, has led to the emergence of many groundwater-dependent economies, their future is now threatened by aquifer depletion and pollution. Prospects for relaxing use of these key aquifers, remediating water quality and restoring groundwater services to ecosystems look remote unless alternative management approaches are developed.

Jan 21, 2007

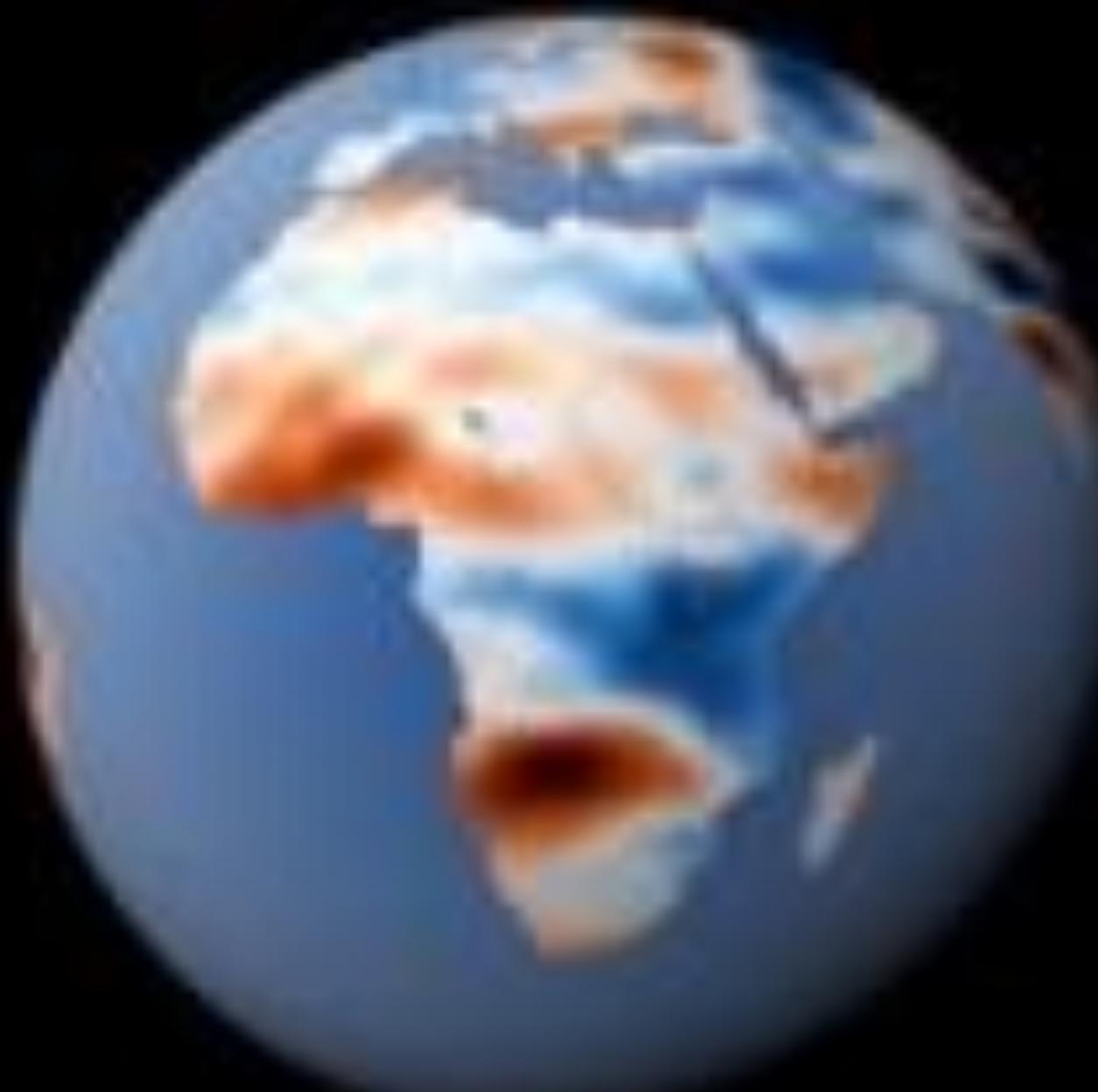


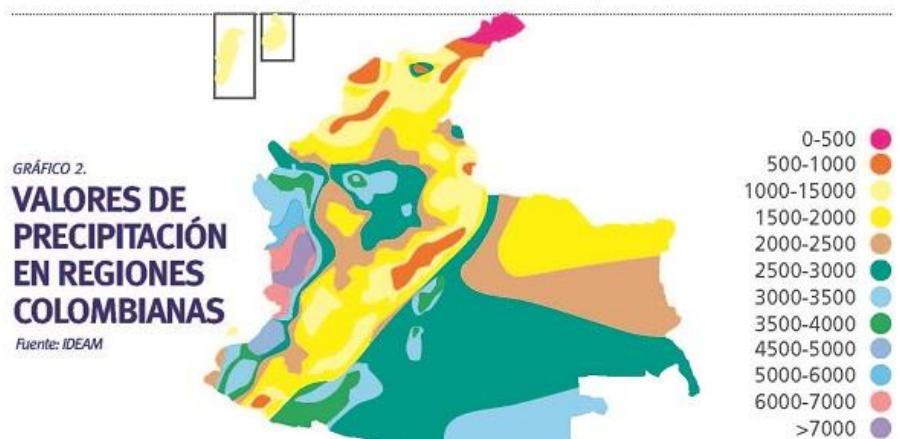


GRÁFICO No. 1

PRECIPITACIONES EN EL MUNDO SURAMÉRICA Y COLOMBIA

Fuente: Balance Hídrico Mundial y recursos hídricos de la tierra. Instituto de Hidrología UNESCO

BALANCE HÍDRICO GLOBAL

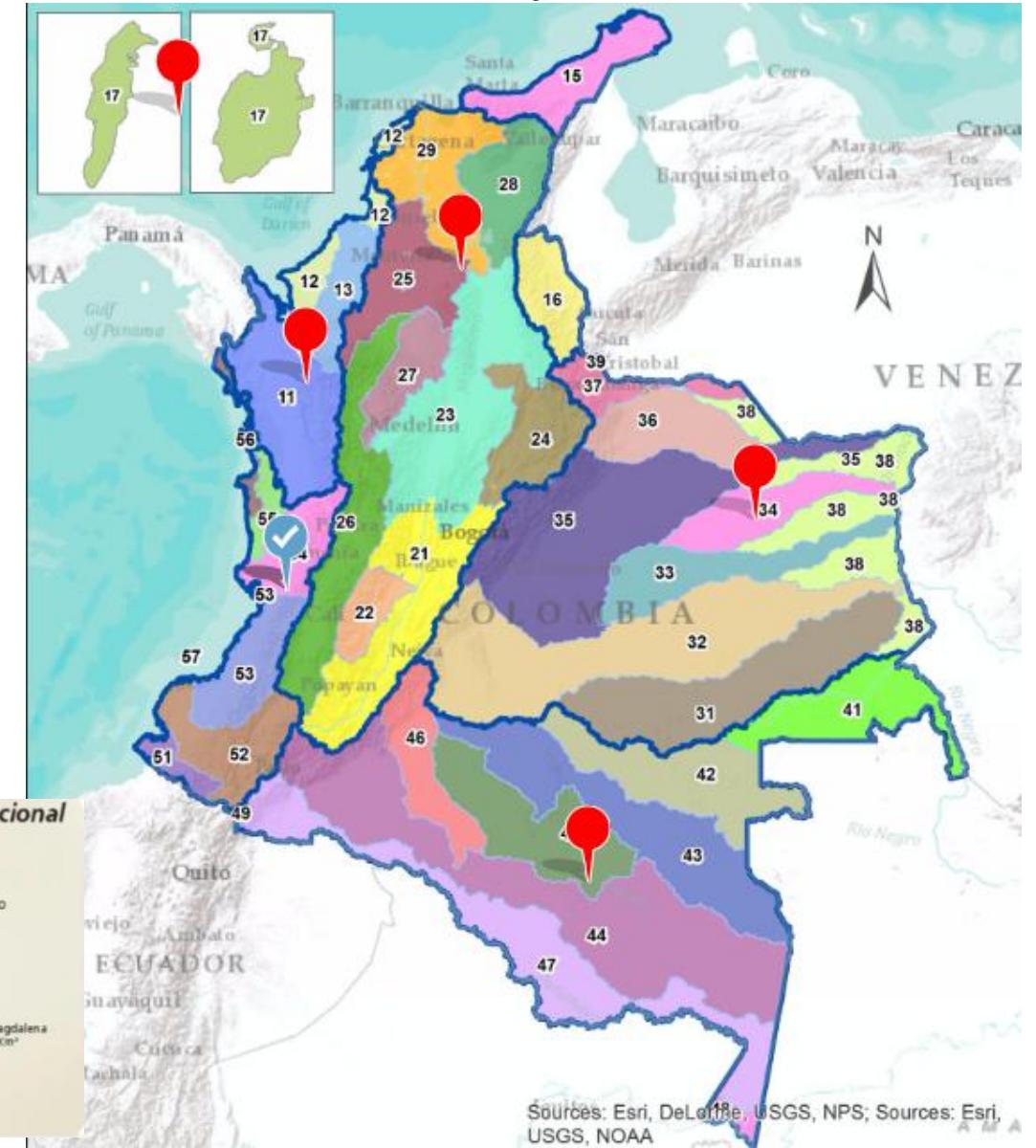
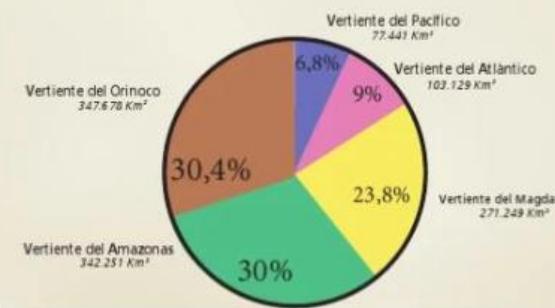




Vertientes hidrográficas o macrocuenca

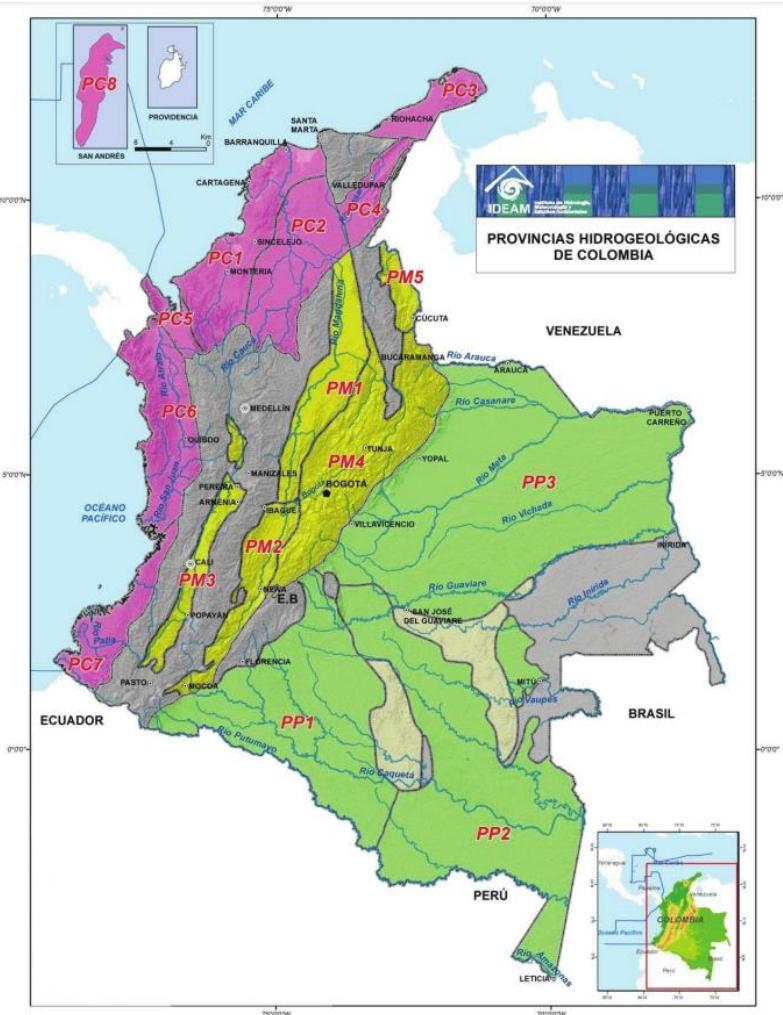


Extensión de las vertientes en el territorio nacional





Se han identificado en total 16 provincias hidrogeológicas, las cuales cubren el 74% de la extensión total del territorio nacional. Sin embargo, el 51% de esta superficie corresponde a las cuencas de la Orinoquía (Llanos Orientales), la Amazonía (Vaupés-Amazonas y Caguán-Putumayo) y la costa pacífica (Tumaco y Chocó).



PROVINCIAS HIDROGEOLÓGICAS DE COLOMBIA

MONTANAS E INTRAMONTANAS

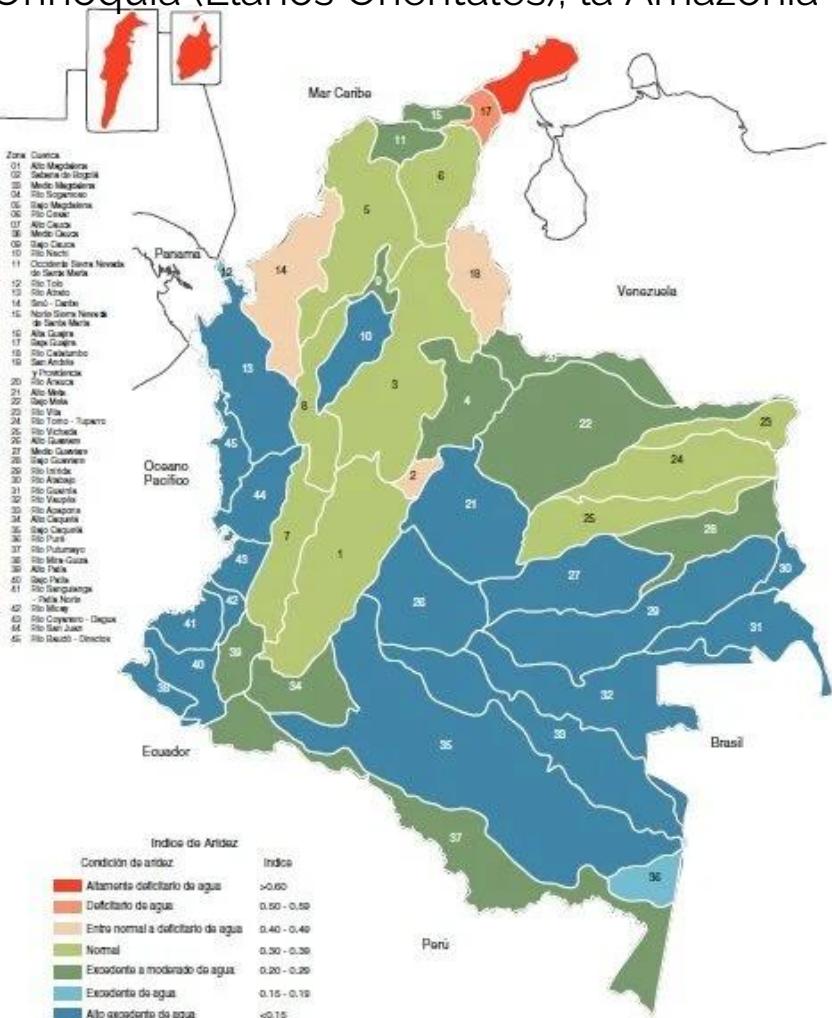
PM1	Valle Medio del Magdalena
PM2	Valle Alto del Magdalena
PM3	Cauca Patia
PM4	Cordillera Oriental
PM5	Catatumbo

COSTERAS

PC1	Sinú - San Jacinto
PC2	Valle Bajo del Magdalena
PC3	Guajira
PC4	César - Ranchería
PC5	Urabá
PC6	Chocó
PC7	Tumaco
PC8	Isla de San Andrés

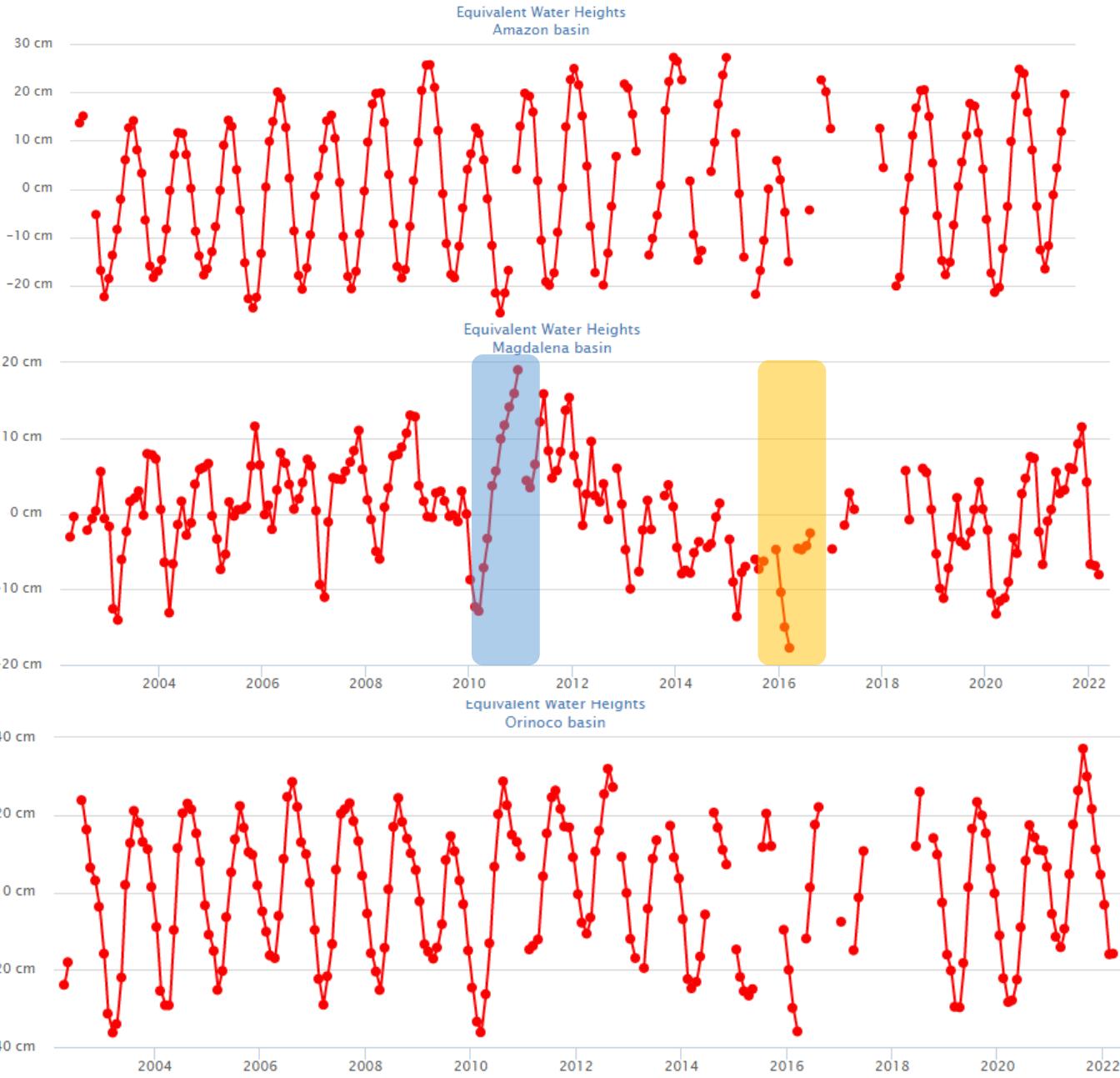
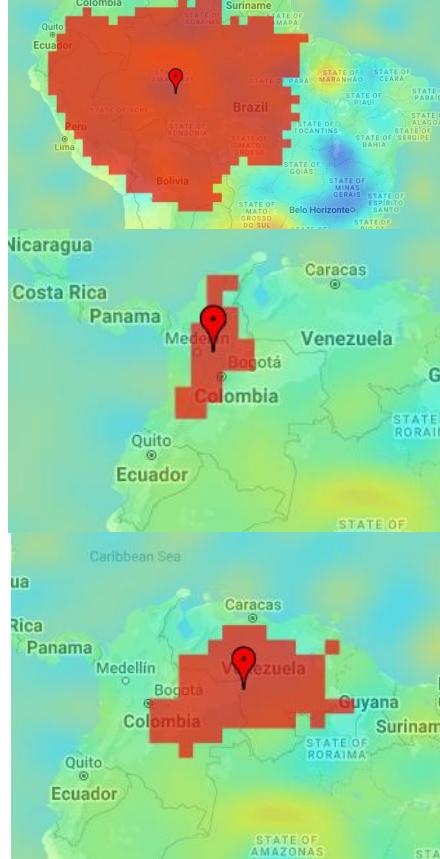
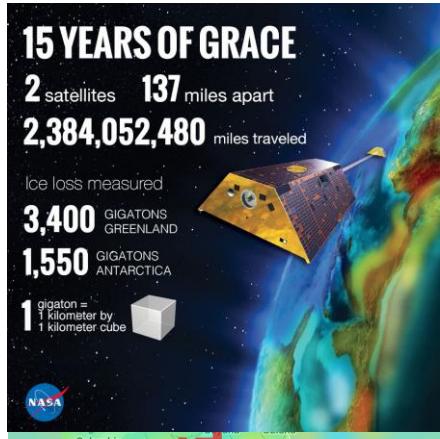
PERICRATÓNICAS

PP1	Caguán - Putumayo
PP2	Vaupés - Amazonas
PP3	Llanos Orientales



Escala: 1:8'000.000

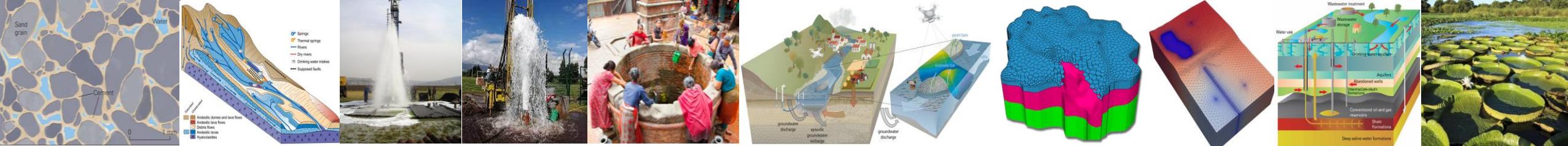
Fuente: Ideam, 2000





THE KEY QUESTION:

WHY RIVERS FLOW WHEN IT DOES NOT RAIN?



El agua subterránea y el agua superficial interactúan a lo largo del paisaje, como se muestra en el dibujo adyacente. El paisaje conceptual muestra, de manera simplificada, la interacción del agua subterránea con todos los tipos de agua superficial, como arroyos, lagos y humedales, en muchos terrenos diferentes, desde las montañas hasta los océanos.

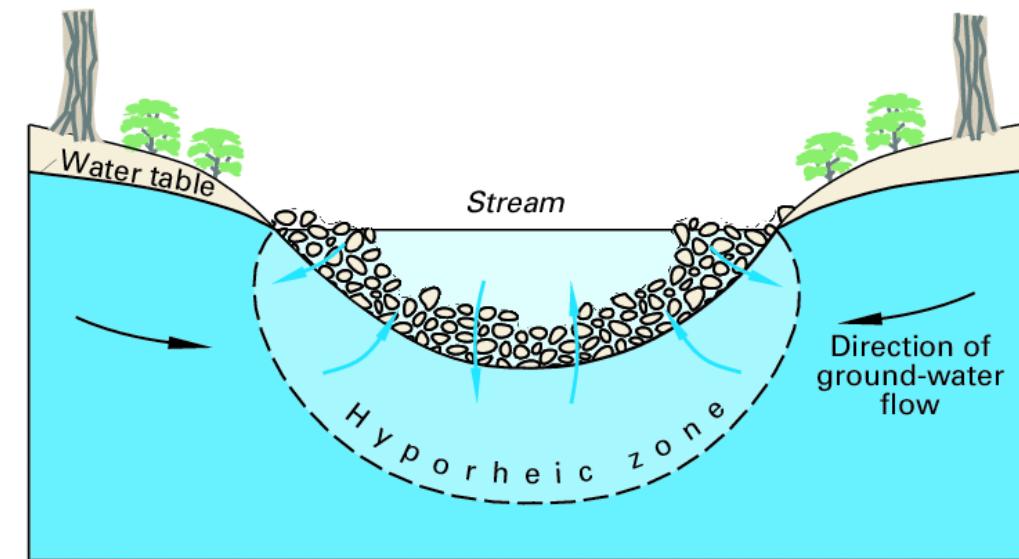
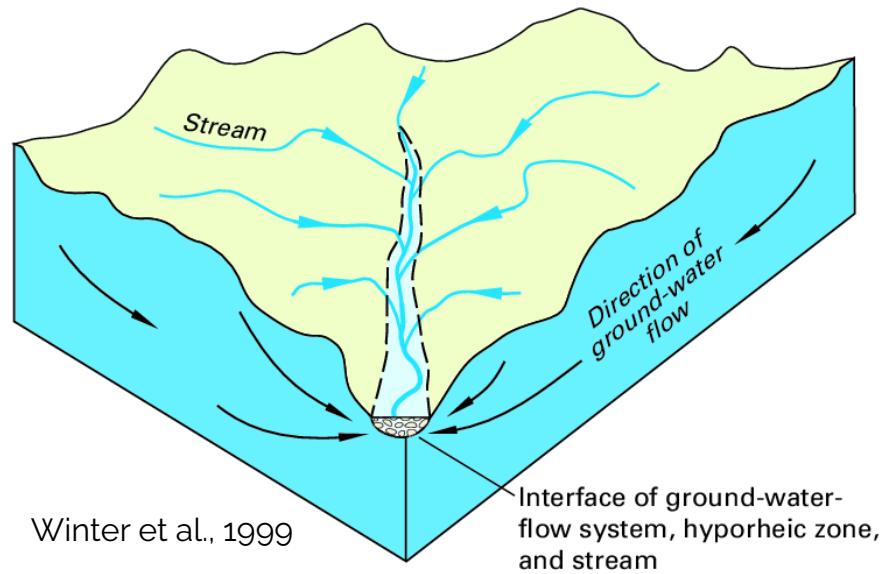


Según Jackson et al. (2001) y Fleckenstein et al. (2010) tradicionalmente las aguas subterráneas y superficiales han sido tratadas como entes diferentes, tanto científica como legalmente, debido a la perspectiva espacial y temporal del flujo.

Entender la interacción GW-SW es importante para la sustentabilidad de los recursos hídricos ya que de ésta depende la recarga-descarga (Sophocleous, 2002), la regulación de la temperatura del río (Irvine et al., 2024), la biogeoquímica (Brunke y Gonser, 1997), ecología (Hayashi y Rosenberry, 2002), concentraciones de contaminantes (Kalbus et al., 2006), suministro de agua (Changming et al., 2001), salinidad (Jolly et al., 2008) y calidad del agua (Harvey y Bencala, 1993) de un sistema hidrológico.



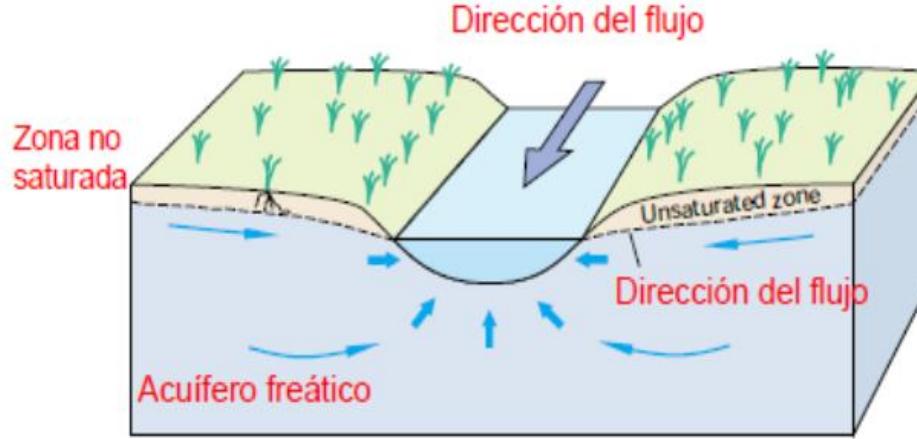
Según Tóth (1999) y Sophocleous (2002) las interacciones GW-SW son complejas y para entenderlas hay que combinar diferentes factores como climáticos, edáficos, geológicos, topográficos, bióticos y de usos del suelo. Las características hidráulicas del intercambio de flujo GW-SW en un sistema dependen en gran medida del nivel freático, nivel de agua en el río, espesor y granulometría del lecho del río (Domenico, 1972; Winter et al., 1999; Kalbus et al., 2006; Jolly et al., 2008).





Los ríos interactúan con el agua subterránea de tres maneras:

1. Los ríos ganan agua a través de la entrada de agua subterránea por el lecho del río (río ganador).
2. Pierden agua hacia el agua subterránea por flujo de salida a través del lecho del río (río perdedor)
3. Hacen ambas cosas, ganando en algunos tramos y perdiendo en otros.

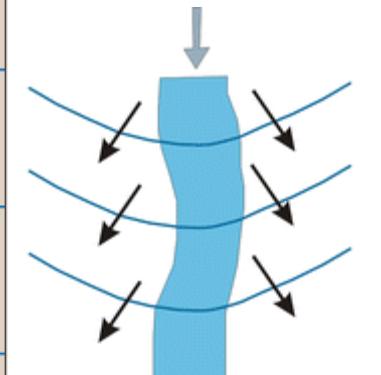
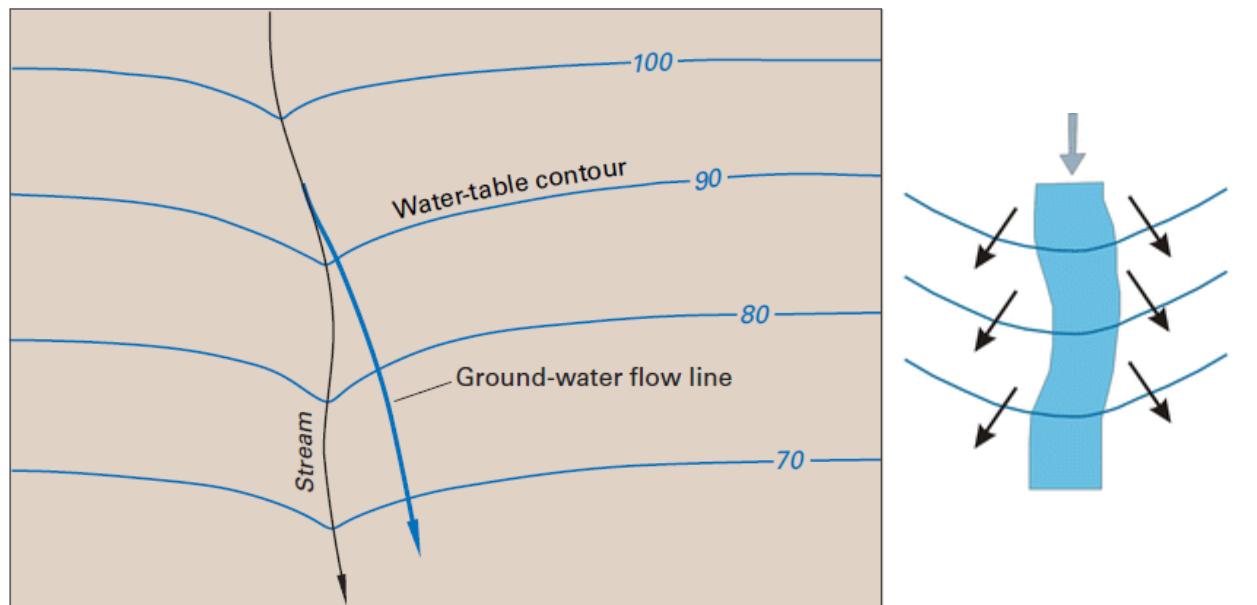
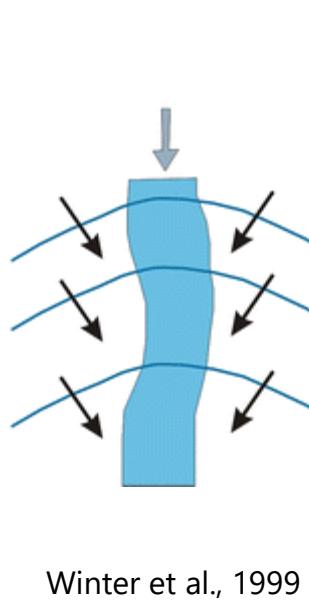
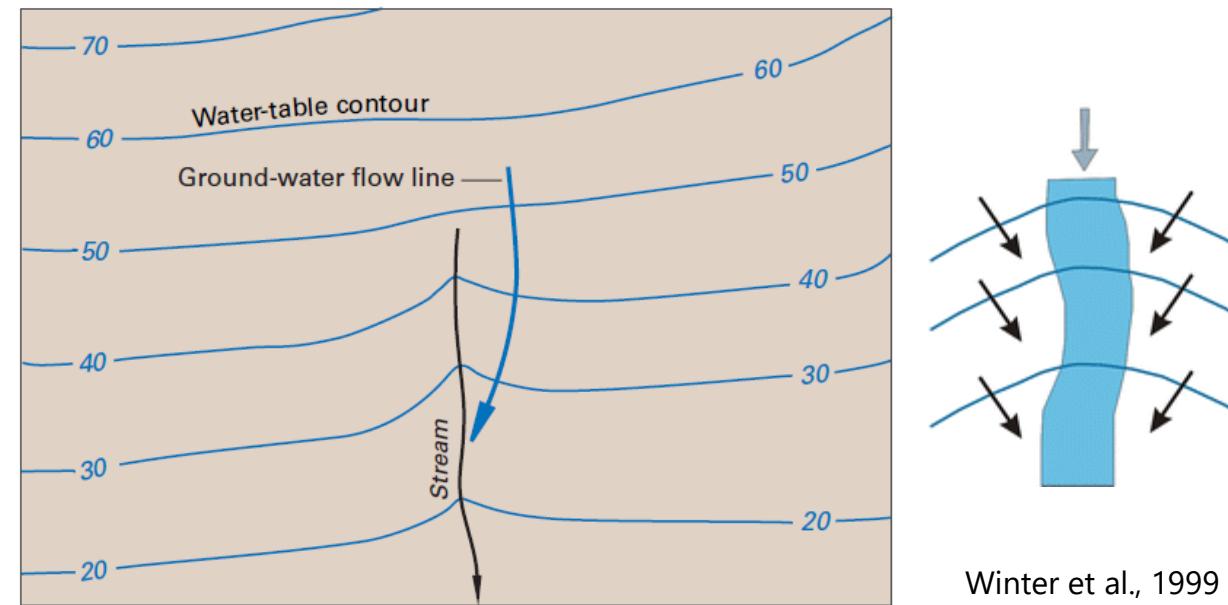


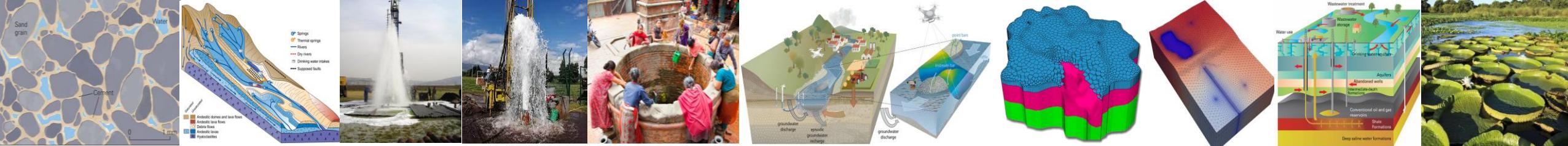
Descarga Acuífero-Río
Río Ganador



Recarga Río-Acuífero
Río Perdedor

Winter et al., 1999





Unidad 1. Balance hídrico e introducción a las características del flujo entre las aguas subterráneas y superficiales (interacciones acuífero-río-planicie inundable)

PRE FLOOD

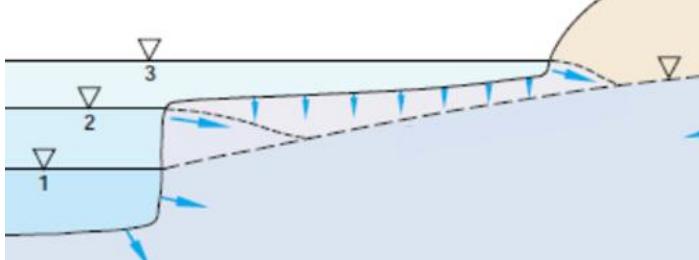


Winter et al., 1999

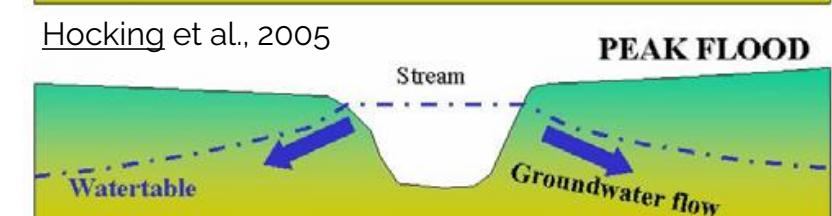
Superficie del terreno
Planicie de inundación



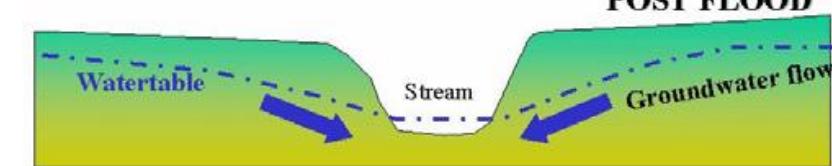
b. Almacenamiento en banco



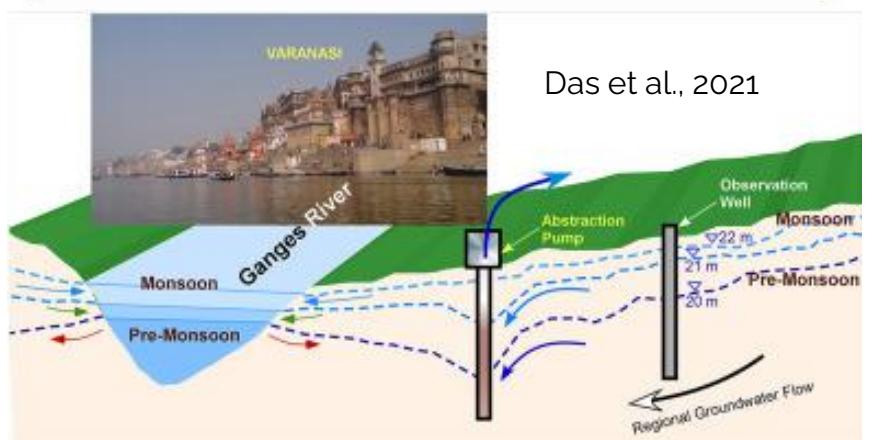
Hocking et al., 2005



PEAK FLOOD



POST FLOOD



Aumentos en el nivel del río pueden causar que la dirección del flujo a través del lecho del río se invierta y conduzca a almacenamiento en el banco (b) y a la recarga de agua subterránea en toda el área inundada o planicie de inundación (c).

