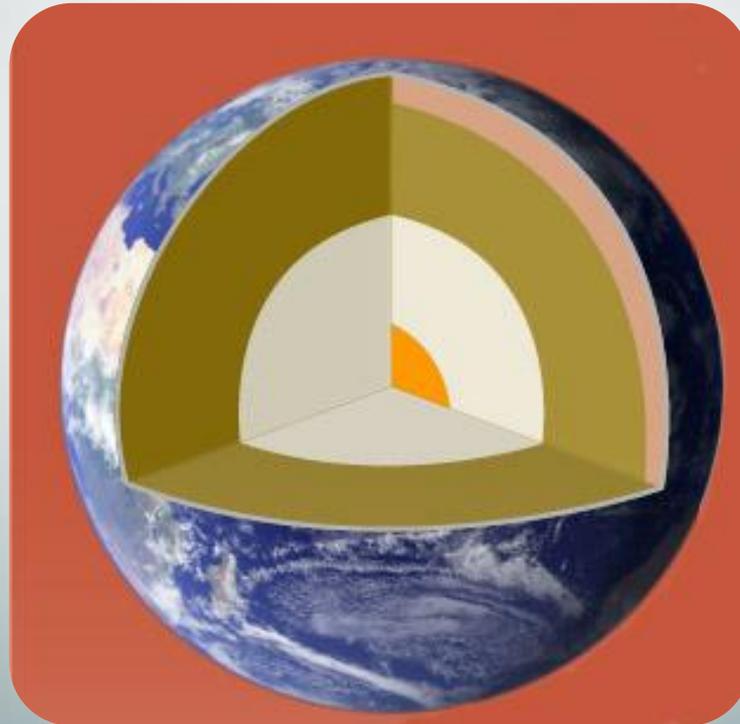


# Geología

## Tema 10. Aguas subterráneas



# ¿Dónde se encuentra el agua subterránea?

- El agua subterránea es el agua que se encuentra en los poros del suelo, del sedimento y en las fracturas.
- El agua subterránea representa el mayor depósito de agua dulce que resulta fácilmente asequible a los seres humanos

# Agua dulce en la hidrosfera

Depósito	Volumen (en millones de km <sup>3</sup> )	Porcentaje
Océanos	1 370	90,40386
Casquetes y glaciares	546	8,90
Agua subterránea	9,5	0,68
Lagos	0,125	0,01
Humedad del suelo	0,065	0,005
Atmósfera	0,013	0,001
Arroyos y ríos	0,0017	0,0001
Biomasa	0,0006	0,00004

# Agua dulce en la hidrosfera

Depósito	Tiempo medio de residencia
Glaciares	20 a 100 años
Nieve estacional	2 a 6 meses
Humedad del suelo	1 a 2 meses
Agua subterránea: somera	100 a 200 años
Agua subterránea: profunda	10.000 años
Lagos	50 a 100 años
Ríos	2 a 6 meses

# El papel geológico de las aguas subterráneas

Papel geológico del agua subterránea.

- Como agente erosivo, la acción disolvente del agua subterránea produce.
  - Dolinas.
  - Cavernas.
- El agua subterránea sirve como compensador del flujo de escorrentía en los ríos.

# Distribución de las aguas subterráneas

- Cinturón de humedad del suelo – agua retenida por la atracción molecular de las partículas del suelo en una zona cercana a la superficie.
- Zona de saturación.

Formación.

- El agua que no es retenida como humedad del suelo percola hacia abajo.

# Distribución de las aguas subterráneas

Zona de saturación.

- Formación.
  - El agua alcanza una zona donde todos los espacios. libres del sedimento y la roca están completamente llenos de agua.
  - El agua de estos poros se denomina agua subterránea.
- Nivel freático – el límite superior de esta zona de saturación.

# Distribución de las aguas subterráneas

Franja capilar.

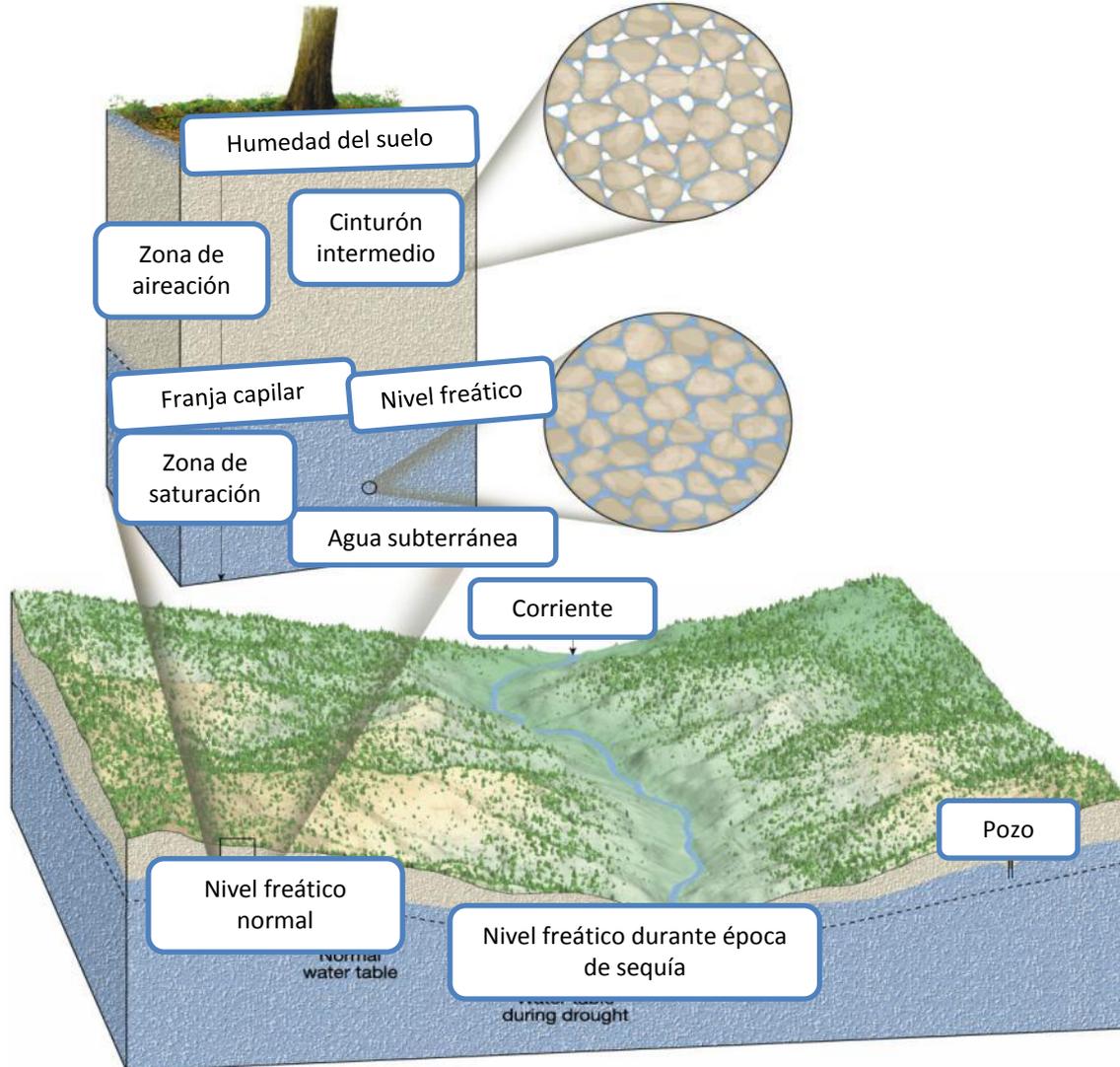
- Se extiende hacia arriba desde el nivel freático.
- El agua subterránea es mantenida por la tensión superficial en diminutos conductos comprendidos entre los granos de suelo o de sedimento.

# Distribución de las aguas subterráneas

Zona de aireación.

- Área situada por encima del nivel freático.
- Abarca la franja capilar y el cinturón de humedad.
- El agua no puede ser bombeada por los pozos.

# Distribución de las aguas subterráneas



# El nivel freático

El nivel freático es el límite superior de la zona de saturación.

Variaciones en el nivel freático.

- La profundidad del nivel freático es muy variable.
- Varía según las estaciones del año y de un año a otro.
- Su forma suele ser una réplica suavizada de la topografía superficial.

# El nivel freático

Variaciones en el nivel freático.

Factores que contribuyen a la superficie irregular del nivel freático.

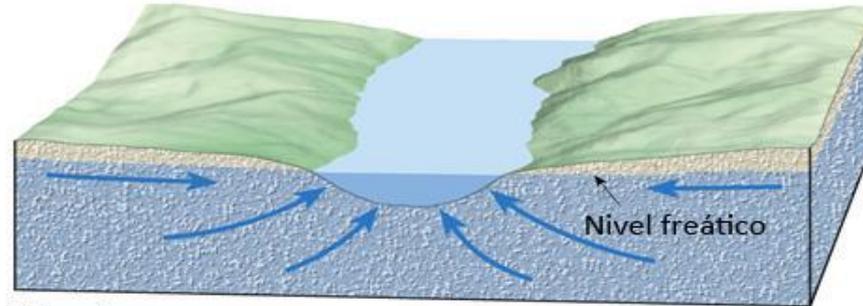
- El agua tiende a «apilarse» debajo de las áreas altas.
- Variaciones en la precipitación.
- Variaciones en la permeabilidad según el lugar.

# El nivel freático

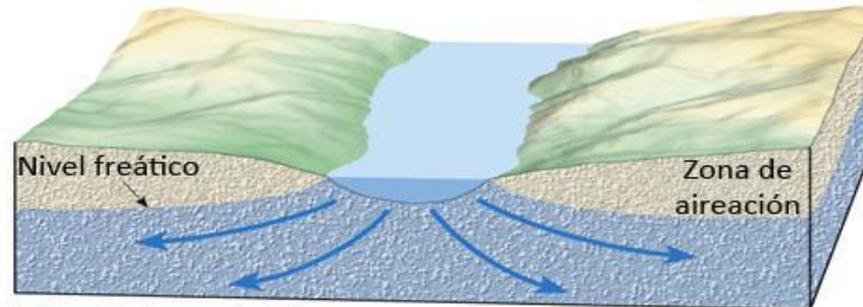
Interacción entre las aguas subterráneas y las aguas corrientes.

- Es un eslabón básico del ciclo hidrológico.
- Tres tipos de interacciones.
  - Efluentes – reciben agua de la aportación de aguas subterráneas a través de la corriente.
  - Influentes – pierden agua hacia el sistema de aguas subterráneas por la salida de agua a través del lecho de corriente.
  - Influyente desconectado por una zona de aireación.

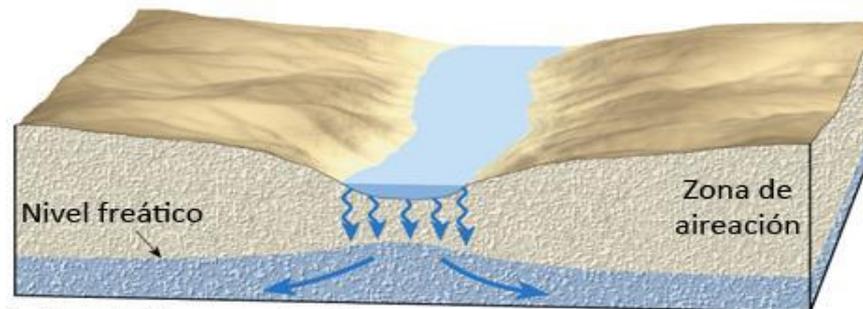
# Efluentes e influentes



Efluente



Influente (conectado)



Influente (desconectado)

# Factores que influyen en el almacenamiento y la circulación de las aguas subterráneas

Porosidad – porcentaje del volumen total de roca o sedimento formado por poros. Los poros son espacios que quedan entre las partículas sedimentarias, pero también entran en esta consideración: diaclasas, fracturas/fallas y las cavidades originadas por disolución de las rocas.

- Determina la cantidad de agua subterránea que puede almacenarse
- Puede haber variaciones considerables en lugares cercanos.

# Rendimiento específico y retención específica

- Cuanto más pequeños sean los poros, tanto más lento será el movimiento del agua.
- La capacidad de la arcilla para almacenar agua es grande debido a su gran porosidad, pero sus poros son tan pequeños que el agua es incapaz de moverse a través de ellos.
- La porción de agua que drena por gravedad se denomina rendimiento específico e indica cuánta agua es realmente asequible para su uso.
- La porción de agua que es retenida a modo de película sobre la superficie de las partículas en los poros pequeños se denomina retención específica e indica cuánta agua permanece unida al material.

Material	Porosidad	Rendimiento específico	Retención específica
Suelo	55	40	15
Arcilla	50	2	48
Arena	25	22	3
Grava	20	19	1
Caliza	20	18	2
Arenisca (semiconsolidada)	11	6	5
Granito	0.1	0.09	0.01
Basalto	11	8	3

Los valores se dan en porcentaje por volumen

# Factores que influyen en el almacenamiento y la circulación de las aguas subterráneas

Permeabilidad, acuicluidos y acuíferos.

- Permeabilidad: Capacidad del material para transmitir un fluido.
- Acuicluidos: Estratos impermeables que obstaculizan o impiden el movimiento del agua (como la arcilla).
- Acuíferos: Estratos de roca o sedimentos permeables que transmiten libremente el agua subterránea (como la arena y la grava).

# Circulación de las aguas subterráneas

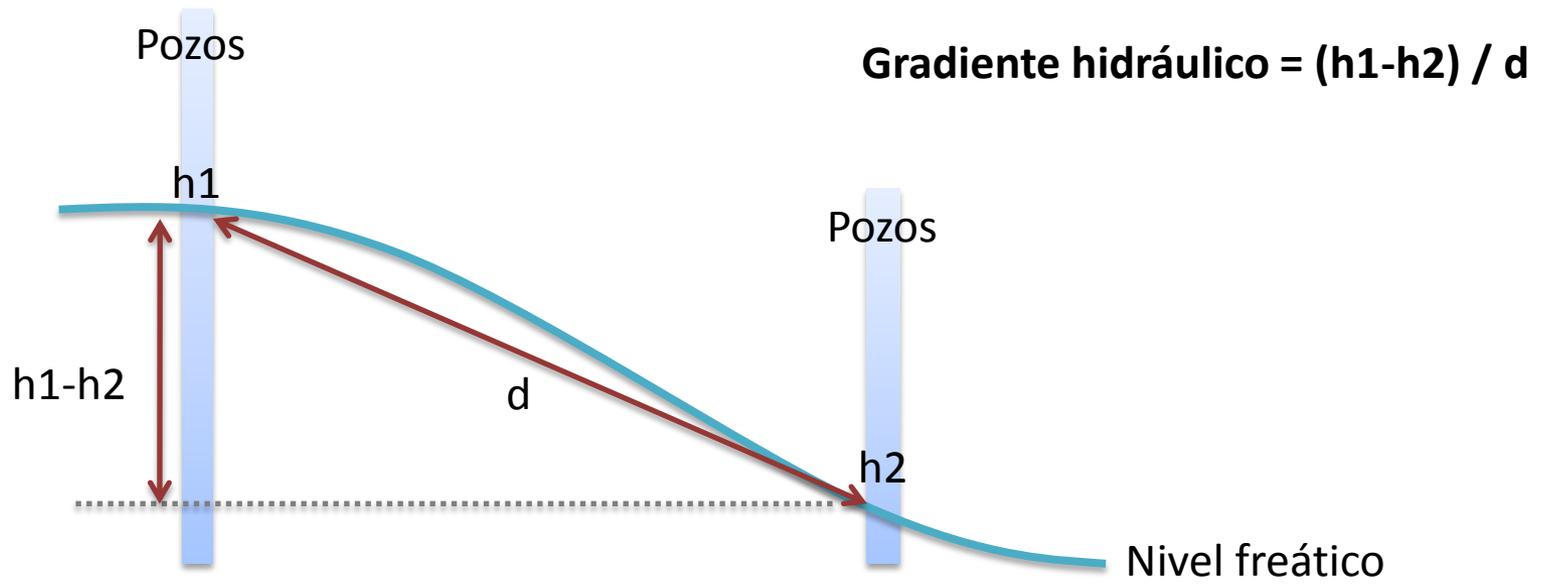
Circulación de las aguas subterráneas.

El agua se mueve, a través de los poros, lentamente (unos pocos cm al día) desde donde el nivel freático es elevado hacia zonas donde el nivel freático es más bajo.

- Extraordinariamente lento – velocidades típicas de unos pocos centímetros al día.
- La energía que hace moverse el agua subterránea la proporciona la fuerza de la gravedad.
- Gradiente hidráulico – es la pendiente del nivel freático y se determina midiendo la diferencia de elevación entre dos puntos del nivel freático dividida por la distancia entre esos puntos.

# Gradiente hidráulico

**Gradiente hidráulico** – es la pendiente del nivel freático y se determina midiendo la diferencia de elevación entre dos puntos del nivel freático dividida por la distancia entre esos puntos.



# Circulación de las aguas subterráneas

Circulación de las aguas subterráneas.

- Conductividad hidráulica – coeficiente que tiene en cuenta la permeabilidad del acuífero y la viscosidad del fluido
- Ley de Darcy – si la permeabilidad es uniforme, la velocidad del agua subterránea aumenta a medida que aumenta la pendiente del nivel freático. Se expresa por:

$$Q = K A (h_1 - h_2) / d$$

Donde:

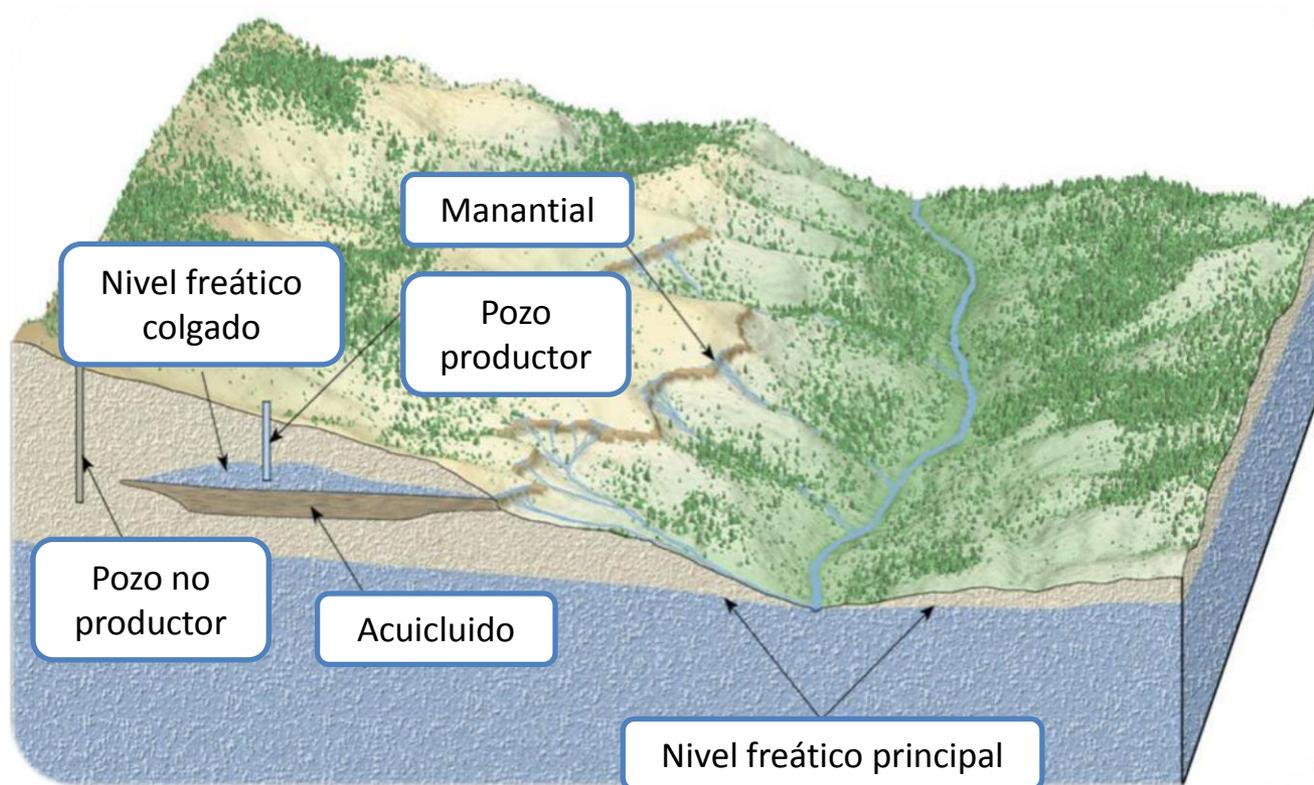
- $Q$  = caudal (volumen de agua que fluye por el acuífero).
- $K$  = conductividad hidráulica.
- $(h_1 - h_2) / d$  = gradiente hidráulico.
- $A$  = área transversal del acuífero.

# Manantiales o fuentes

## Manantiales.

- Aparecen cuando el nivel freático intersecta la superficie terrestre.
- Flujo natural de salida de agua subterránea.
- Puede producirse porque un acuicluido crea una zona local de saturación denominada nivel freático colgado.

# Manantial que resulta de un nivel freático colgado



# Fuentes termales y géiseres

Fuentes termales.

- El agua está entre 6 y 90°C más caliente que la temperatura media anual del aire para las localidades donde aparece.
- El agua de la mayoría de las fuentes termales se calienta por el enfriamiento de las rocas ígneas.

# Fuentes termales y géiseres

## Géiseres.

- Fuentes termales intermitentes.
- Expulsan el agua con gran fuerza.
- Aparecen donde existen extensas cámaras subterráneas dentro de las rocas ígneas calientes.
- Cuando el agua subterránea se calienta, se expande, se evapora y entra en erupción.

# Pozos

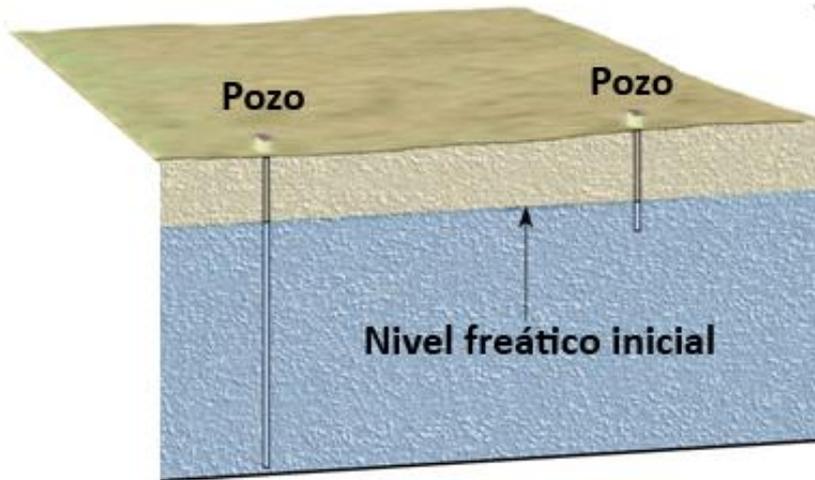
Para asegurar un continuo suministro de agua el pozo debe penetrar por debajo del nivel freático.

El bombeo de los pozos puede causar.

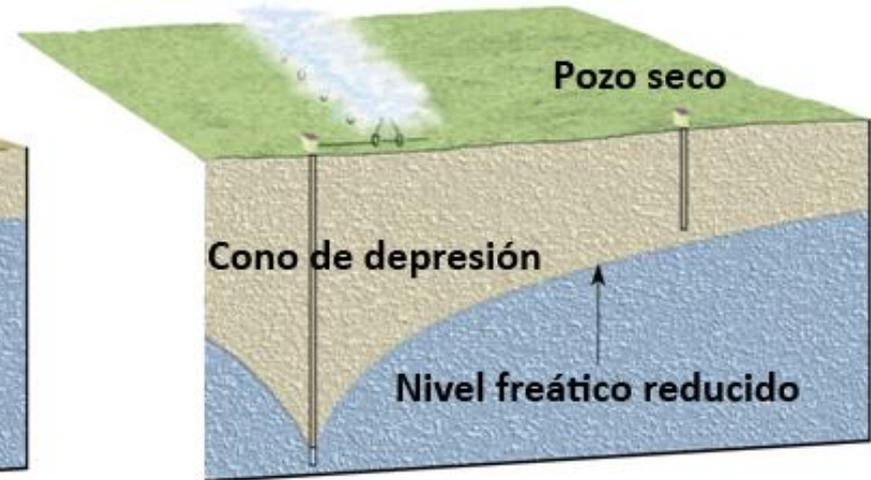
- Descenso del nivel freático.
- Cono de depresión en el nivel freático.

# Cono de depresión en el nivel freático

Antes del bombeo intenso



Antes del bombeo intenso



# Pozos

Pozos artesianos – situación en la cual el agua subterránea bajo presión asciende por encima del nivel freático.

Tipos de pozos artesianos.

- No surgente – la superficie piezométrica está por debajo del nivel del suelo.
- Surgente – la superficie piezométrica está por encima del terreno.

No todos los sistemas artesianos son pozos, también existen los manantiales artesianos.

# Problemas relacionados con la extracción del agua subterránea

Tratamiento del agua subterránea como un recurso no renovable.

- En muchos lugares el agua disponible para recargar los acuíferos se queda significativamente corta con respecto a la cantidad que se extrae.

Subsidencia.

- El terreno se hunde cuando el agua se bombea desde los pozos más rápidamente de lo que pueden remplazarla los procesos de recarga natural (valle de San Joaquín, en California; Ciudad de México; Camargo, Cantabria).

# Problemas relacionados con la extracción del agua subterránea

## Contaminación salina.

- La excesiva extracción de agua dulce causa la elevación de agua salada hacia los pozos contaminando así el suministro de agua dulce (intrusión de la cuña salina).
- Es un problema muy importante en las zonas costeras.

# Contaminación del agua subterránea

Un origen común de la contaminación son las aguas fecales.

- Los acuíferos extremadamente permeables, como la grava gruesa, tienen porosidades tan grandes que el agua subterránea puede recorrer grandes distancias sin ser purificada.
- Las aguas fecales suelen purificarse cuando pasan por un acuífero compuesto por arena o arenisca permeable unas docenas de metros.

# Contaminación del agua subterránea

- La perforación de un pozo puede inducir problemas de contaminación del agua subterránea.
- Estas sustancias son también fuentes y tipos de contaminación:
  - Sal de carretera.
  - Fertilizantes.
  - Pesticidas.
  - Purines.
  - Productos químicos y materiales industriales.

# El carst. Procesos y formas kársticas

- El término carst es la castellanización del vocablo alemán karts, transliteración del topónimo krass que designa a una región esloveno-croata.
- Se aplicó primero para designar a formas o fisonomías terrestres desarrolladas en materiales carbonatados (calizas y dolomías), pero después se extendió a formas similares desarrolladas sobre otras litologías tales como sulfatos (yeso, anhidrita, etc), haluros (halita, silvina), rocas sedimentarias detríticas con cemento carbonatado o sulfatado (areniscas y conglomerados calcáreos) y a rocas metamórficas carbonáticas (mármol).
- Se usa el término pseudocarst para designar formas similares desarrolladas en rocas muy distintas de las antes citadas, como los conductos lávicos en rocas volcánicas, o el glaciocarst en el hielo glaciar, el termocarst o criocarst en zonas de permafrost.

# La carstificación

## Conjunto de procesos que desarrollan modelados cársticos

- En las sales (yeso, halita o anhidrita) el proceso consiste en una simple disolución por medio del agua, pero en las rocas carbonatadas (calizas, dolomías y mármoles) el proceso es más complejo.
- En las calizas y dolomías el agua acidificada por el CO<sub>2</sub> atmosférico o por ácidos húmicos origina las siguientes reacciones químicas:



- Estas reacciones son tanto más efectivas cuanto mayor es la agresividad y movilidad del agua.
- El progreso de la disolución en profundidad tiene lugar mediante percolación del agua agresiva a través de discontinuidades en la roca (diaclasas, fracturas y planos de estratificación).
- Estas reacciones son reversibles, por lo que a la disolución le puede suceder la precipitación como consecuencia de la evaporación del agua o disminución del CO<sub>2</sub> disuelto.

# Karstificación de la caliza (Ciudad Encantada, Cuenca)



# Formas kársticas

Las formas desarrolladas por los procesos de disolución/precipitación se pueden clasificar, según sean superficiales o subterráneas en:

- Formas exocársticas (superficiales).
- Formas endocársticas (subterráneas).

A su vez, cada forma endo o exocárstica puede ser de:

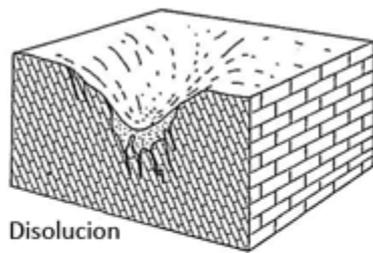
- Precipitación o acumulación (constructivas).
- Erosión o denudación (destructivas).

# Cuadro 13.4//pp. 333 Pedraza (1996)

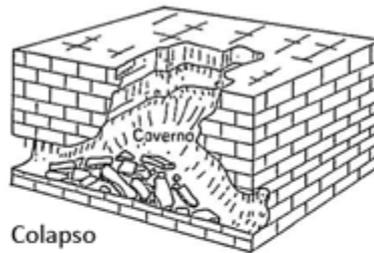
FORMAS ENDOCÁRSICAS (2)	DESTRUCTIVAS		<p><b>Cavernas o galerías</b></p> <p>Figuras 13.16 y 13.17</p> <p>Conductos subterráneos originados por aguas de percolación mediante el ensanchamiento de discontinuidades: diaclasas, planos de estratificación, cambios de porosidad, etc. Su profundidad, longitud, trazado en planta y sección, es muy variable; en general con dimensiones deca, hecto o kilométricas y pueden llegar a alcanzar centenares de ellos.</p> <p>En su evolución se mezclan procesos de colapso o hundimiento, con disolución; éstos dan formas características según circule el agua a presión (<b>tubos freáticos</b>) o no (<b>pasajes vadosos</b> de encajamiento o invasión) y pueden ser laminares (forma alargada), elípticos o circulares. Suelen presentar elementos menores subsidiarios, como son: microconductos múltiples (<i>sponge work</i>); microcavidades anexas y cúpulas de disolución (<i>pockets</i>); cavidades o salientes de dimensión milimétrica, centimétrica o decimétrica, en muros o techos; rizaduras o huellas de corriente (<i>scallops</i> o golpes de gubia, y <i>pendants</i>); etc. A medida que desciende el nivel freático por encajamiento del nivel de base regional, los conductos van quedando abandonados o «colgados», mientras se forman otros nuevos en «pisos» o niveles más profundos.</p> <p>Morfologías convergentes existen en el «pseudocarst», siendo características las cavidades volcánicas, bien singenéticas (tubos lávicos y embudos) o bien epigenéticas (en acantilados).</p>
	CONSTRUCTIVAS	DE PRECIPITACIÓN	<p><b>Espeleotemas</b></p> <p>Figura 13.18</p> <p>Constituyen todo un conjunto de depósitos debidos a la precipitación de material carbonático (fundamentalmente calcita y aragonito), sulfatado (yeso, epsomita), o clorurado (halita, silvina, etc.). Aisladamente pueden estar formados por otros cientos de minerales (ópalo, malaquita, vivianita, etc.).</p> <p>En función de su morfología y origen se clasifican en: cenitales o del techo, fundamentalmente <b>estalactitas</b> (cónicas, aplanadas, excéntricas, etc.); parietales o de pared, que son cortezas o costras, coladas, cortinas, banderas, etc.; pavimentarias o de suelo, como <b>estalagmitas</b>, costras, coladas, <i>gours</i>, perlas, antiestalagmitas, etc.; y mixtas, como las <b>columnas</b>.</p>
		DE DEPOSICIÓN	<p><b>Rellenos de conductos</b></p> <p>Materiales que ocupan el lecho de conductos, originados mediante aportes mecánicos (corrientes fluviales en régimen freático-vadoso, coladas de barro, desprendimientos y colapsos), o acumulaciones debidas a restos orgánicos (excrementos animales o restos vegetales). Algunos son autóctonos (residuos de decalcificación, bloques de colapsos, esquirlas de gelifracción, etc.) y otros alóctonos (introducidos por corrientes de agua exteriores o por animales).</p>

# Formas superficiales

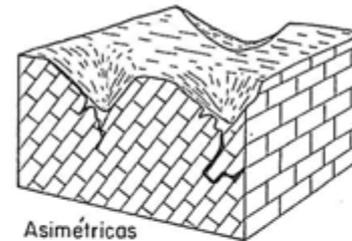
Las más comunes son las dolinas. Fig. 13.13//pp. 331 Pedraza (1996)



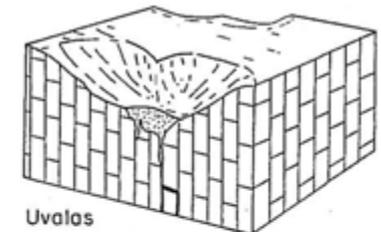
Disolución



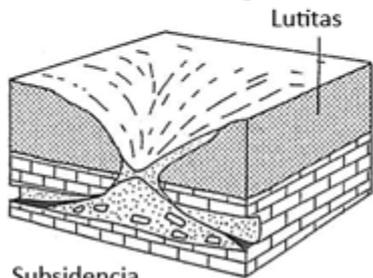
Colapso



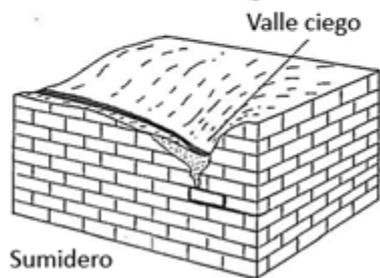
Asimétricas



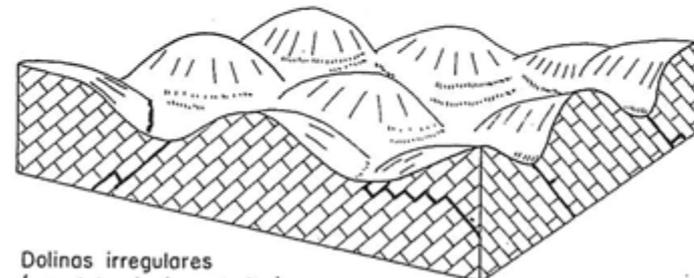
Uvalas



Subsistencia



Sumidero



Dolinas irregulares  
(carst tropical ,cockpits)

# **Dolinas alineadas según un contacto litológico (Cabo Mayor, Cantabria)**

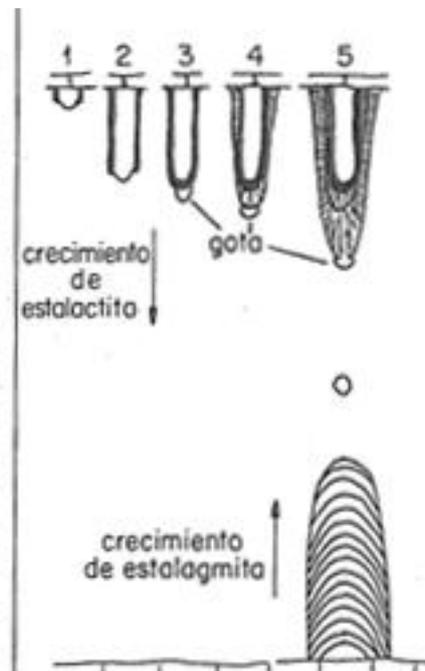
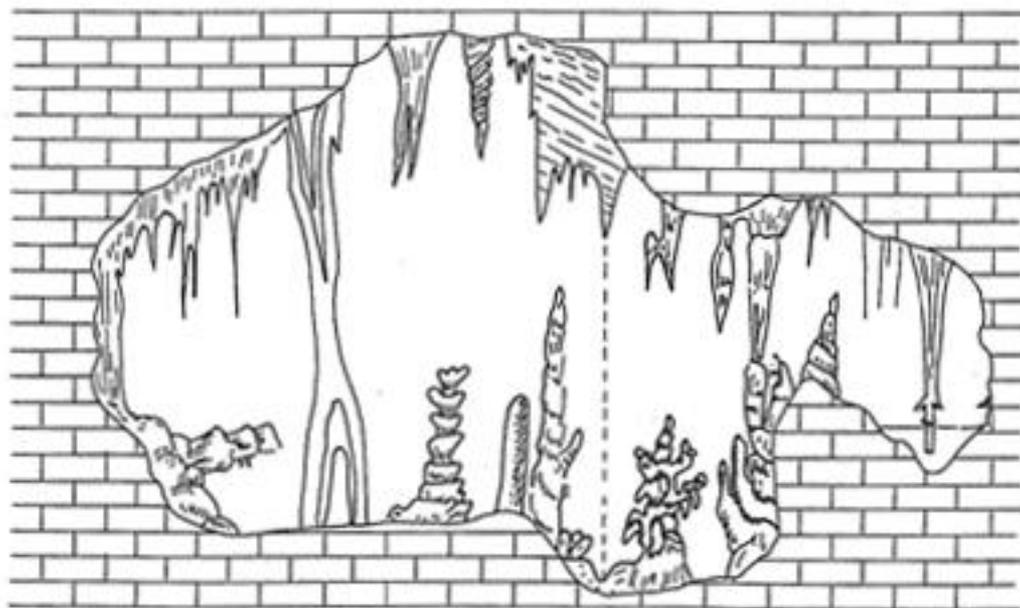


# Formas subterráneas

Las formas subterráneas más comunes son:

- Conductos y cavernas.
- Formas de precipitación (denominadas espeleotemas).

Fig. 13.18//pp. 335 Pedraza (1996).



# Conducto kárstico relleno (Cantabria)



# Relleno de una cavidad kárstica (yacimiento de homínidos de Atapuerca)



# Conducto kárstico erosionado por la acción marina (Puente del Diablo, Cabo Mayor, Cantabria)



# El funcionamiento hidrológico del carst

En relación con el funcionamiento hidrológico del carst, se distinguen las siguientes zonas:

- Zona vadosa o de aireación. Los conductos están llenos de aire, salvo en momentos de fuertes lluvias en superficie.
- Zona de fluctuación o epifreática. En ocasiones funciona como vadosa y otras veces está saturada en agua.
- Zona freática. Con cavidades rellenas de agua permanentemente y carstificación profunda.
- Zona freática profunda. Es una subzona de la anterior.

# El trabajo geológico del agua subterránea

## Cavernas.

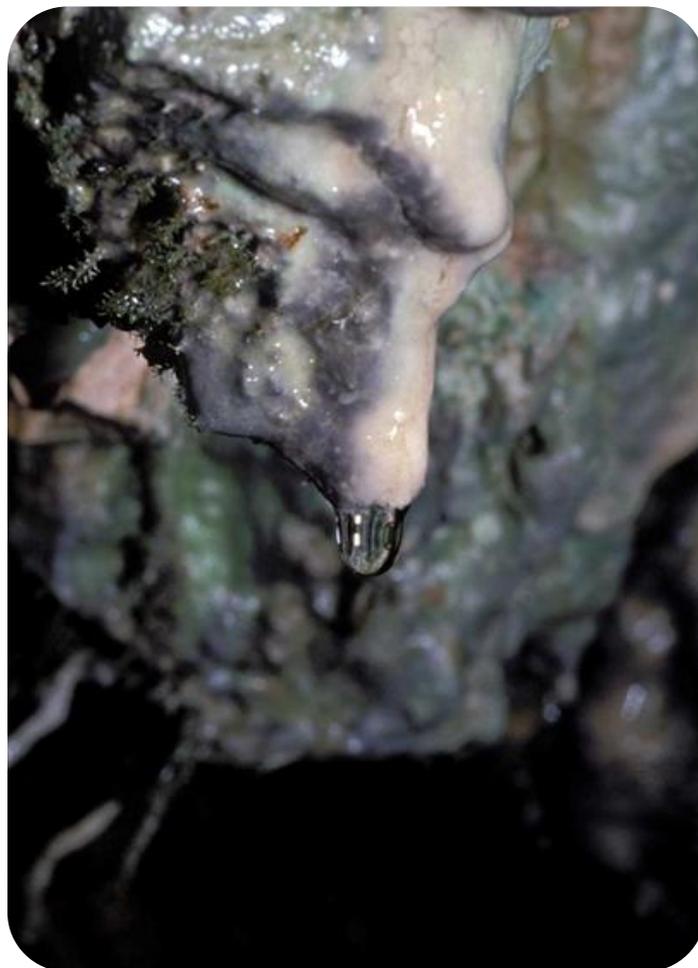
- La mayoría de las cavernas se crean por el ácido del agua subterránea que disuelve la roca soluble justo por debajo de la superficie en la zona de saturación.

# El trabajo geológico del agua subterránea

Las características de las cavernas.

- Se forman en la zona de aireación.
- Compuestas por formaciones pétreas (travertino).
  - La calcita depositada por goteo del agua se evapora.
  - Se denominan colectivamente espeleotemas.
  - Son las estalactitas (que cuelgan del techo) y estalagmitas (que se forman en el suelo de las cavernas).

# El proceso de formación de las estalactitas



**Excéntricas de aragonito,  $\text{CaCO}_3$**   
**(aragonito = polimorfo de la calcita, igual composición química, distinta estructura cristalina)**



# Karst en yesos ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )



# El trabajo geológico del agua subterránea

## Topografía kárstica.

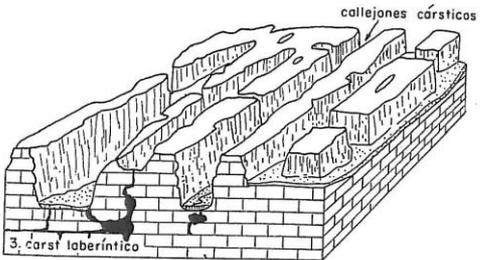
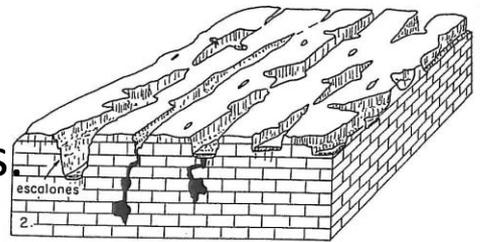
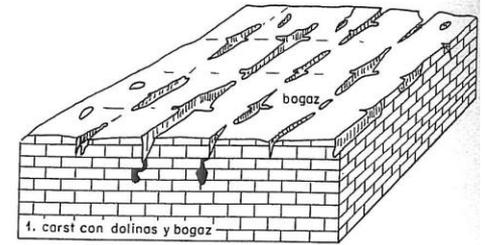
- Paisajes que se han formado por la capacidad disolvente del agua subterránea.
- Algunas de las características son:
  - Terreno irregular
  - Dolinas o depresiones (formadas por el agua subterránea que disuelve lentamente la roca a menudo acompañada del hundimiento)
  - Falta notable de drenaje superficial (escorrentía)

# El paisaje kárstico

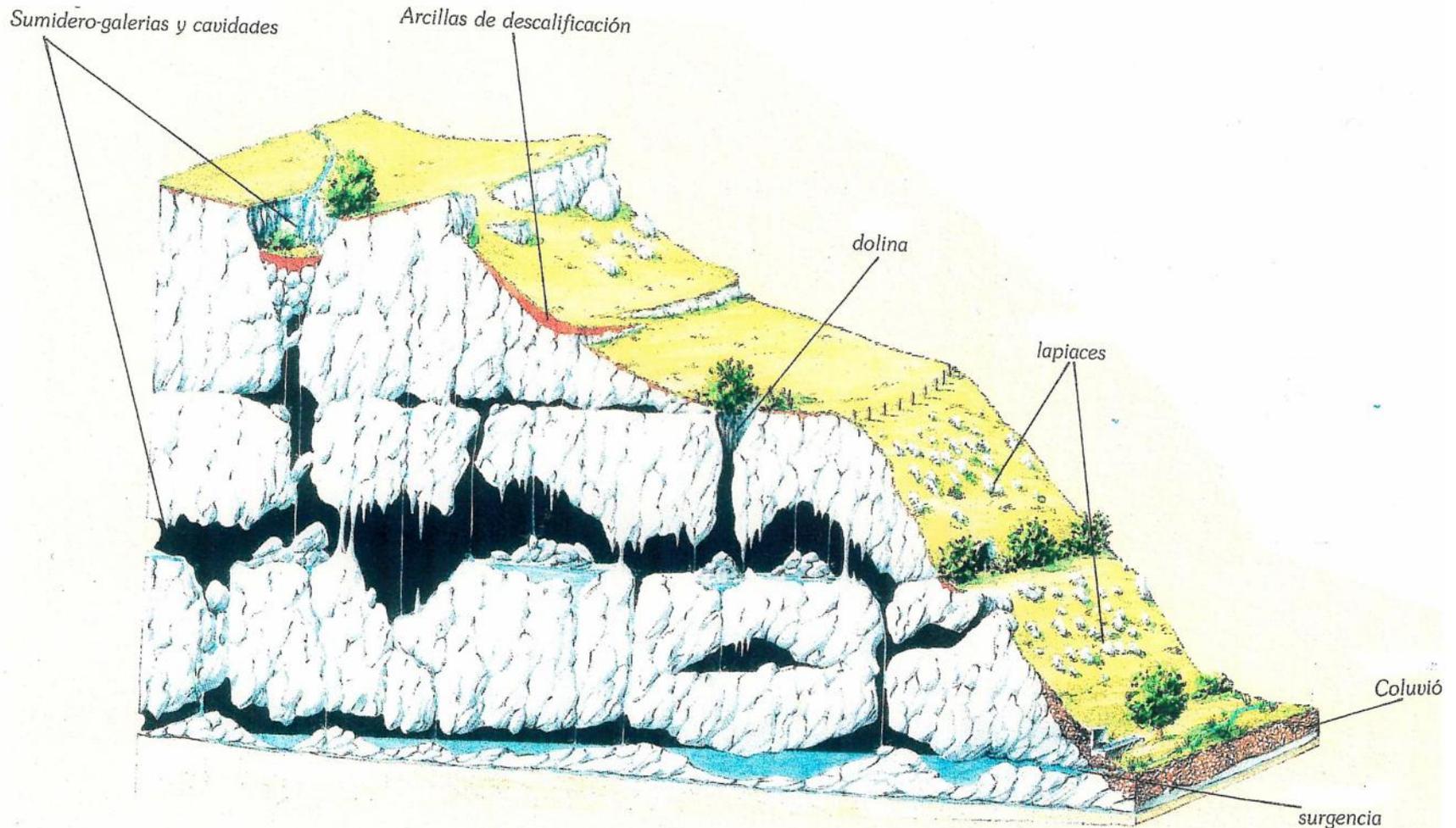
En una primera fase el agua percola por las discontinuidades y se crean en profundidad grutas

En una fase posterior aparece el carst maduro originando llanuras salpicadas de relieves residuales.

Fig. 13.15//pp. 334 Pedraza (1996)



# Corte esquemático de un sistema cárstico



# Surgencia kárstica en calizas jurásicas (Fuentona de Ruento, Cantabria)



# Lapiaz en calizas urgonianas (Punta del Dichoso, Suances, Cantabria)



# Karst de torres, calizas y dolomías urgonianas, (Cabárceno, Cantabria)



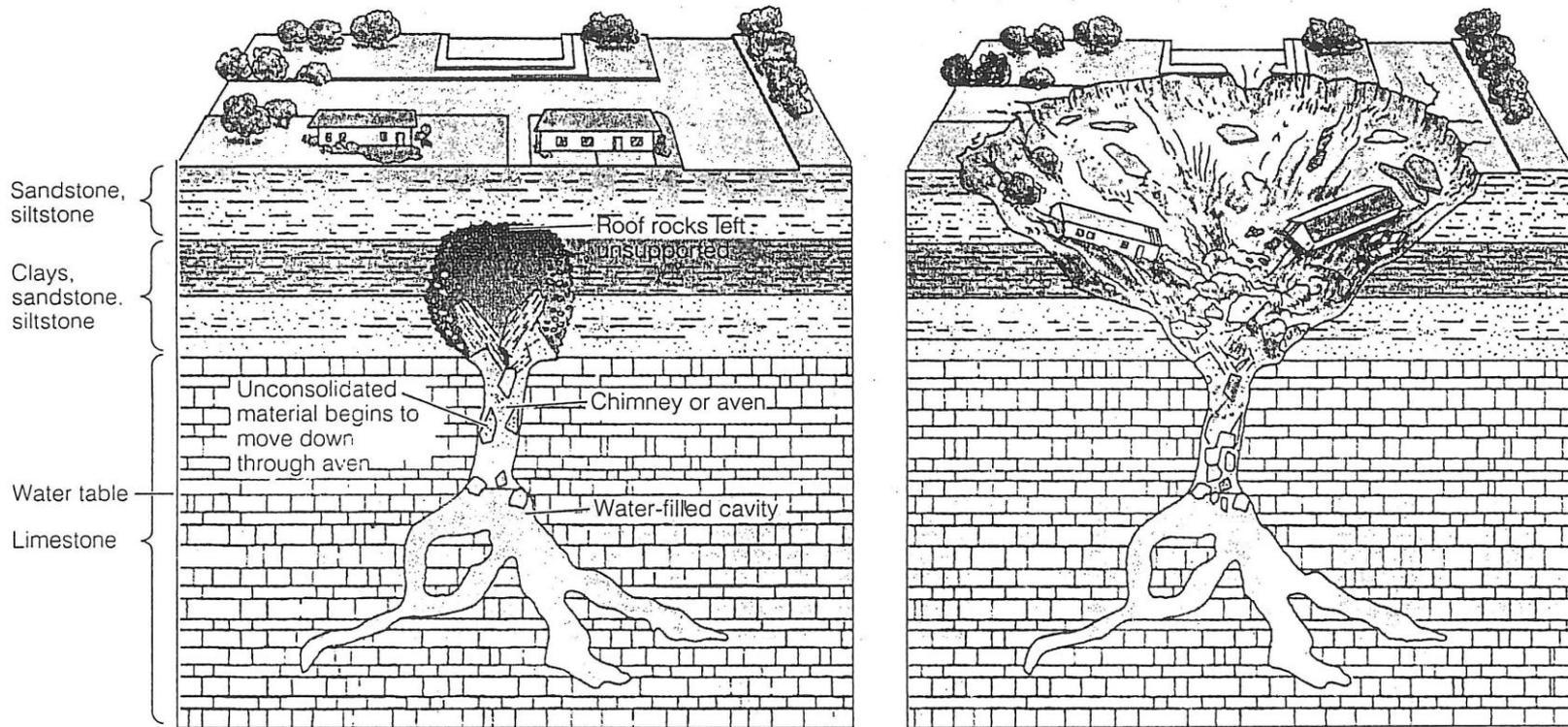
# Detalle del karst en torres de Cabárceno (Cantabria)



# Problemas del carst: hundimiento de dolinas (Winter Park, Florida, 1981)



# Esquema geológico del hundimiento del Winter Park



# Problemática ingenieril

El estudio hidrológico de las inundaciones.

- Causas de las inundaciones: físicas y antrópicas
- Control de las características de las inundaciones
- Tiempos característicos de una inundación: el hidrograma y el hietograma.
- Tipos de cuencas y tipos de hidrogramas característicos.
- La determinación del tiempo crítico de concentración de una inundación y del periodo de retorno de la misma.
- Establecimiento de las relaciones entre el caudal máximo y el periodo de retorno de una inundación.

### El control de las inundaciones.

- Medidas estructurales y no estructurales.
- Efectos de las urbanizaciones en la llanura aluvial
- El diseño anti-inundación
- Delimitación legal del valle en función del periodo de retorno y de la frecuencia de la inundación.
- Legislación sobre zonas inundables.

### Problemas derivados de la extracción del agua subterránea.

- Subsistencia
- Contaminación salina
  
- + Contaminación del agua subterránea.
- - Área de recarga y perímetro de protección.

### Problemática geotécnica del karst.

- Colapso de bóvedas y cavidades (subsistencia y hundimientos)
- Generación de nuevas dolinas (el caso del AVE en el aluvial del Ebro)
- Asientos diferenciales

### Problemática hidrogeológica del karst

- Inundaciones de depresiones cerradas
- Contaminación de acuíferos kársticos
- La karstificación y la construcción de embalses (fugas en presas)
- El karst y la minería (inundaciones en las minas)