

KARSTICIDAD

Soluciones estructurales y medidas de
remediación



SEGURIDAD

SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



CNPC

COORDINACIÓN NACIONAL
DE PROTECCIÓN CIVIL



CENAPRED

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN
DE DESASTRES



2023
AÑO DE
**Francisco
VILA**

EL REVOLUCIONARIO DEL PUERLO



CENAPRED

KARSTICIDAD

**Soluciones estructurales y medidas
de remediación**

**Juan José Gómez García
Oscar López Bátiz**

28 DE JUNIO DE 2023

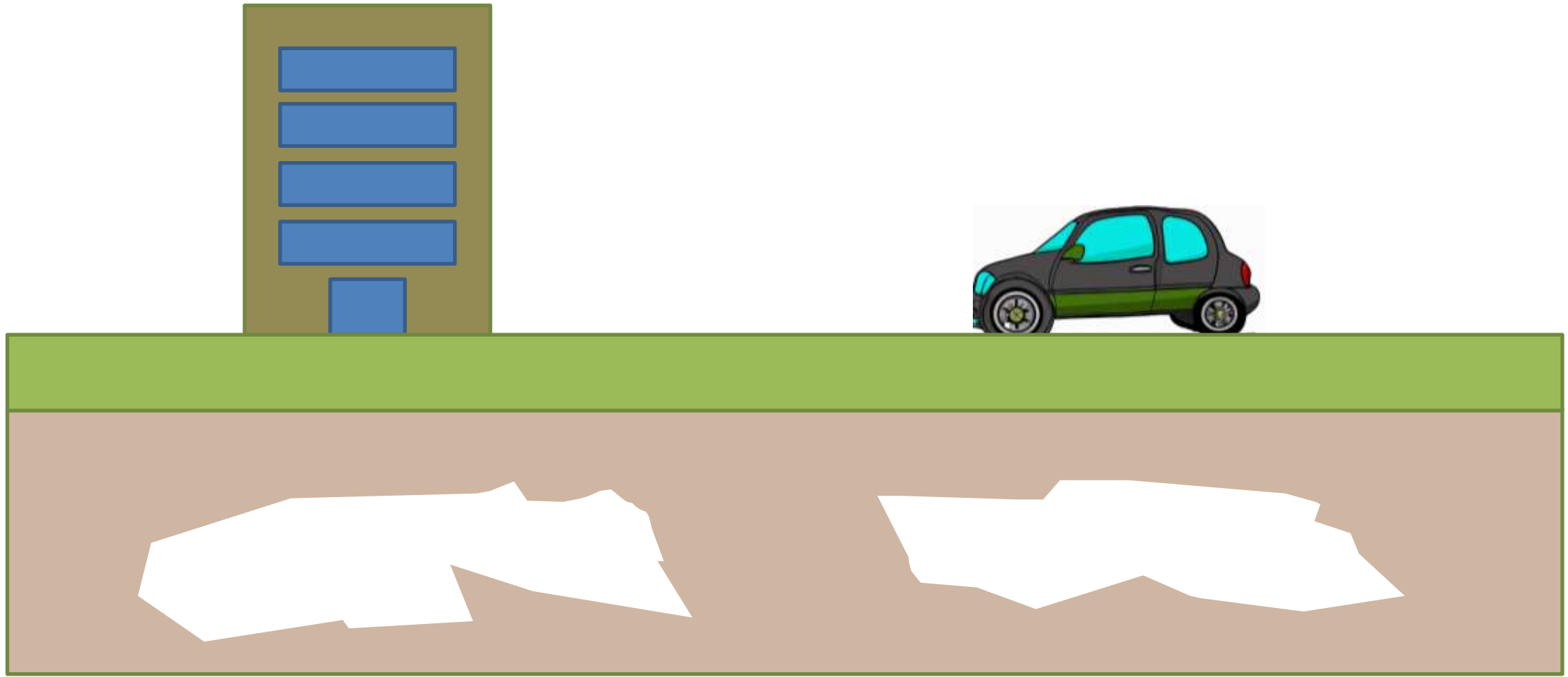
¿Qué es la karsticidad?

La karsticidad es un **proceso geológico** en el cual el agua disuelve lentamente la roca soluble, creando un paisaje cárstico caracterizado por **cuevas, sumideros, ríos subterráneos y dolinas.**

La palabra "karst" proviene de una región en Eslovenia llamada Kras, donde se encuentran algunas de las formas más destacadas de paisajes cársticos.

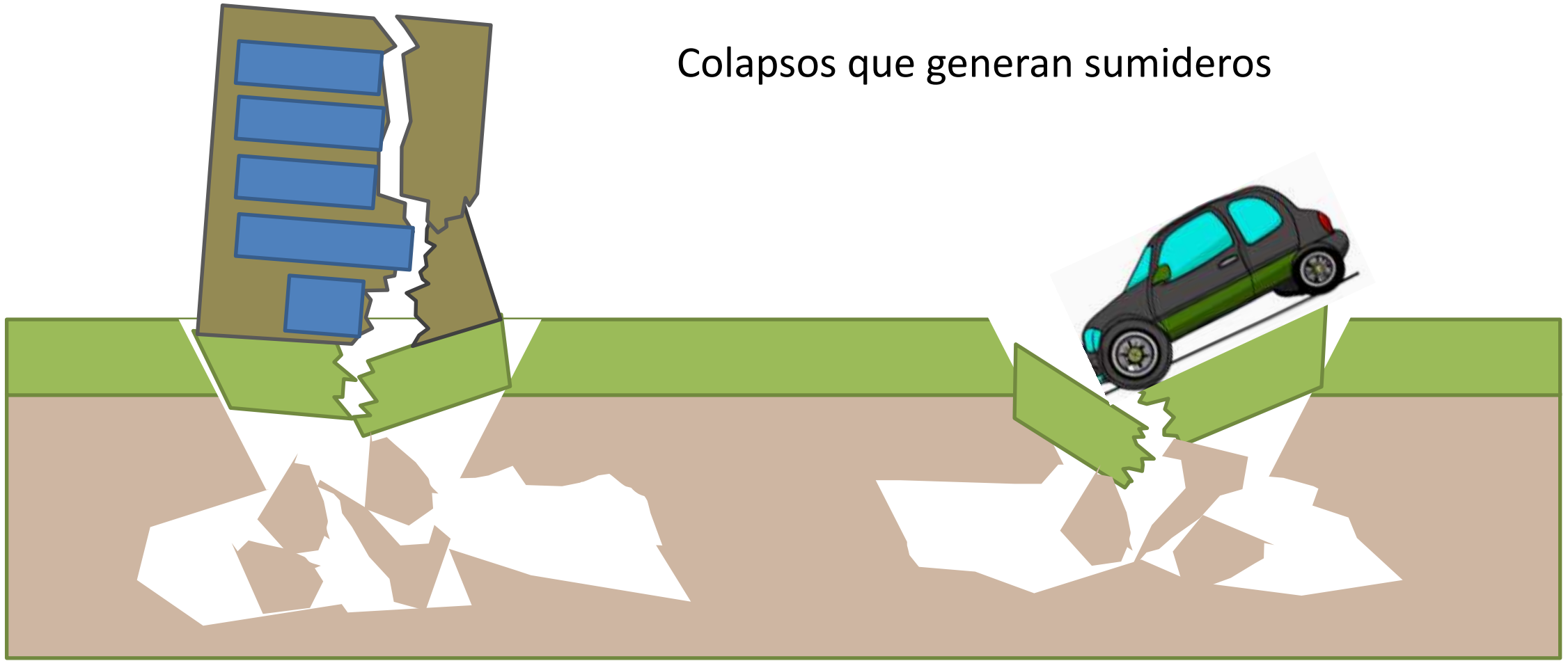


¿Qué amenazas a las estructuras genera?

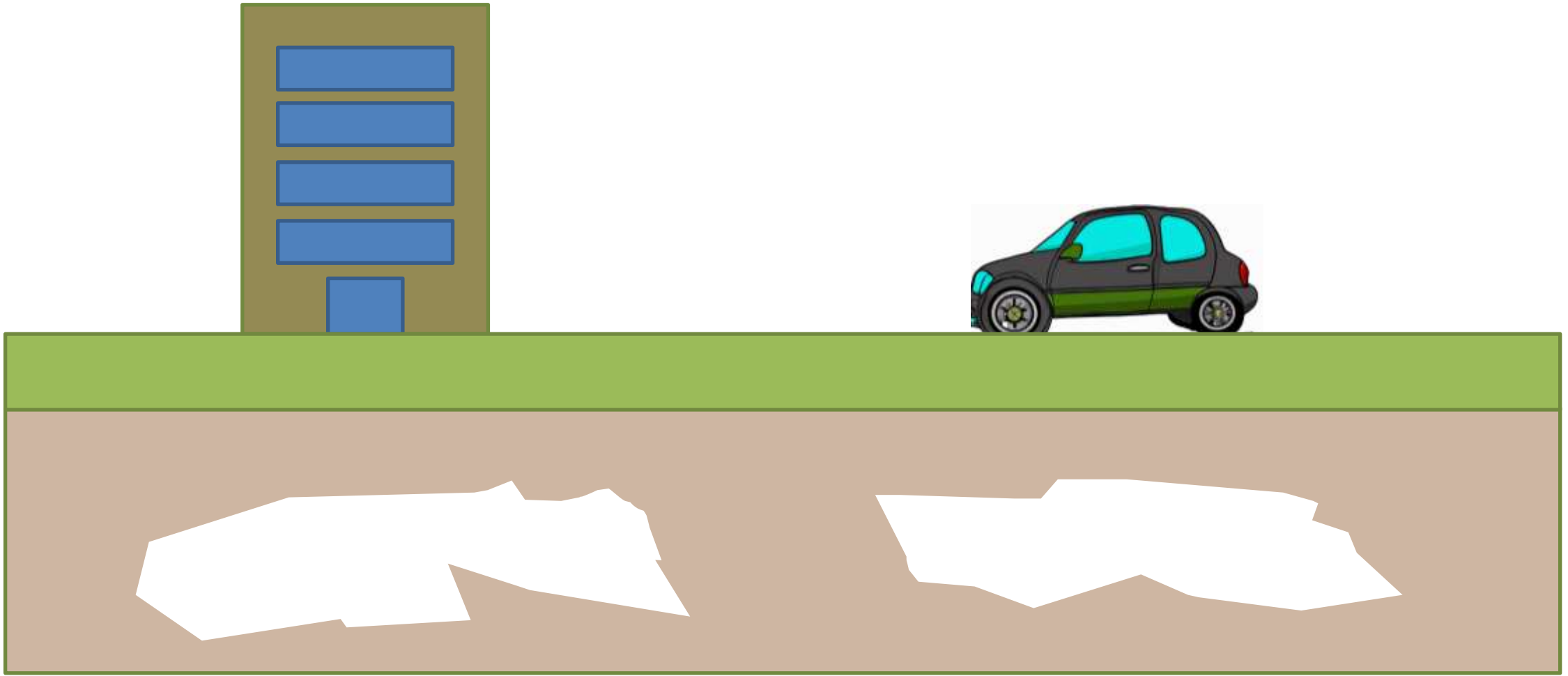


¿Qué amenazas a las estructuras genera?

Colapsos que generan sumideros



¿Qué amenazas a las estructuras genera?



¿Qué amenazas a las estructuras genera?

Dolinas, que generan deformaciones importantes en los suelos y a su vez, en estructuras



Algunos ejemplos en edificación urbana



Derrumbe de cubierta kárstica ocurrido en **noviembre de 2003** al lado y debajo de un edificio de cinco pisos en la ciudad de **Calatayud, España**. Este único evento condujo a la **demolición del edificio**, con **pérdidas económicas directas** estimadas en **5 millones de euros**.

Algunos ejemplos en edificación urbana

Naves industriales con daño por el hundimiento de una dolina kárstica. Se observa el desplomo en las edificaciones por el hundimiento de pequeñas dolinas.

Fotografías obtenidas del estudio de riesgo de hundimientos kársticos en el corredor de la carretera de Logroño, Plan General de Ordenación Urbana de **Zaragoza**. Mayo 1999, España.



Casa y caminos destruidos por el colapso de un sumidero en **Centurión, Sudáfrica**.

Algunos ejemplos en obra civil



Colapso de cubierta de oquedad cárstica, marzo de 2003.

Afectó a la vía férrea de alta velocidad Madrid–Barcelona en las proximidades de la ciudad de Zaragoza, España.

Algunos ejemplos en obra civil



El canal de riego de Santa Ana, de **concreto no reforzado**, colapsado por un socavón en el valle de Noguera Ribagorzana, **Pirineo español**. Imagen tomada en mayo de 2003 .

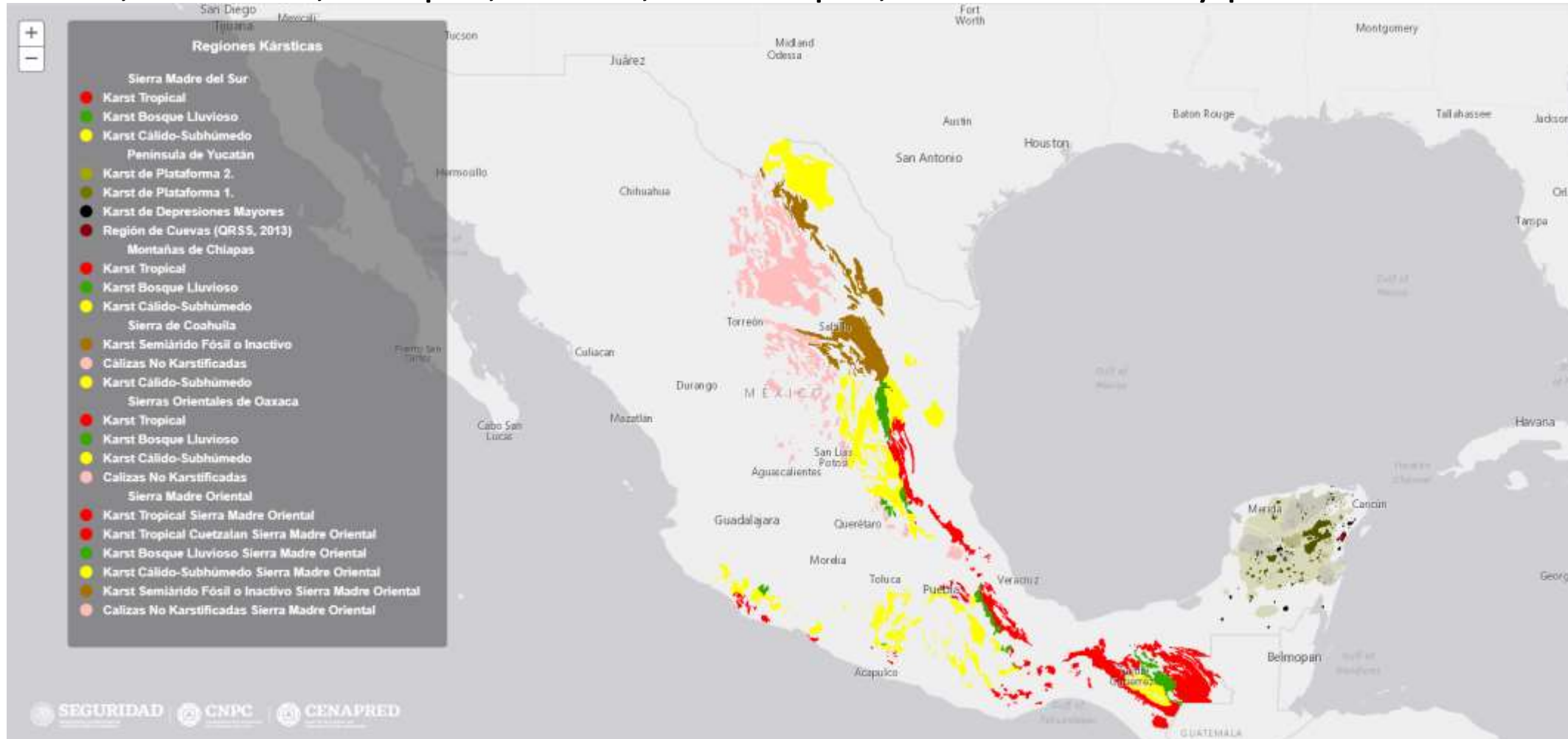
Algunos ejemplos en obra civil



Colapso de un sumidero kárstico en carretera urbana de Bowling Green, Kentucky, Estados Unidos, donde la ciudad entera se encuentra en un plano de sumideros.

¿Cómo saber donde hay karst?

Mas del 90% de Karst en América del Norte se encuentra en México, en los estados de Oaxaca, Guerrero, Chiapas, Puebla, Tamaulipas, San Luis Potosí y península de Yucatán.



¿Qué se ha hecho y qué se puede hacer para evitar desastres en edificación e infraestructura provocados por karsticidad?

- **Estudios geofísicos y geotécnicos**
- Análisis de estabilidad del terreno

- **Reubicación del inmueble o de la ruta**
- Relleno controlado
- Cimentación especializada
- Mejoramiento del terreno
- Refuerzos estructurales

Estudios geotécnicos

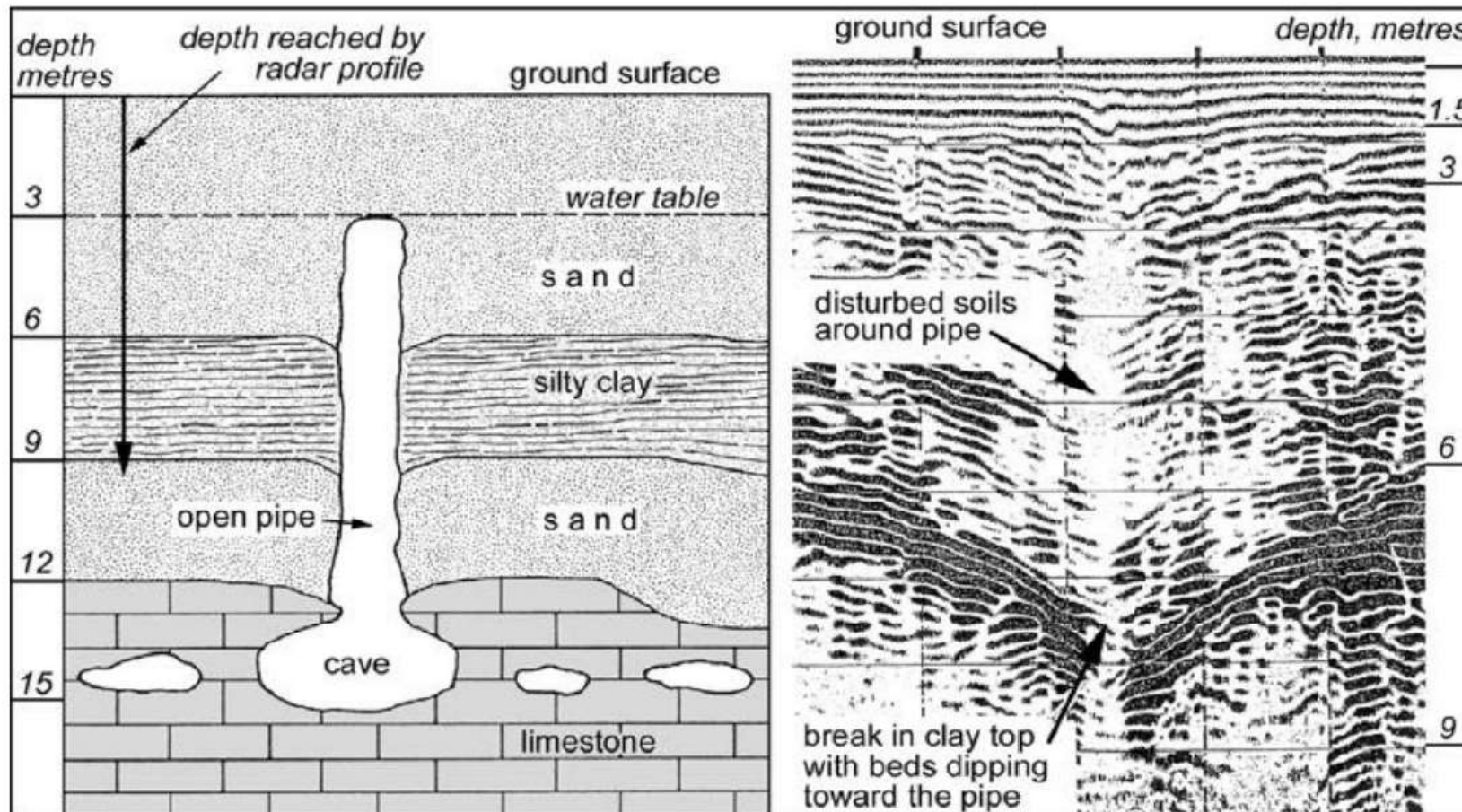
Se deben obtener datos como **ubicación (tridimensional) de cavernas**, las propiedades de los macizos rocosos, su configuración y **condiciones hidrogeológicas**.

Estos son algunos métodos utilizados en la ingeniería geotécnica:

- Resistividad eléctrica
- Conductividad electromagnética (EM)
- GeoRadar (GPR)
- Microgravimetría
- Tomografía Cross-hole

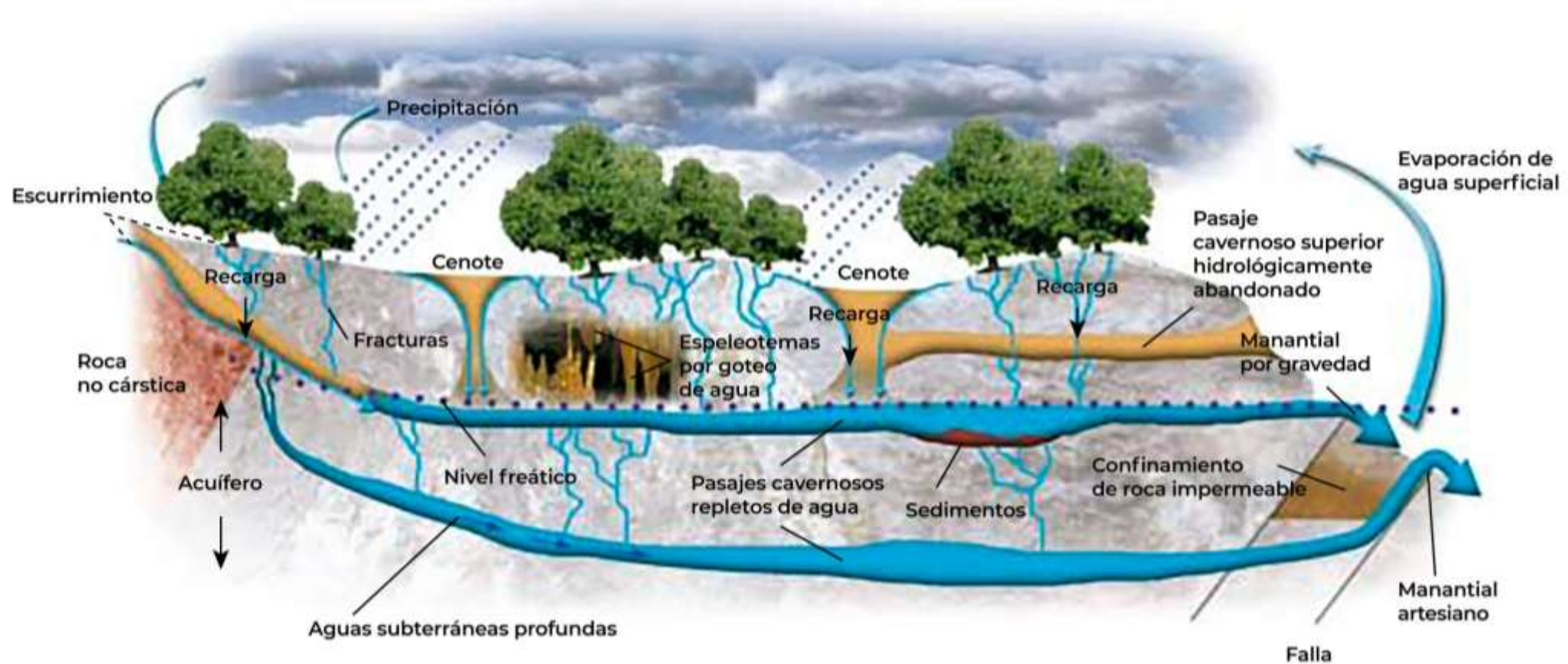
Estudios geotécnicos

Perfil de tuberías naturales y cavernas en suelo de piedra caliza en Carolina del Norte. En el lado izquierdo es el esquema teórico y del lado derecho el perfil obtenido con Geo radar.



Soluciones: Control hidráulico

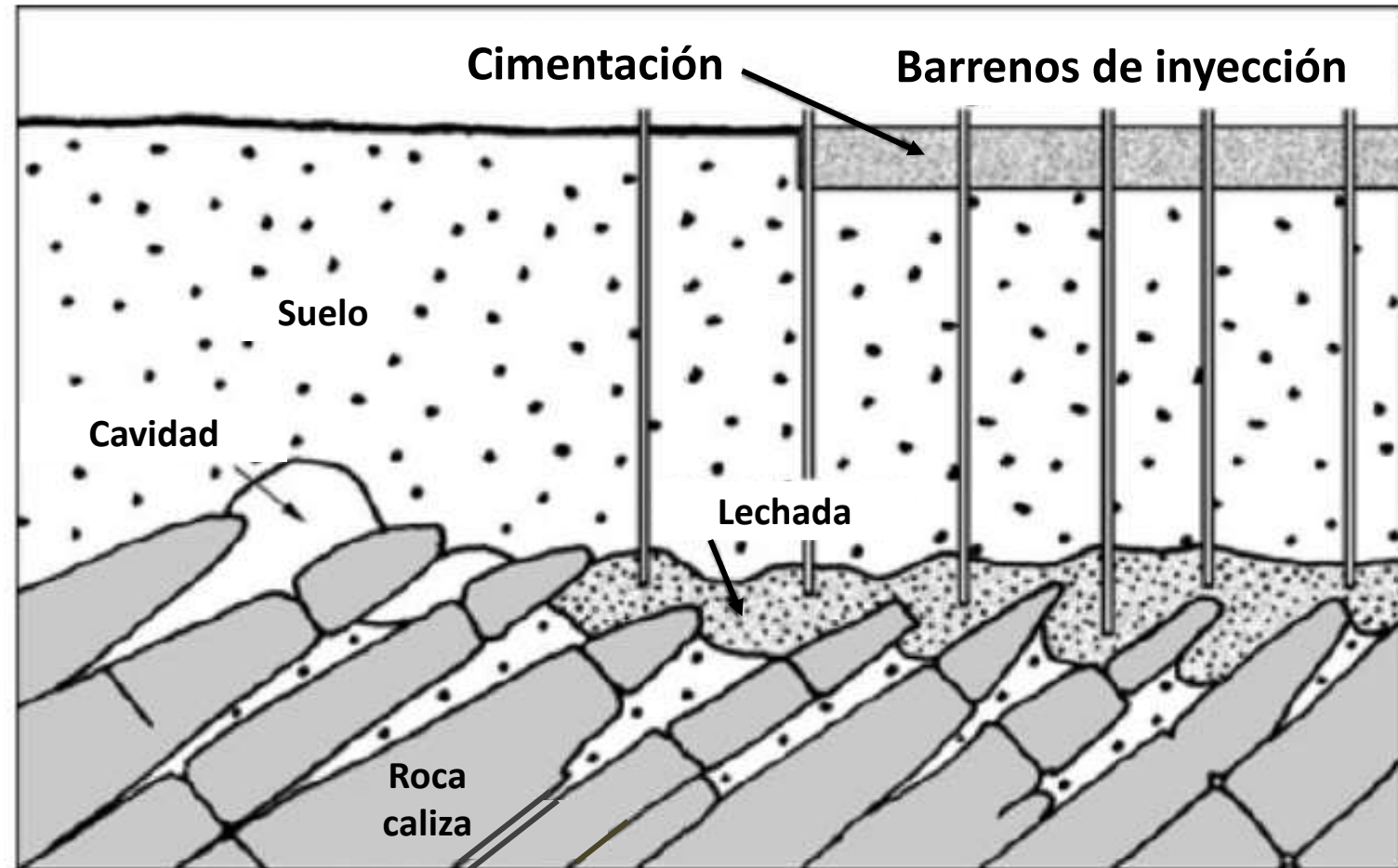
Se requiere controlar el flujo de agua, ya sea natural o antropogénico para **no acelerar la formación de karst**.



Soluciones: Rellenos controlados

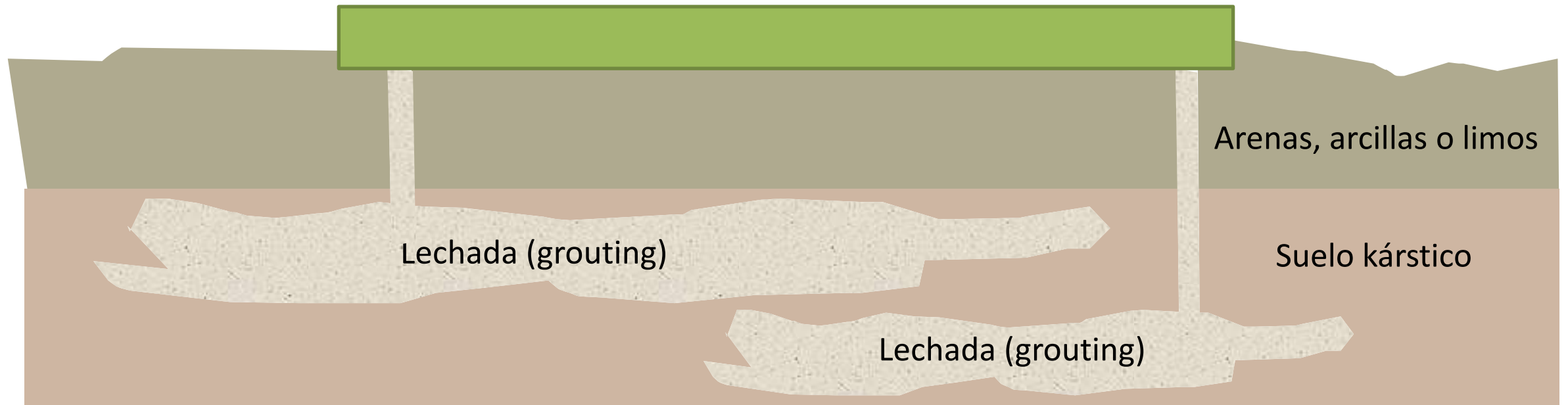
Inyección de compactación

- Consiste en la **inyección** escalonada de una **lechada de baja fluidez** en etapas. Utiliza mezclas de lechada (grout) altamente viscosas, compuestas por cemento, arena, arcilla y cenizas volantes (puzolana).
- Para su implementación es necesario diseñar pozos (barrenos) de inyección con base en **los estudios geotécnicos**.



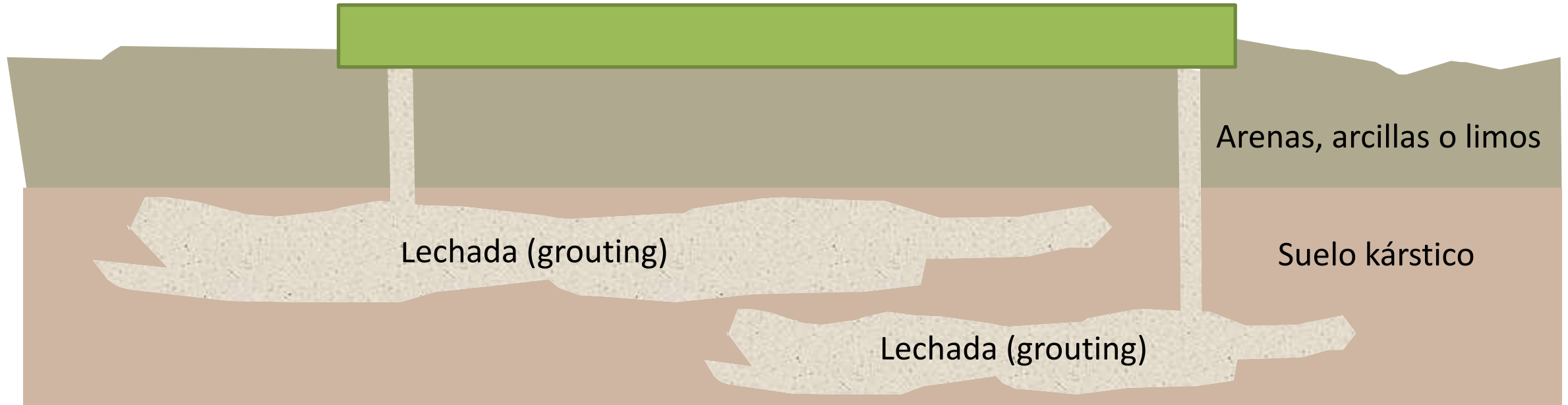
Soluciones: Rellenos controlados

Inyección de compactación



Soluciones: Rellenos controlados

Inyección de compactación

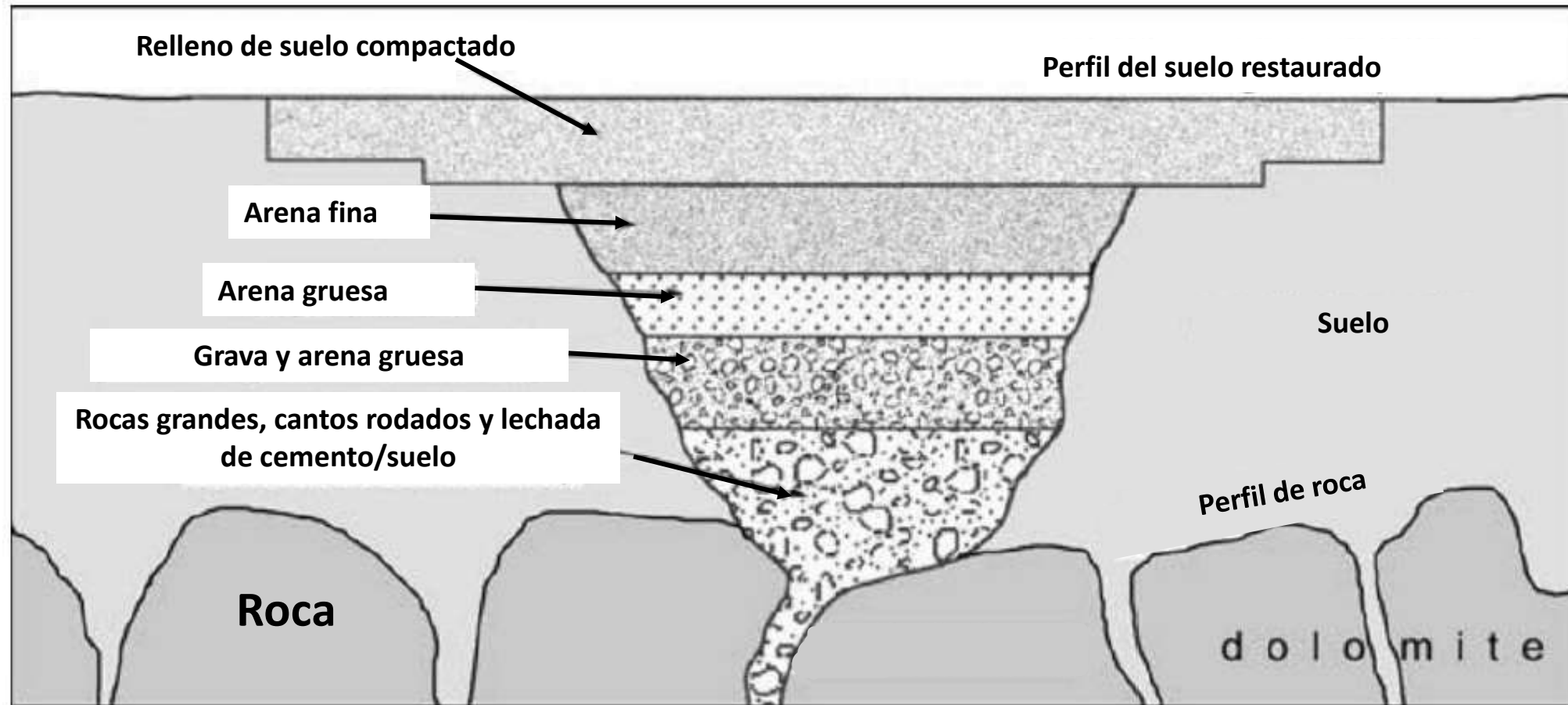


Ventajas: Incrementa la capacidad de carga del suelo debido a que la lechada tiende a expandirse y compactar el suelo circundante.

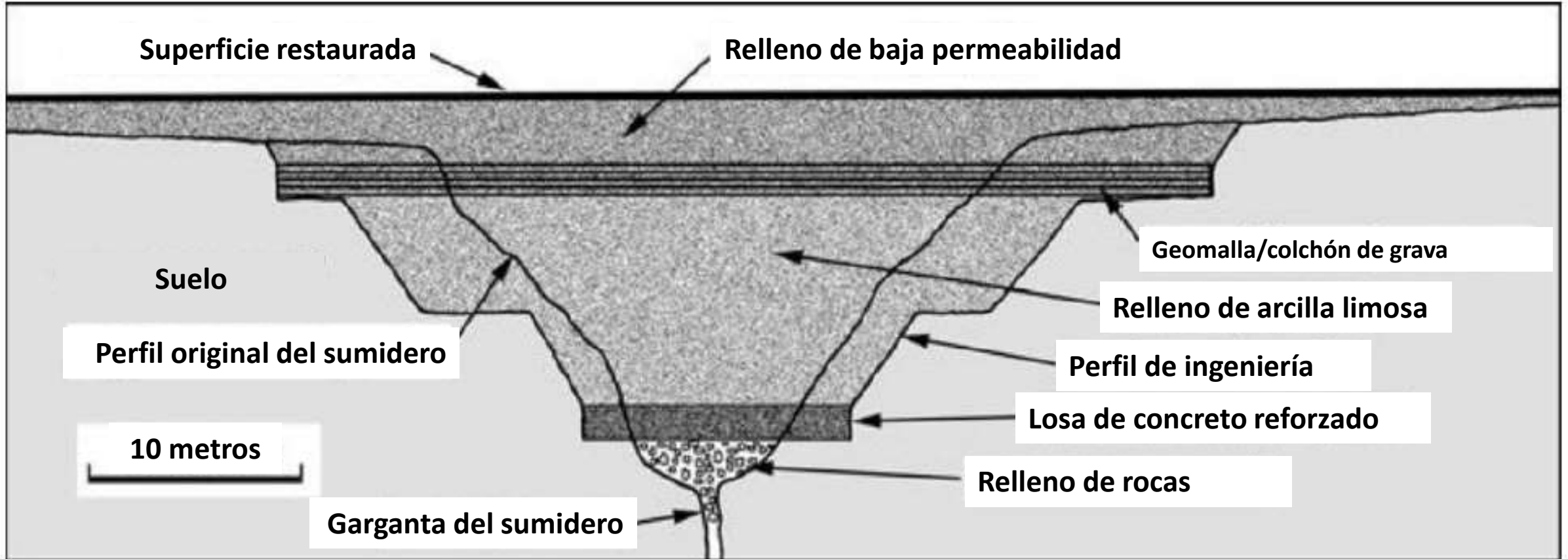
Desventajas: Los volúmenes de relleno pueden llegar a ser elevados

En suelos de material muy soluble (como el yeso) puede acelerar la formación de nuevas cavernas.

Soluciones: Rellenos de sumideros



Soluciones: Rellenos de sumideros

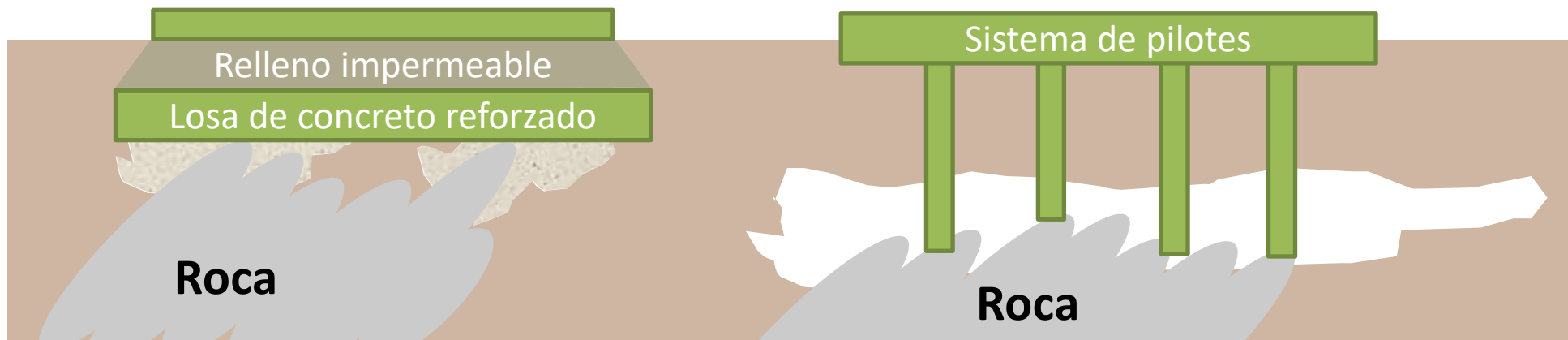


Las ventajas y desventajas de este sistema resultan similares a las mencionadas en el proceso de relleno controlado

Soluciones: Cimentación especializada

La elección del **sistema de cimentación** debe hacerse con base en los **resultados de los estudios de geotecnia**, los **análisis de estabilidad** y los **métodos de mejoramiento del suelo**, pudiendo optar por combinaciones entre ellos, previendo que se puedan **soportar asentamientos diferenciales** en el terreno.

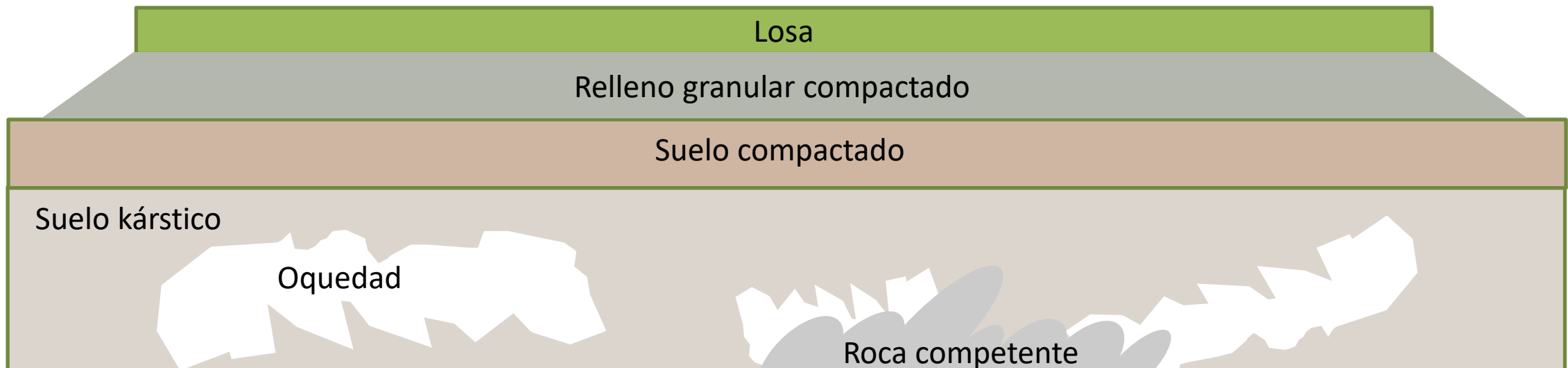
- Losas y cajones de cimentación
- Pilotes



Soluciones: Losa de cimentación

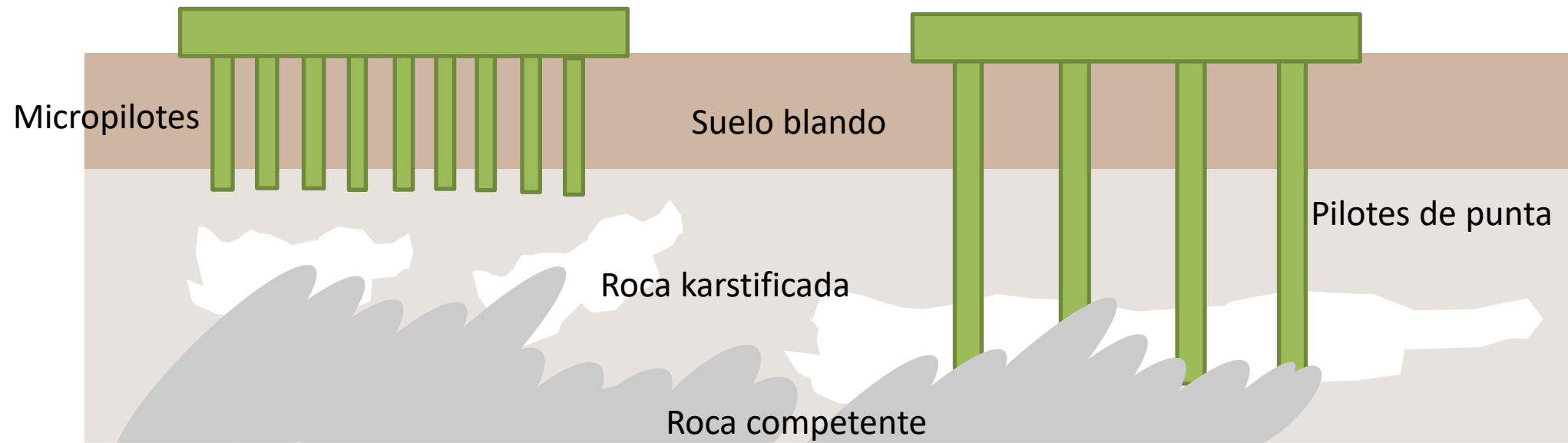
Distribuyen el peso de las edificaciones e infraestructura **en grandes áreas**, lo que **reduce el esfuerzo sobre macizos rocosos karstificados**.

Deben ser diseñadas para soportar asentamientos diferenciales ocasionados por movimiento o colapso de cavernas.



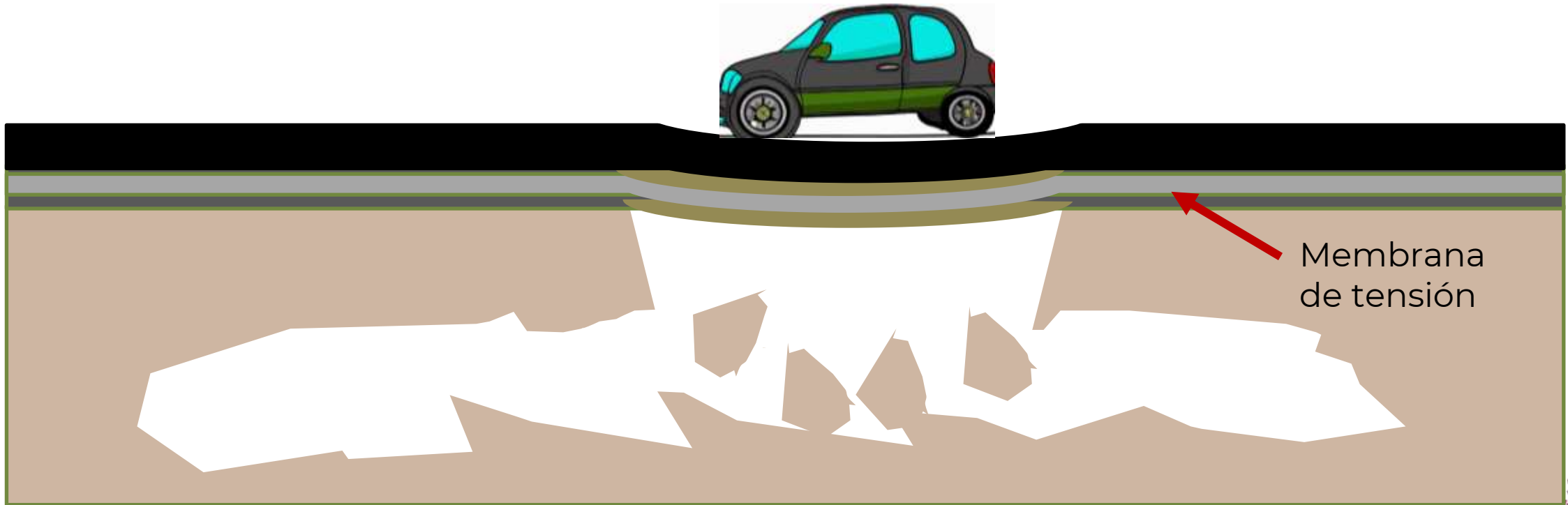
Soluciones: Pilotes

La presencia de huecos en el subsuelo puede conducir a la necesidad de ejecutar una cimentación profunda. El uso de micropilotes, apoya la carga en mayor número de puntos



Soluciones: Refuerzo en carreteras

En el caso de líneas extendidas colocadas sobre la superficie del terreno, una solución es la redundancia. Para carreteras, el uso de un sistema continuo permite una redistribución de esfuerzos al momento de presentarse un problema de colapso de techo. Una propuesta es el **uso de membranas de tensión o geomallas** para proteger carpetas asfálticas o líneas de ferrocarril **contra el hundimiento y el colapso repentino**

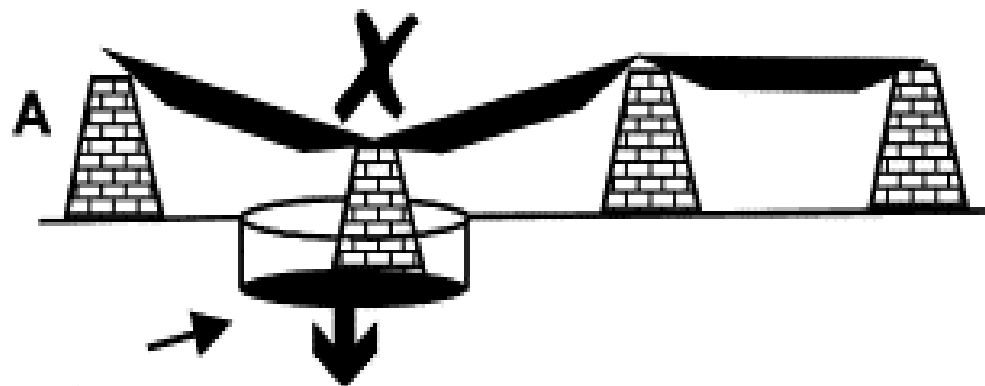


Soluciones: Caso de las vías elevadas

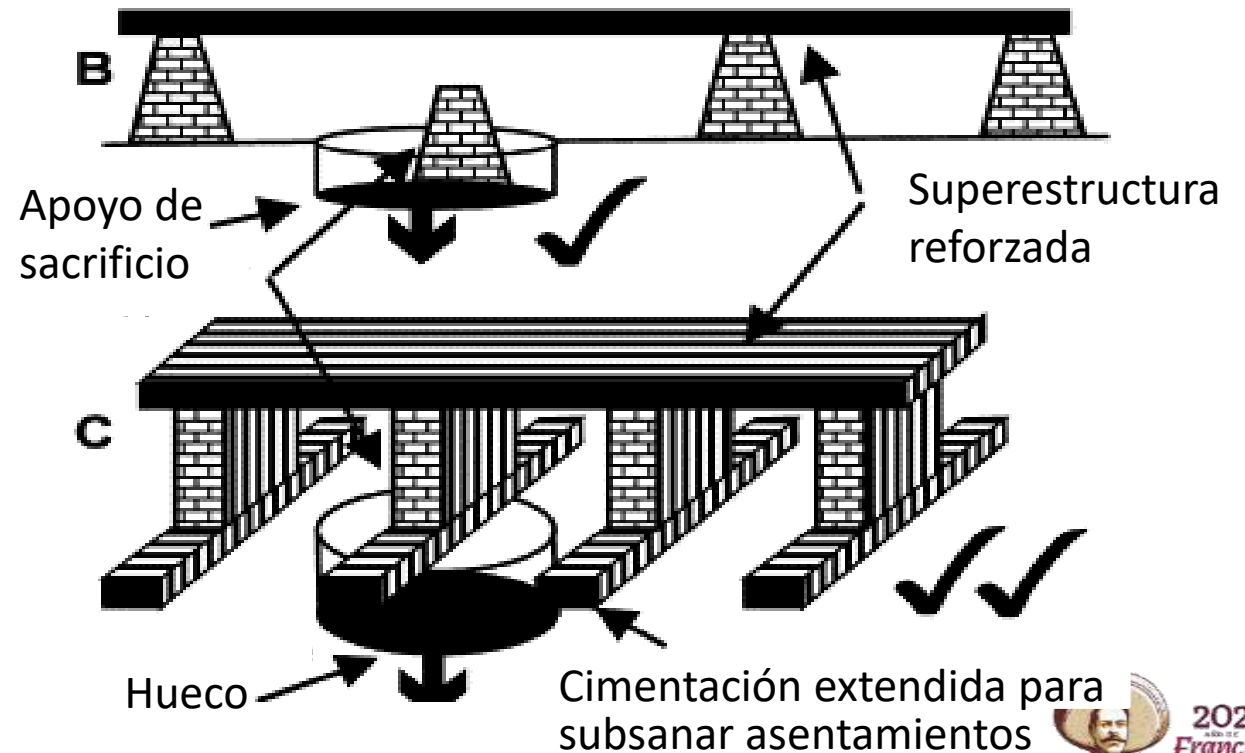
Apoyos de sacrificio

Diseño y construcción de puentes con apoyos de sacrificio.

Diseño de puente con la superestructura capaz de soportar la pérdida de un apoyo sin colapsar.

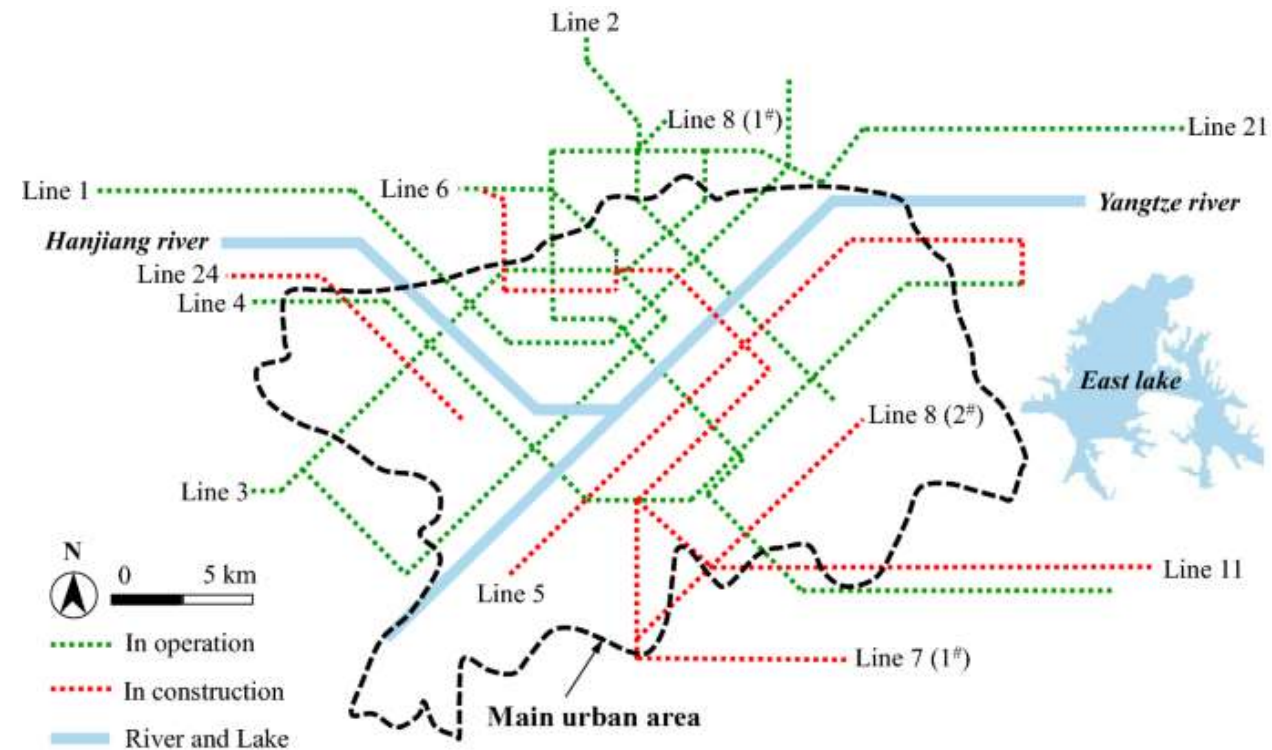
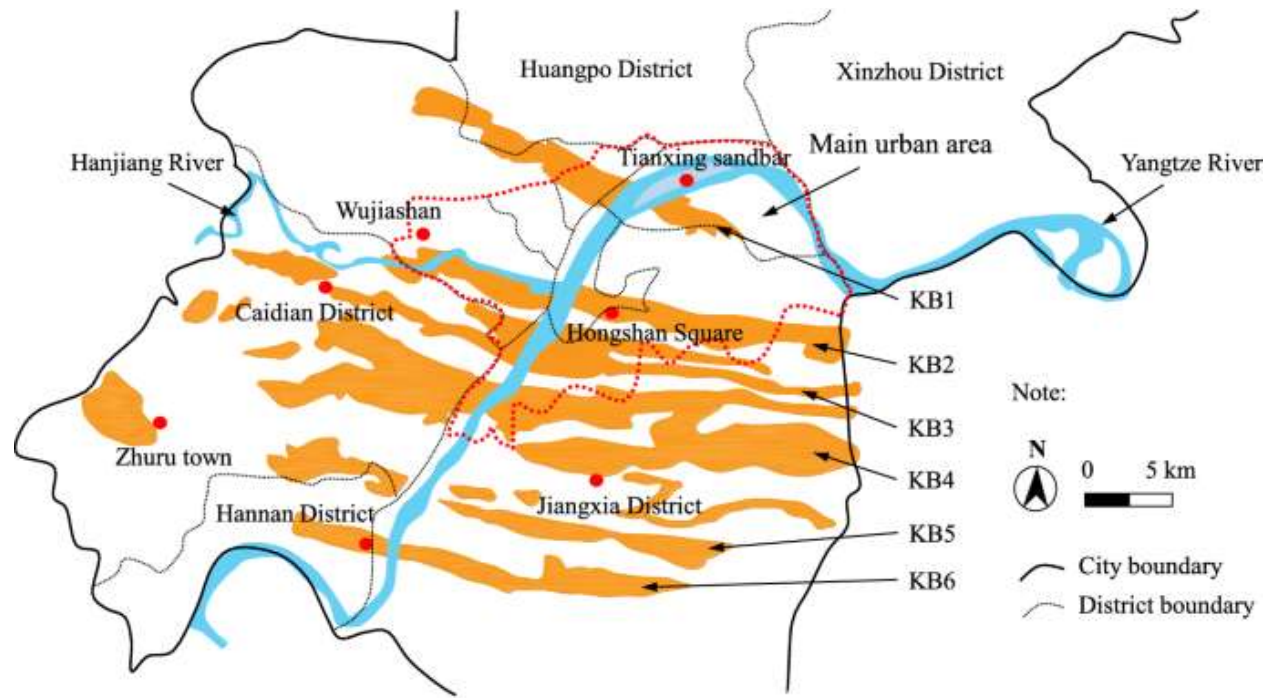


Depresión por hundimiento



Algunos ejemplos

Metro de Wuhan, China



Algunos ejemplos

Metro de Wuhan, China

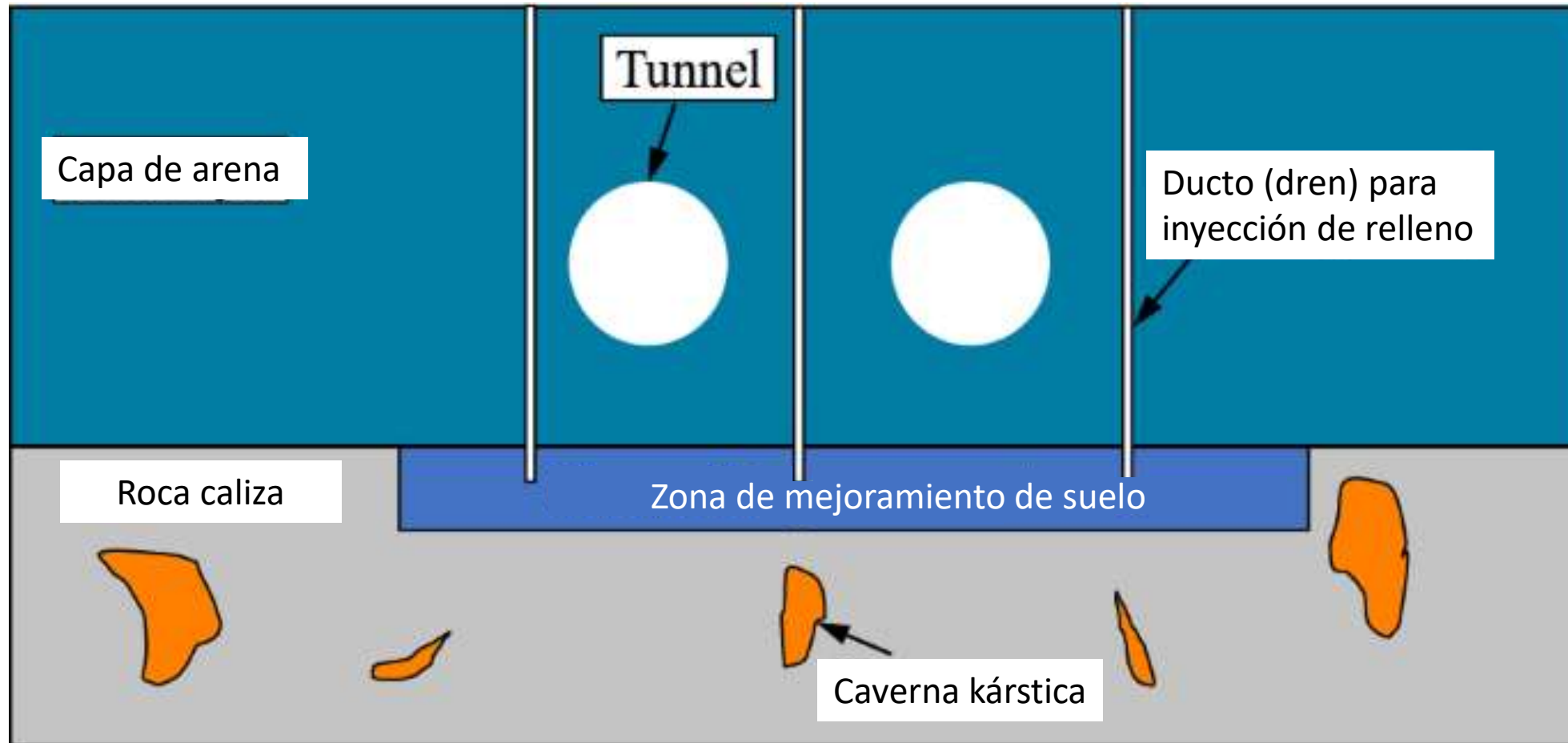


Fotografías del colapso del suelo inducido por un túnel de protección en:
(**a**) la línea 3 del metro de Wuhan y (**b**) la línea 6 del metro en 2007

Algunos ejemplos

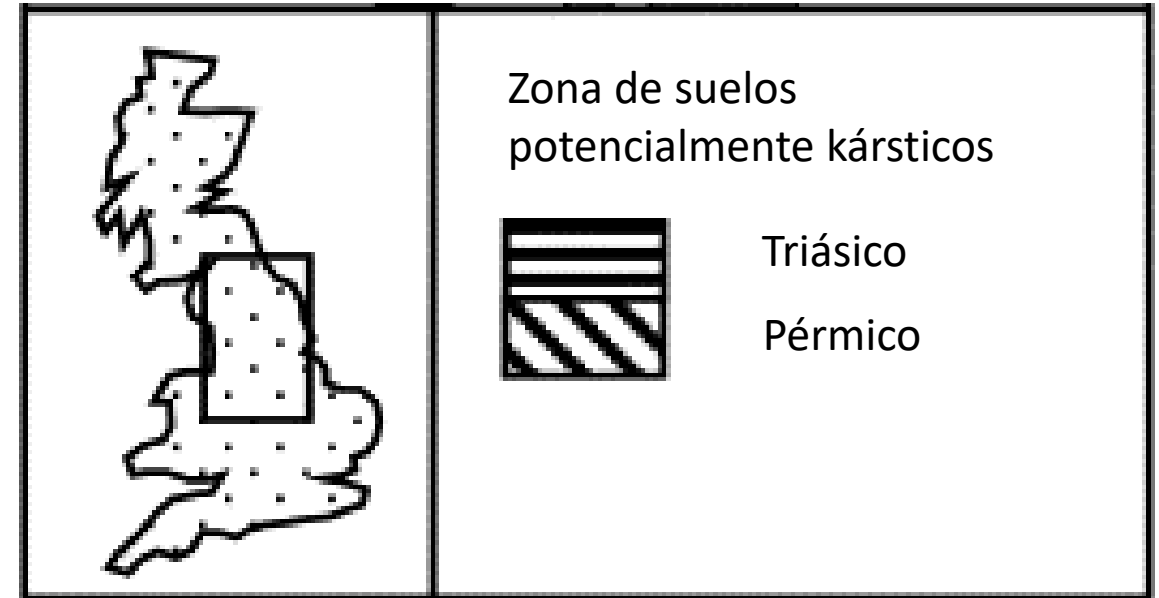
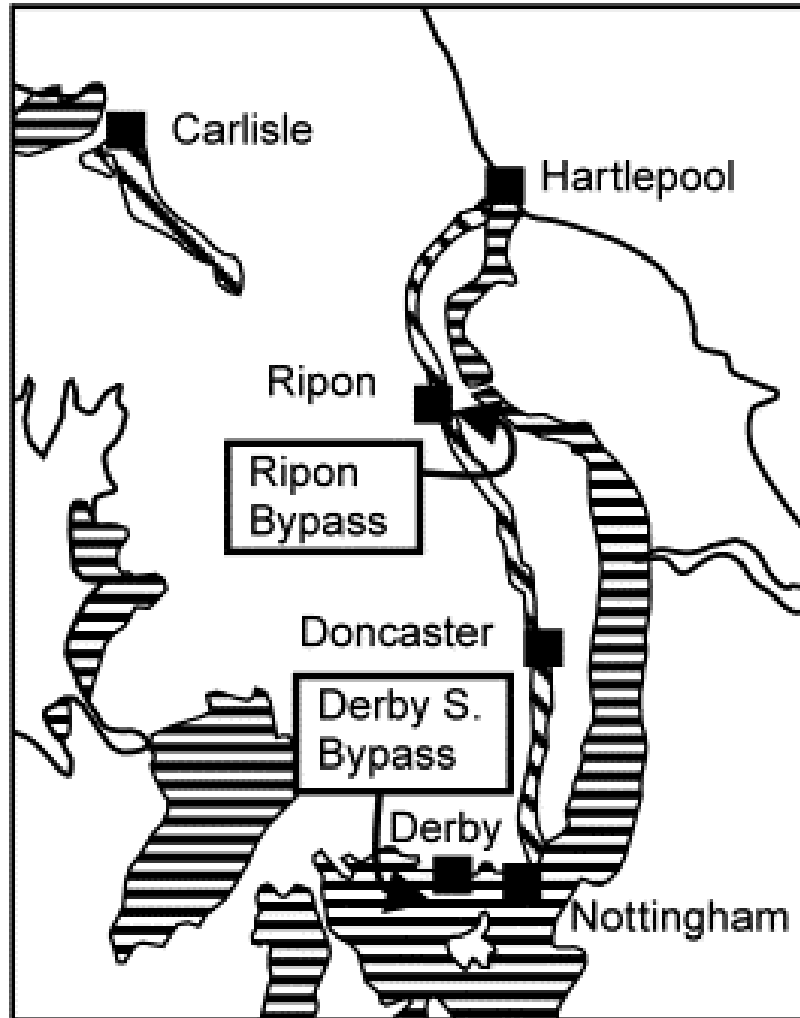
Metro de Wuhan, China

Soluciones utilizadas: Mejoramiento del suelo y relleno de cavernas



Algunos ejemplos

Caso de Inglaterra

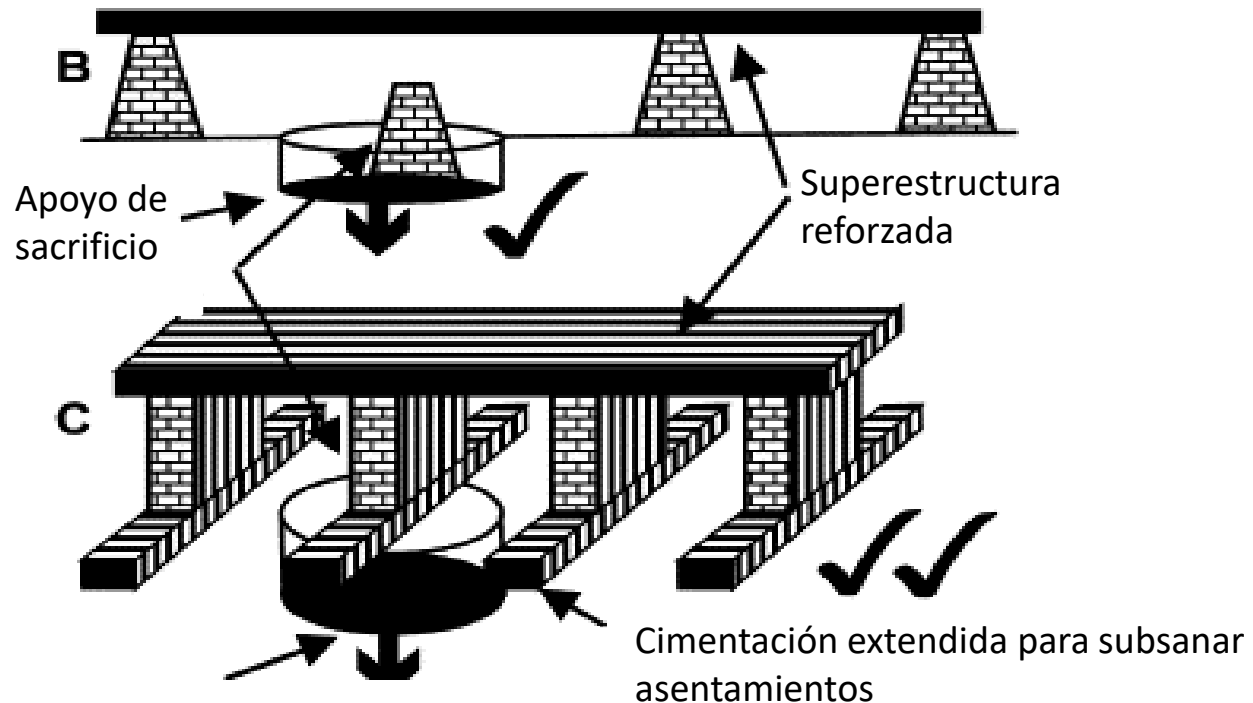


Algunos ejemplos

Caso de Inglaterra, soluciones empleadas

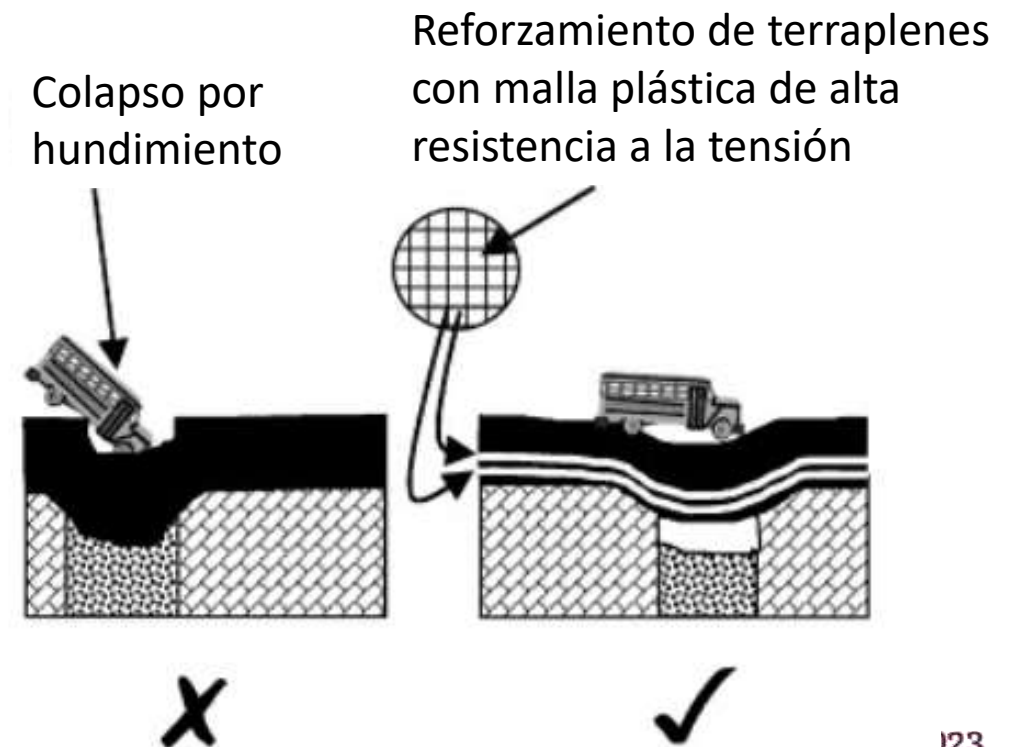
Ripon Bypass

- Uso de apoyos de sacrificio con tableros reforzados



Derby Southern Bypass

- Reforzamiento de terreno con geomalla



Algunos ejemplos

Caso México

KARSTICIDAD

Hundimientos violentos del suelo

¿Qué es?

Es el fenómeno que provoca que las rocas del subsuelo, como el yeso, calizas y dolomías, al ser disueltas por el agua, causen hundimientos de suelo o socavones y cuevas. Puede generar situaciones de riesgo para quienes habitan estas zonas

Cerca de 20 % del territorio nacional lo desarrolla, sobre todo, en la sierra Madre Oriental y en toda la península de Yucatán

Características:



Fallas estructurales en viviendas e infraestructura

Hundimiento lento del terreno

El fenómeno se puede manifestar de manera súbita

Derrumbe repentino de cavernas subterráneas

Gran poder destructivo

Alteración de los niveles de aguas subterráneas y formación de cavidades

Medidas preventivas:

-  Evita descargar tu drenaje en zonas de hundimiento o terrenos agrietados
-  Si detectas deformación de estructuras en viviendas, hundimientos, grietas, acumulación de agua, aparición de manantiales, etc., avisa de inmediato a las autoridades de protección civil de tu localidad
-  En caso de hundimiento lento, evacua el área afectada, define un perímetro de seguridad
-  Si vas a construir, respeta los usos de suelo y realiza estudios previos para saber si el lugar es apto para tu construcción
-  Evita el flujo de agua hacia la zona afectada

Desde el año 2000, se han presentado al menos 35 hundimientos kársticos en México

Centro Nacional de Prevención de Desastres

Algunos ejemplos

Caso México



Evita descargar tu drenaje en zonas de hundimiento o terrenos agrietados



Si detectas deformación de estructuras en viviendas, hundimientos, grietas, acumulación de agua, aparición de manantiales, etc., avisa de inmediato a las autoridades de protección civil de tu localidad



En caso de hundimiento lento, evacua el área afectada, define un perímetro de seguridad



Si vas a construir, respeta los usos de suelo y realiza estudios previos para saber si el lugar sí es apto para tu construcción



Evita el flujo de agua hacia la zona afectada

¡Recuerda! En caso de hundimiento, evacua el área



SEGURIDAD
SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



CENAPRED
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN
DE DESASTRES



Algunos ejemplos

Caso México



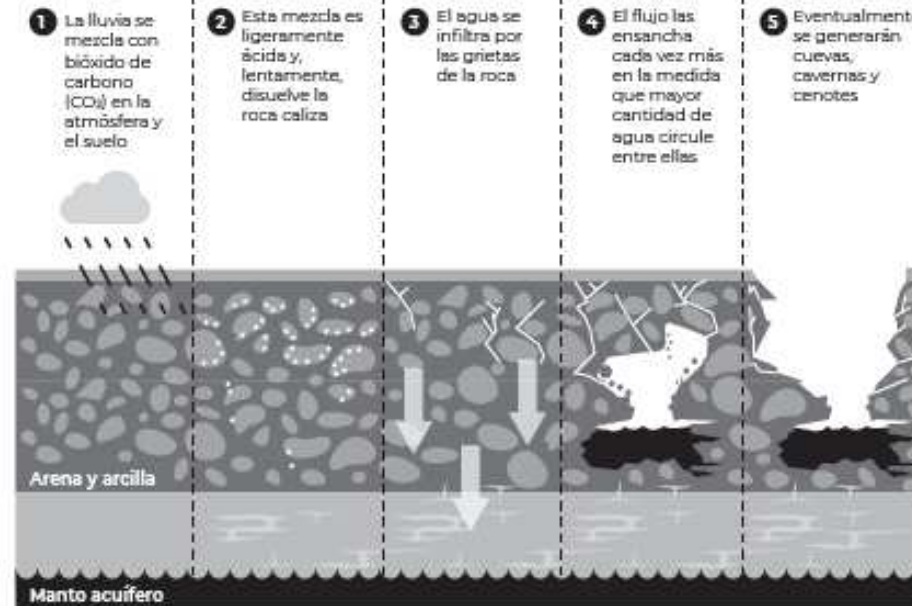
Karsticidad

Hundimiento en cavernas, barrancos o arroyos que pueden presentarse de manera súbita

¿Cómo se forman las cuevas y cavernas?

Las rocas calizas que forman la sierra Madre Oriental, parte de la sierra Madre del Sur, las sierras de Chiapas y la península de Yucatán se formaron hace más de 65 millones de años por la acumulación de conchas de animales marinos microscópicos en el fondo del mar.

El peso de las capas superiores hizo que se compactaran y recristalizaran hasta convertirlas en rocas, que posteriormente fueron deformadas, plegadas y fracturadas para formar las sierras o, en el caso de la península de Yucatán, levantadas lentamente como plataforma.



Cuevas de México

La caverna más larga está en Quintana Roo, tiene

311

km de túneles y es considerada la segunda más larga en el mundo.

Existen más de

30

cuevas con más de 10 km de longitud y más de 200 superan 15 kilómetros.

1545

metros de desnivel tiene la cueva más profunda de México, está en Oaxaca y es la octava más profunda del mundo.

Hay más de

320

cavidades superiores a 200 m de desnivel.



Algunos ejemplos

Caso México

Desplome en la carretera
Tulum – Cancún





Algunos ejemplos

Caso México

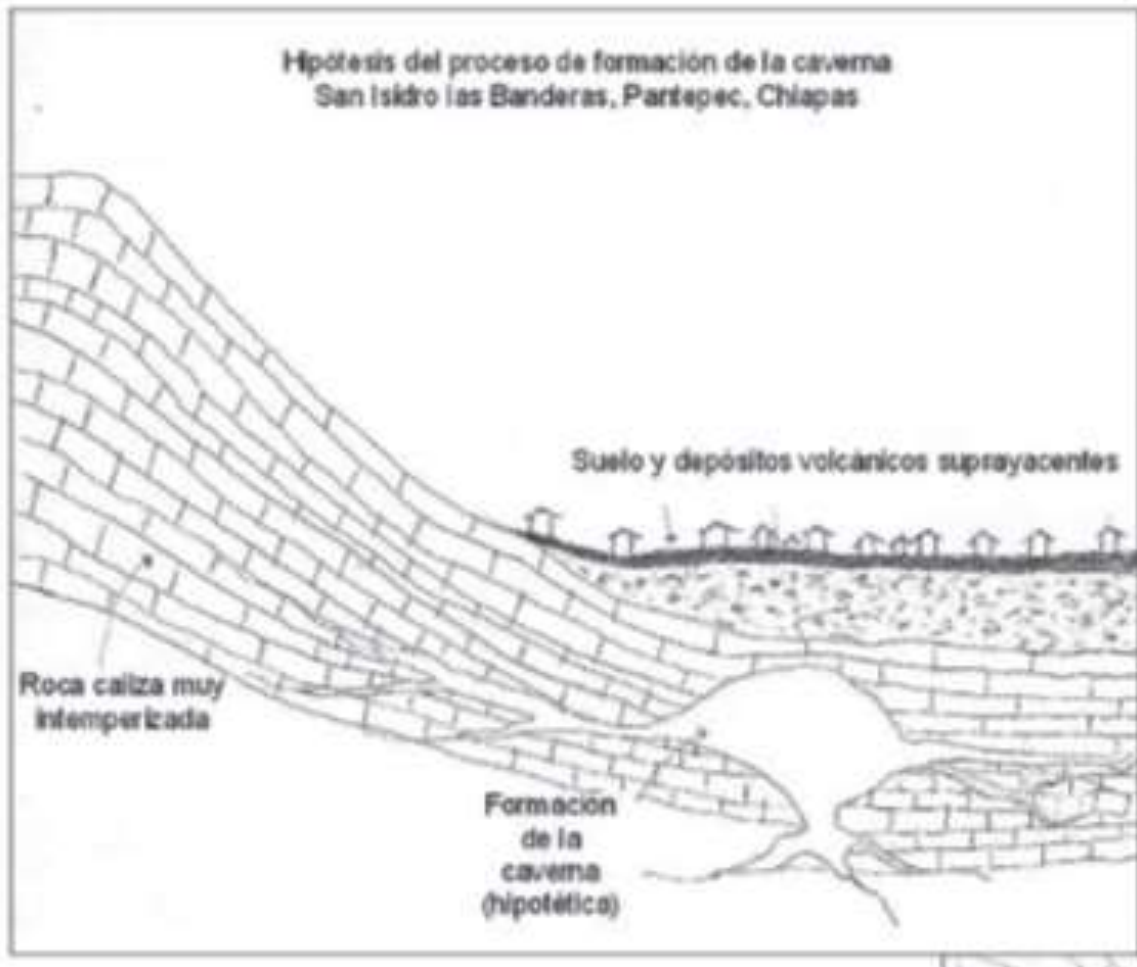
Intentan rescatar a 6 víctimas del desplome de 15 viviendas en San Isidro Las banderas, municipio Pantepec, Chiapas. 2003



Algunos ejemplos

Caso México

Hipótesis del proceso de formación de la caverna
San Isidro las Banderas, Pantepec, Chiapas



Hipótesis del colapso de la caverna
San Isidro las Banderas, Pantepec, Chiapas



Algunas referencias de apoyo

BS 8006-1:2010



Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills

BS 8006-1:2010

BRITISH STANDARD

Publishing and copyright information

The BSI copyright notice displayed in this document indicates when the document was last issued.

© BSI 2010

ISBN 978 0 580 53842 1

ICS 93.020

The following BSI references relate to the work on this standard:
Committee reference B/526/4
Draft for comment 09/30093258 DC

BS 8006-1:2010

BRITISH STANDARD

Section 8: Design of embankments with reinforced soil foundations on poor ground

8.1 General

The design of embankments with reinforced soil foundations should be fully explained and detailed in a Geotechnical Design Report prepared in accordance with BS EN 1997-1:2004.

8.4 Reinforced embankments over areas prone to subsidence

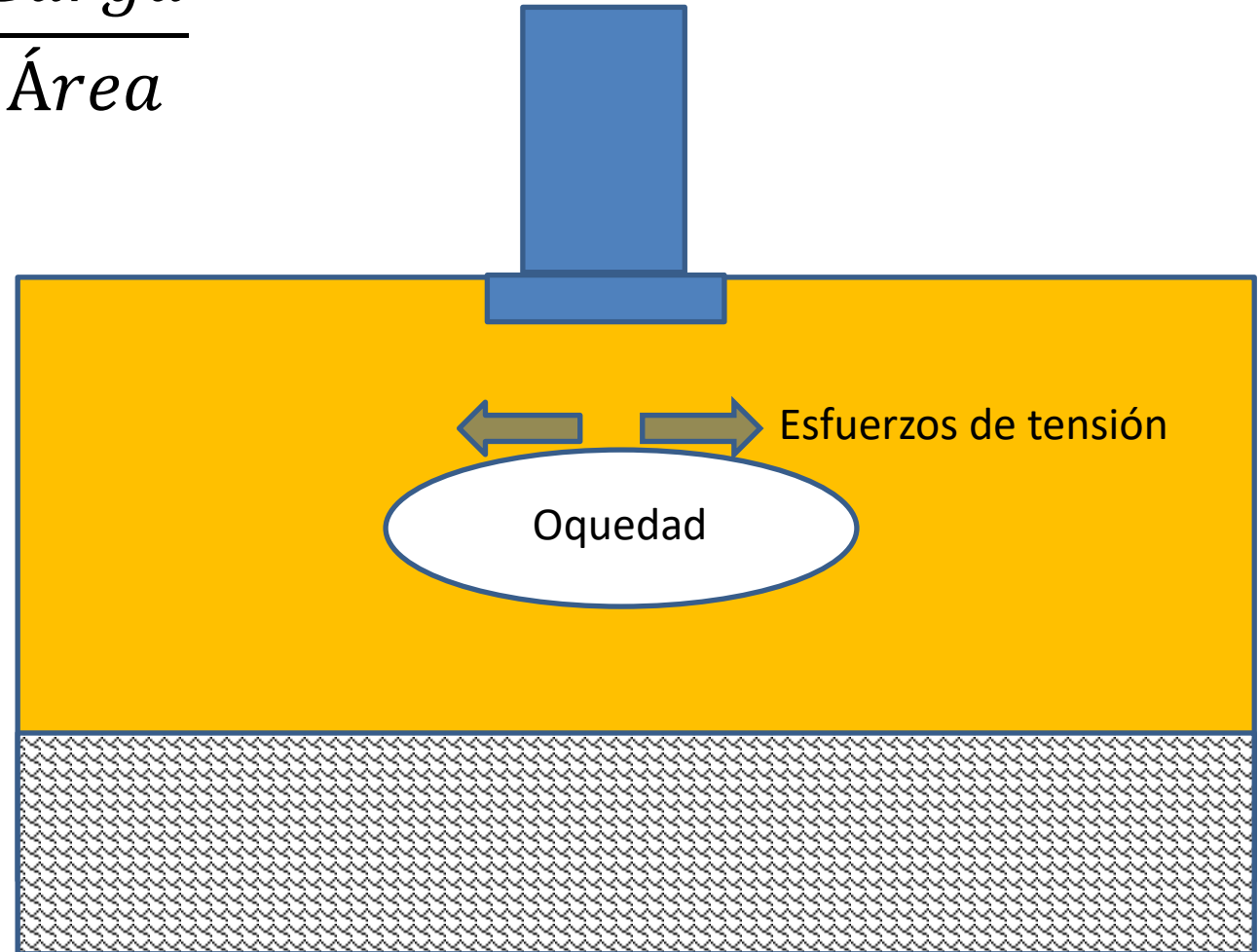
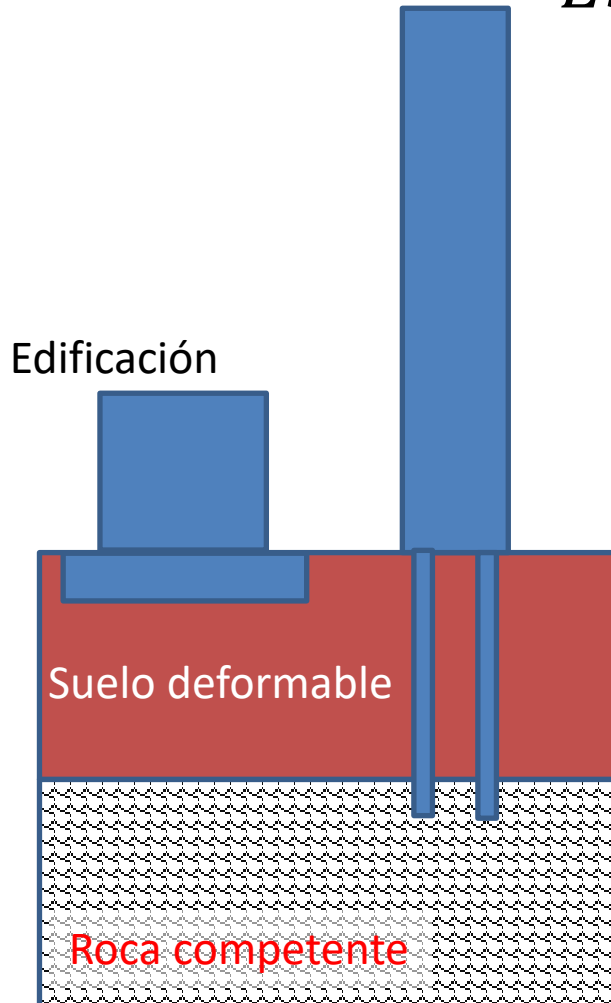
8.4.1 Areas of application

The following should be considered in dealing with areas prone to subsidence.

- a) Subsidence normally results from the collapse of a void below the ground surface. Subterranean voids can arise from natural processes (e.g. soil erosion in karstic areas) or from man-made processes (e.g. ground water pumping or underground mining).

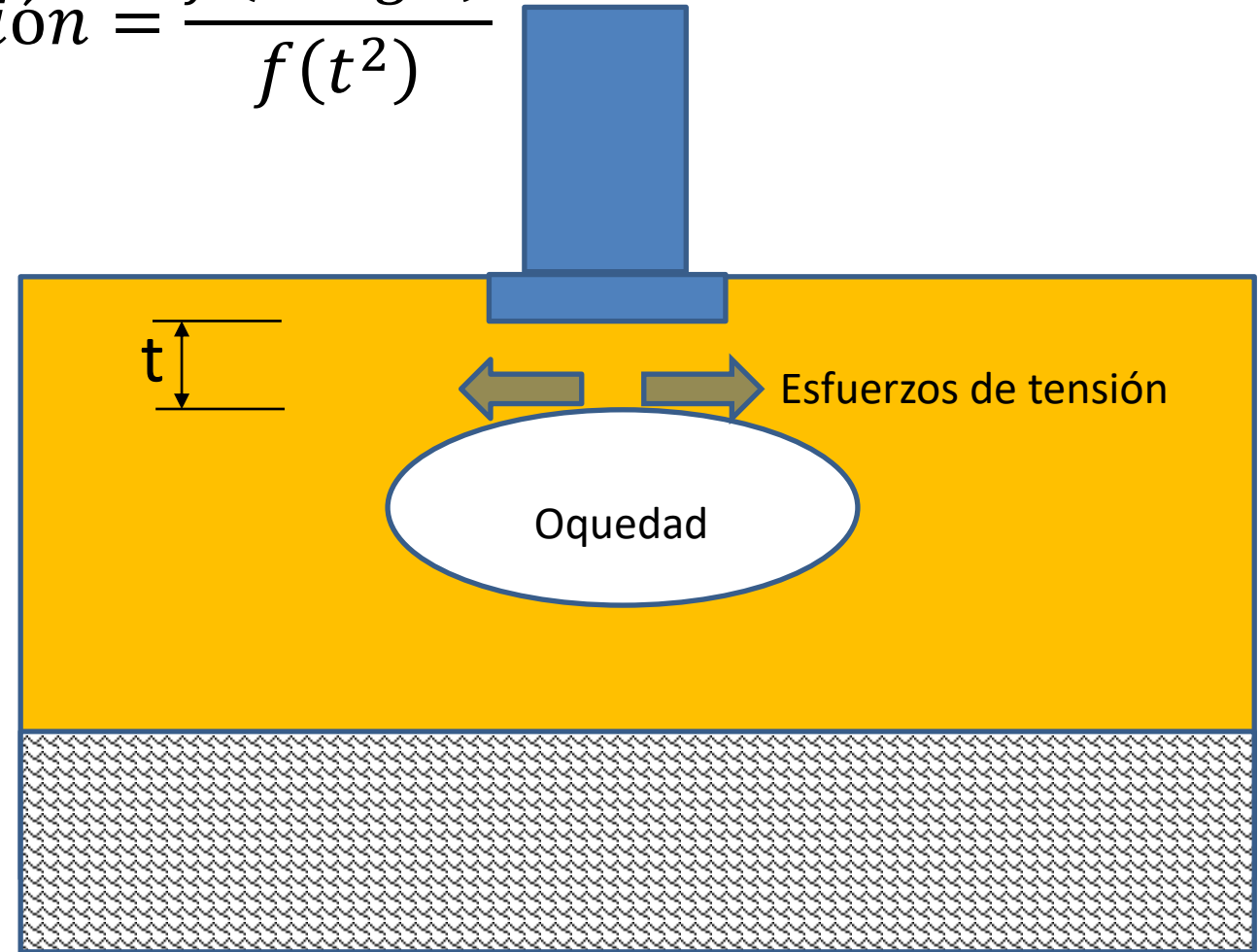
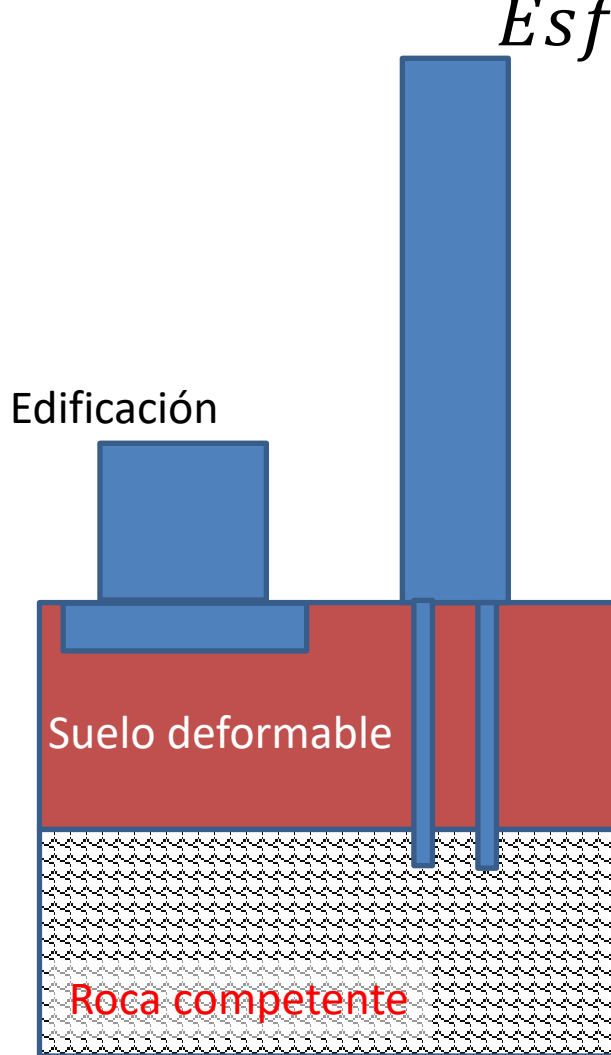
Esquema básico de equilibrio (esfuerzos)

$$Esfuerzo = \frac{Carga}{\text{Área}}$$



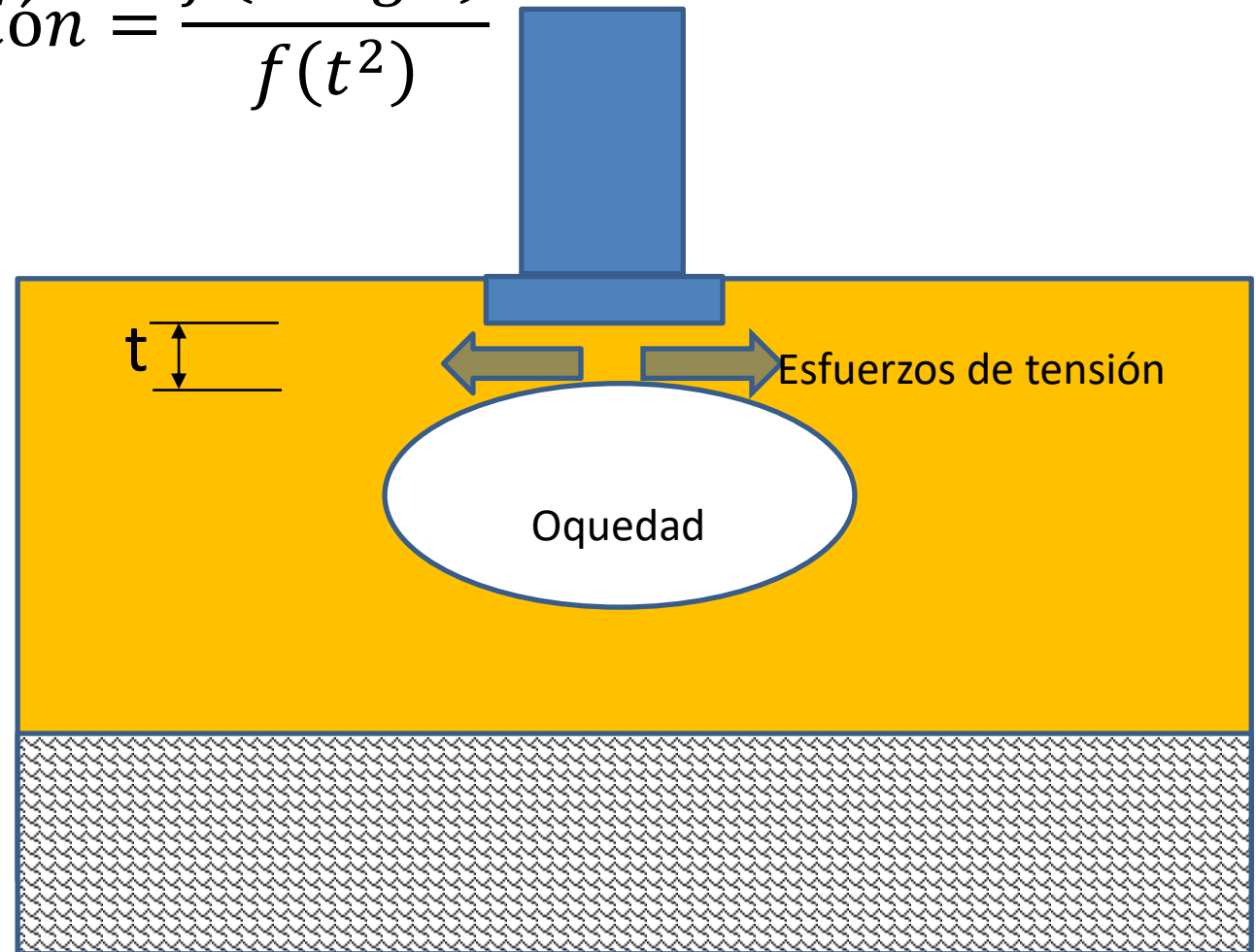
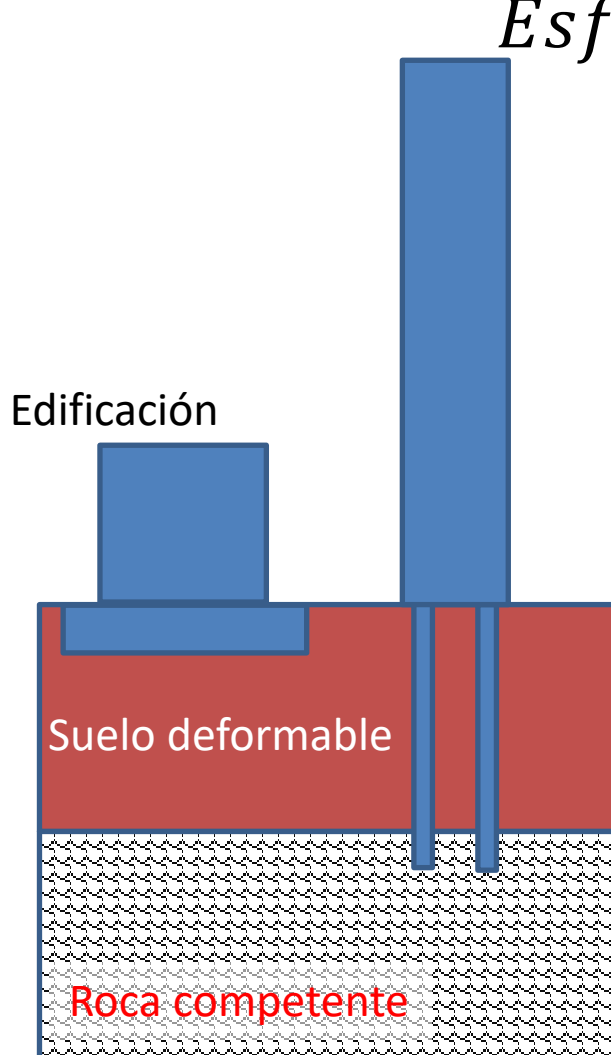
Esquema básico de equilibrio (esfuerzos)

$$\text{Esfuerzo tensión} = \frac{f(\text{Carga})}{f(t^2)}$$



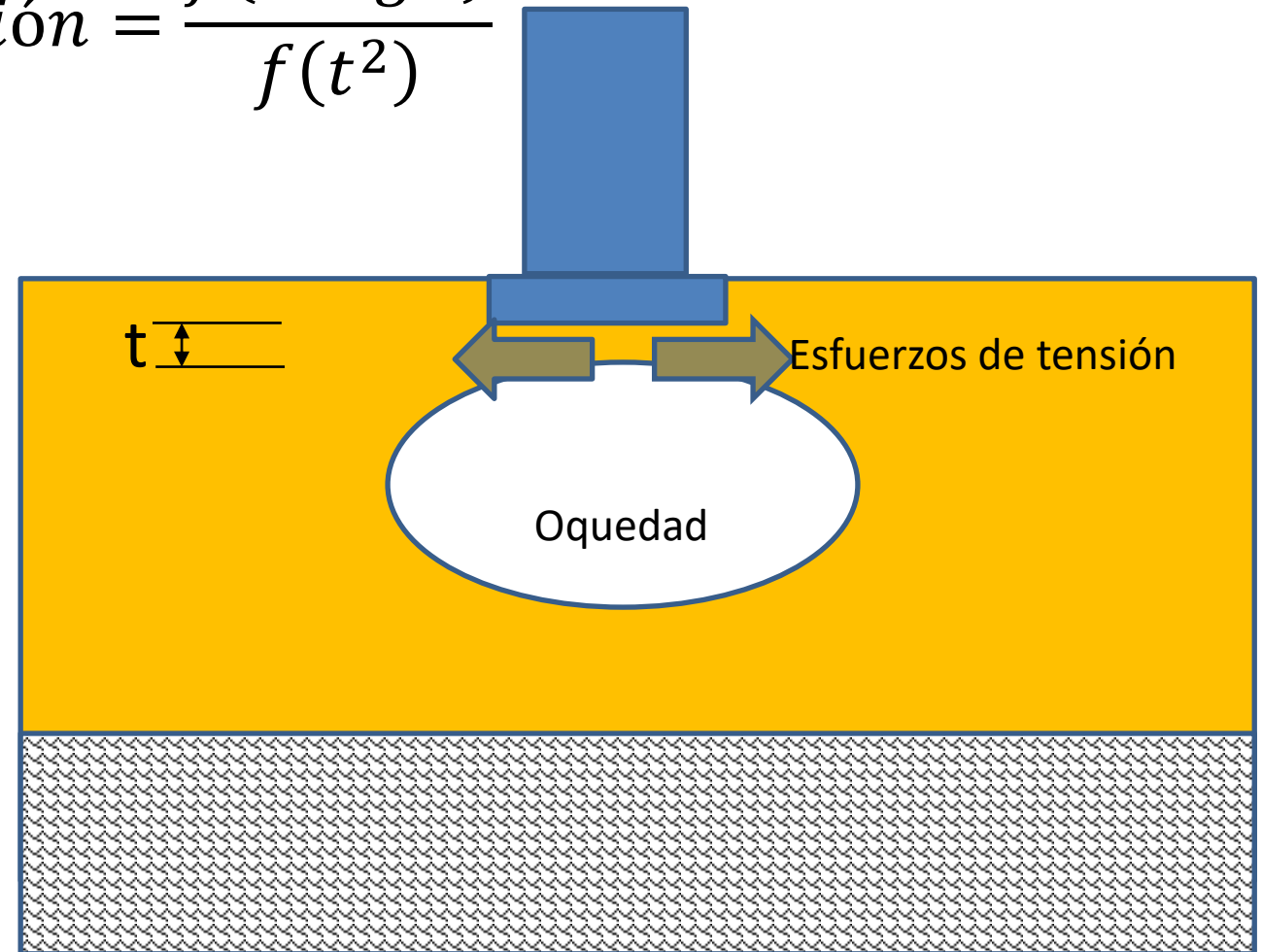
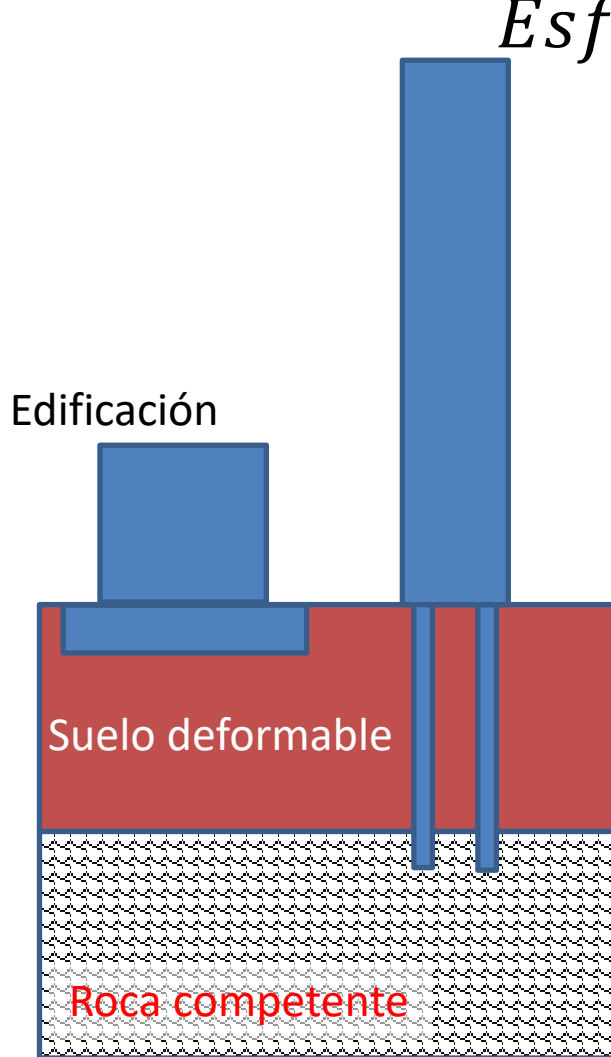
Esquema básico de equilibrio (esfuerzos)

$$\text{Esfuerzo tensión} = \frac{f(\text{Carga})}{f(t^2)}$$

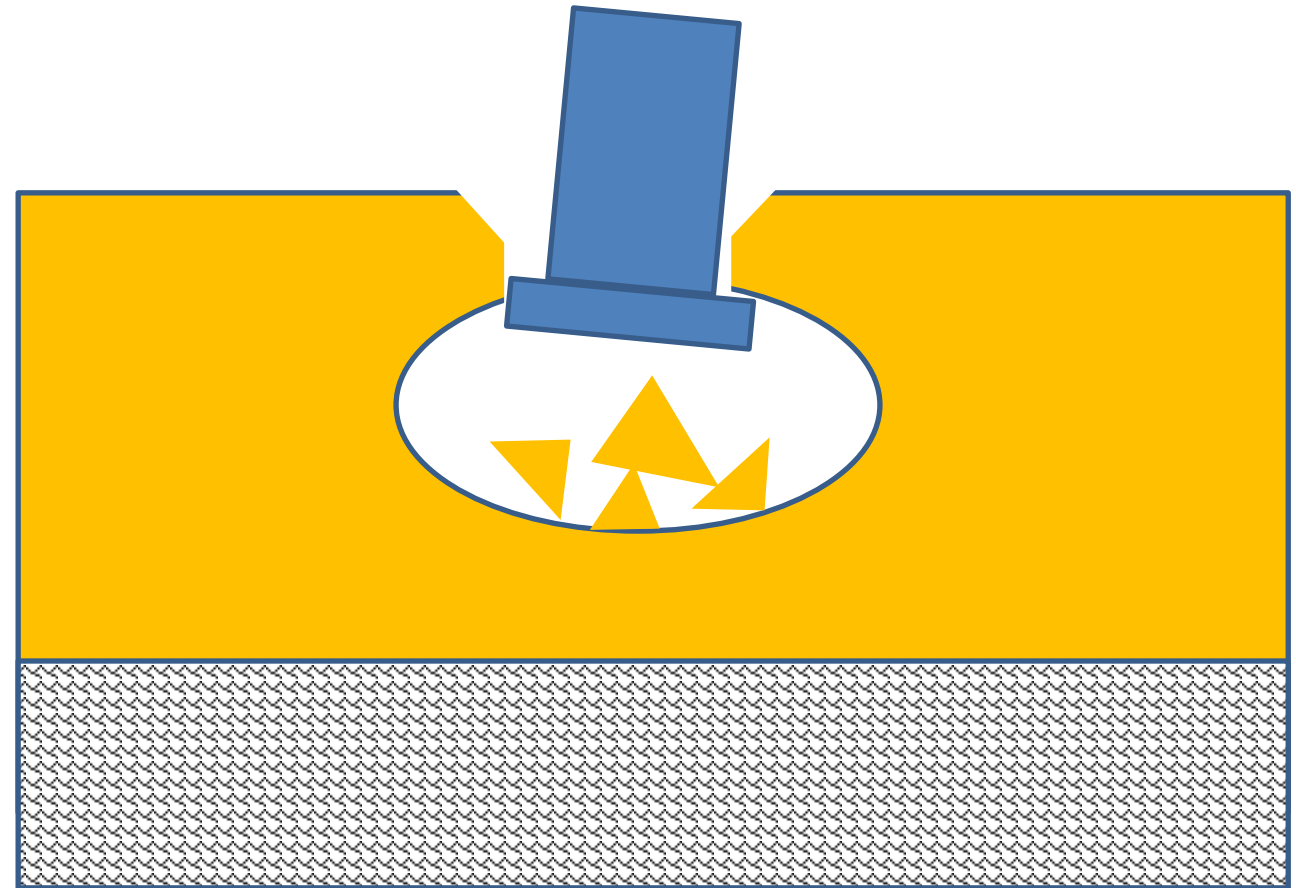
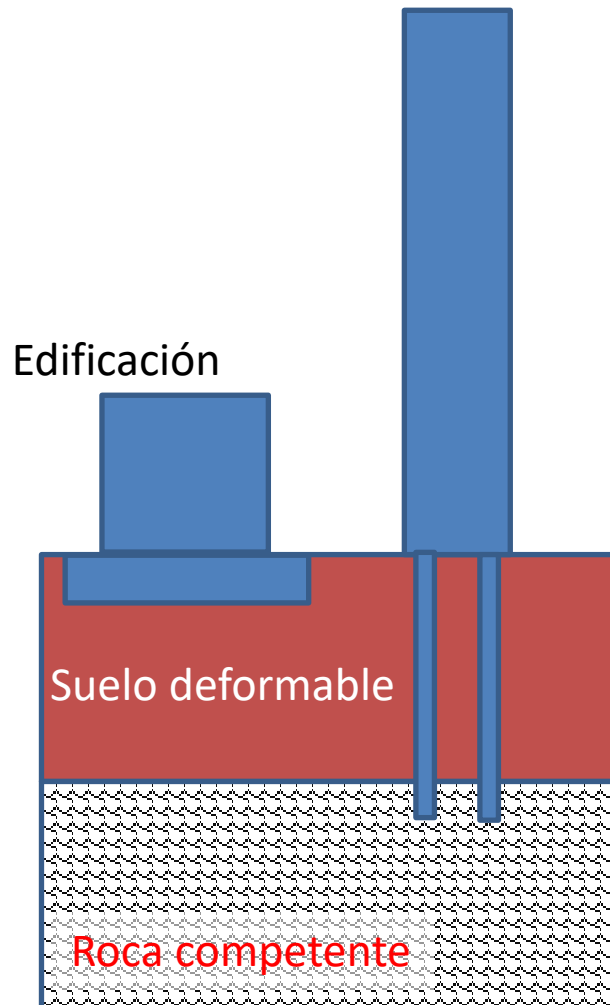


Esquema básico de equilibrio (esfuerzos)

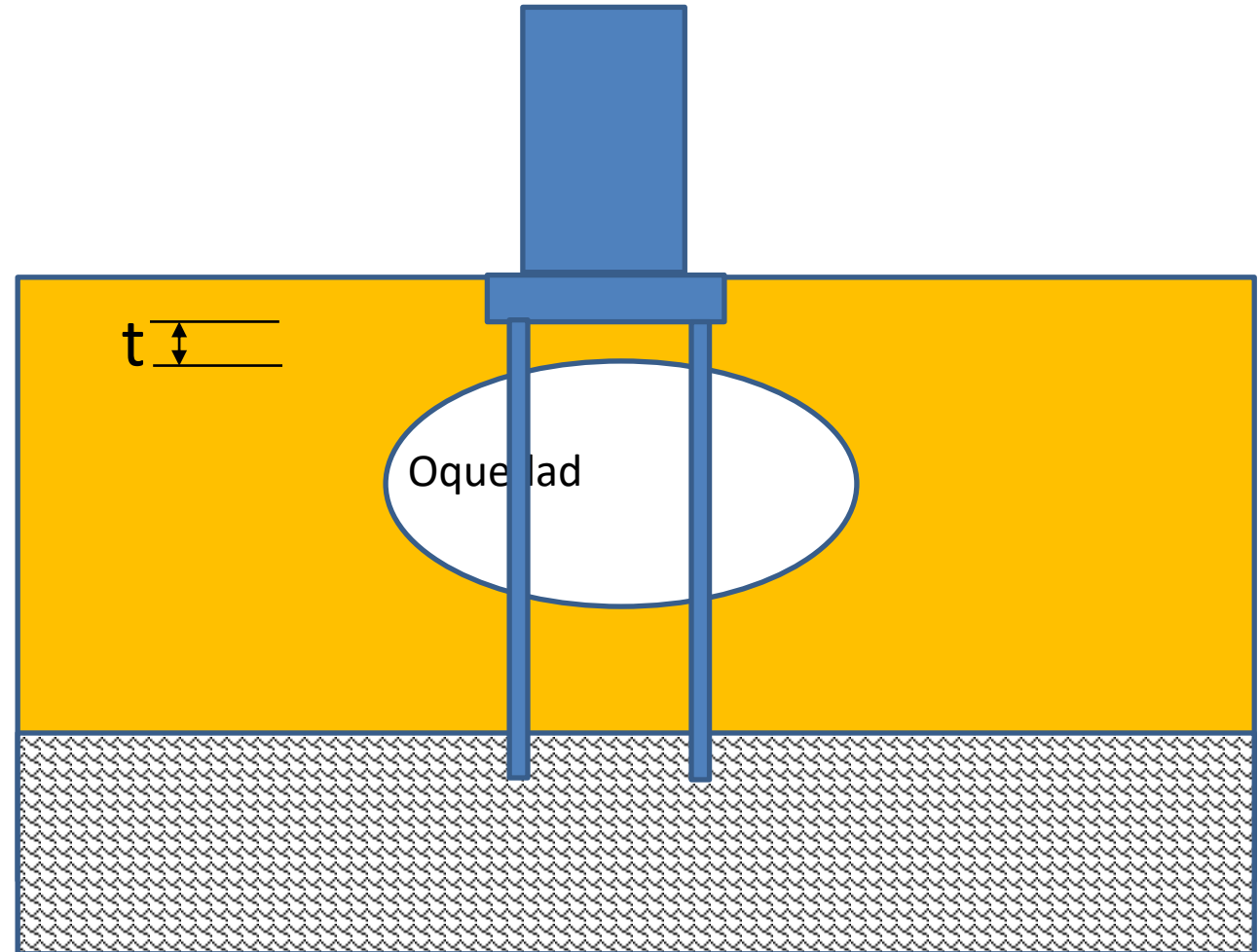
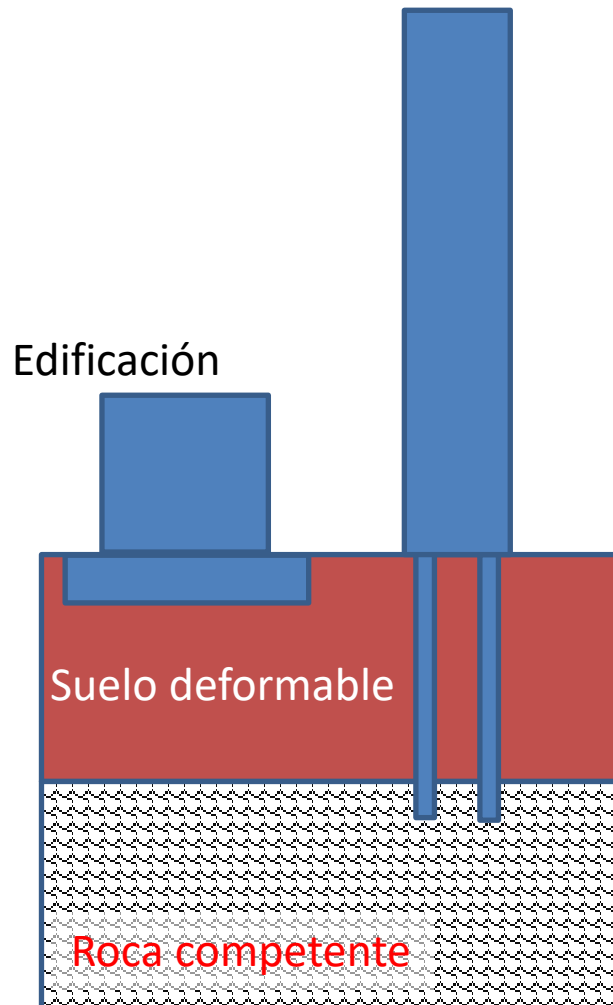
$$\text{Esfuerzo tensión} = \frac{f(\text{Carga})}{f(t^2)}$$



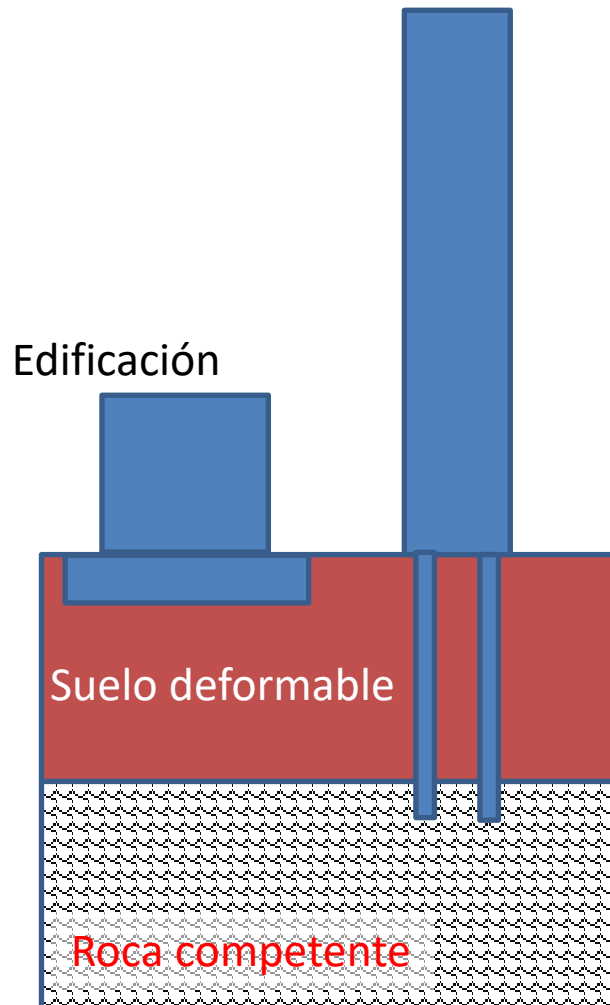
Esquema básico de equilibrio (esfuerzos)



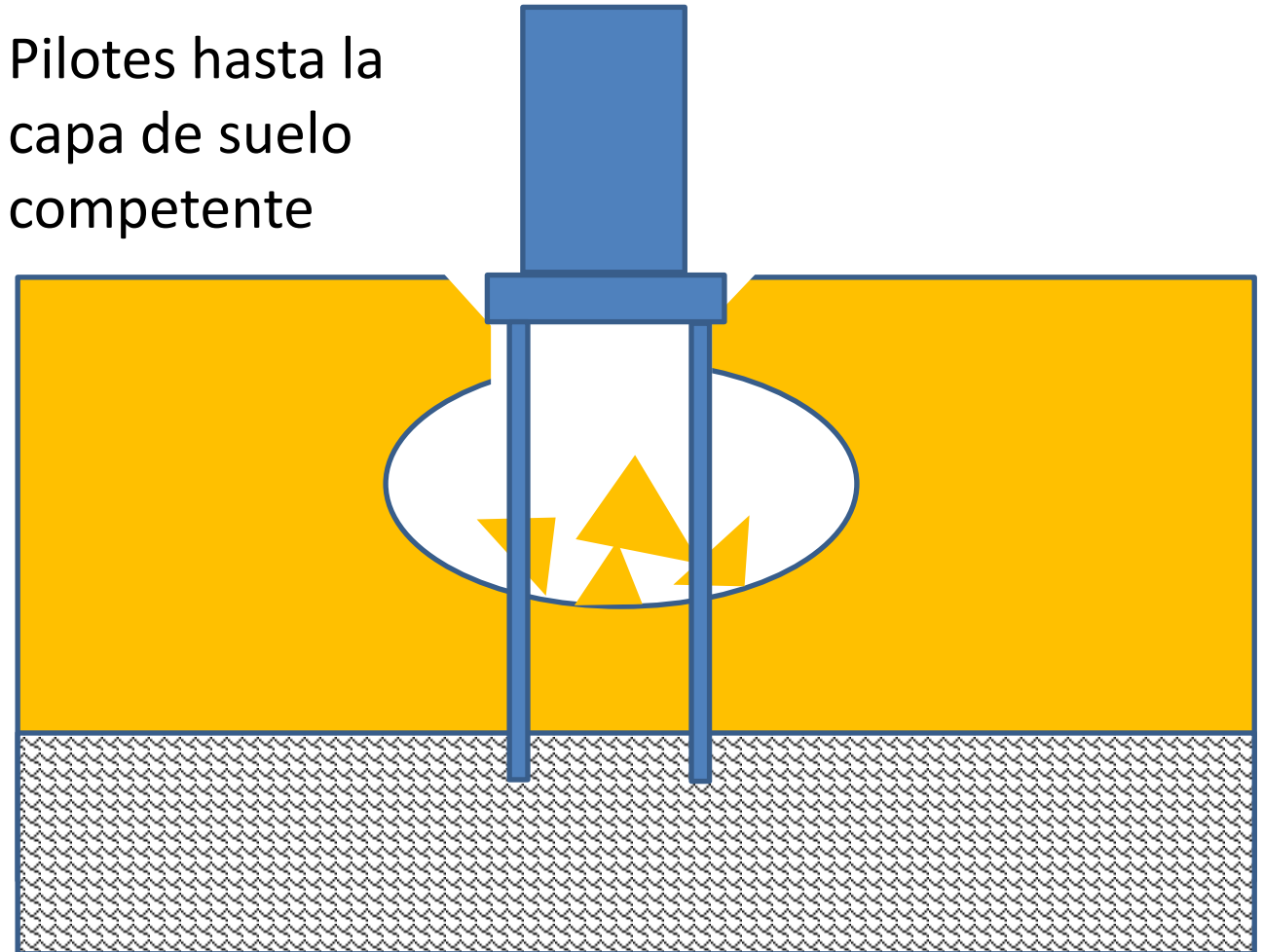
Esquema básico de equilibrio (esfuerzos)



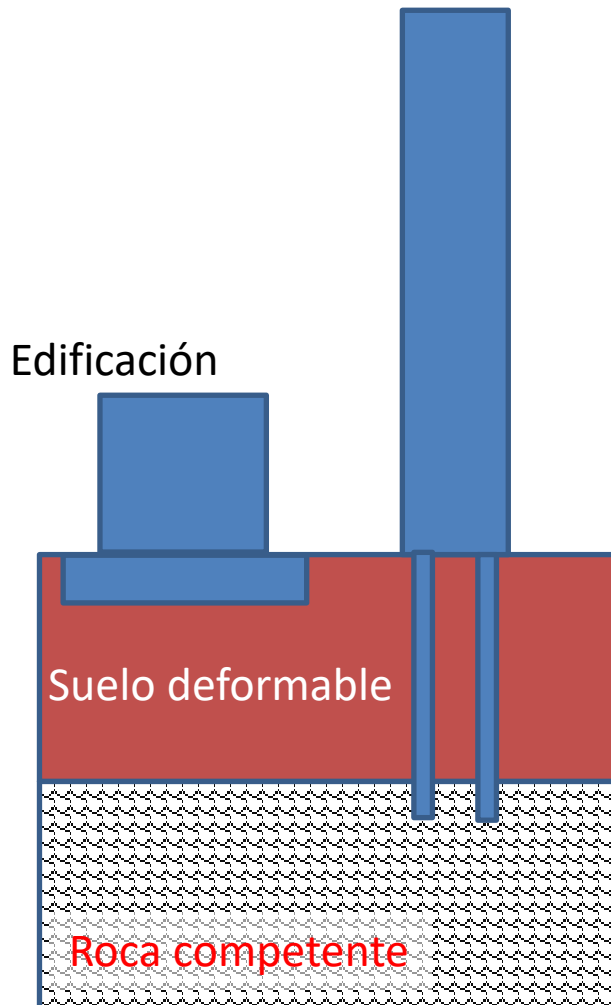
Esquema básico de equilibrio (esfuerzos)



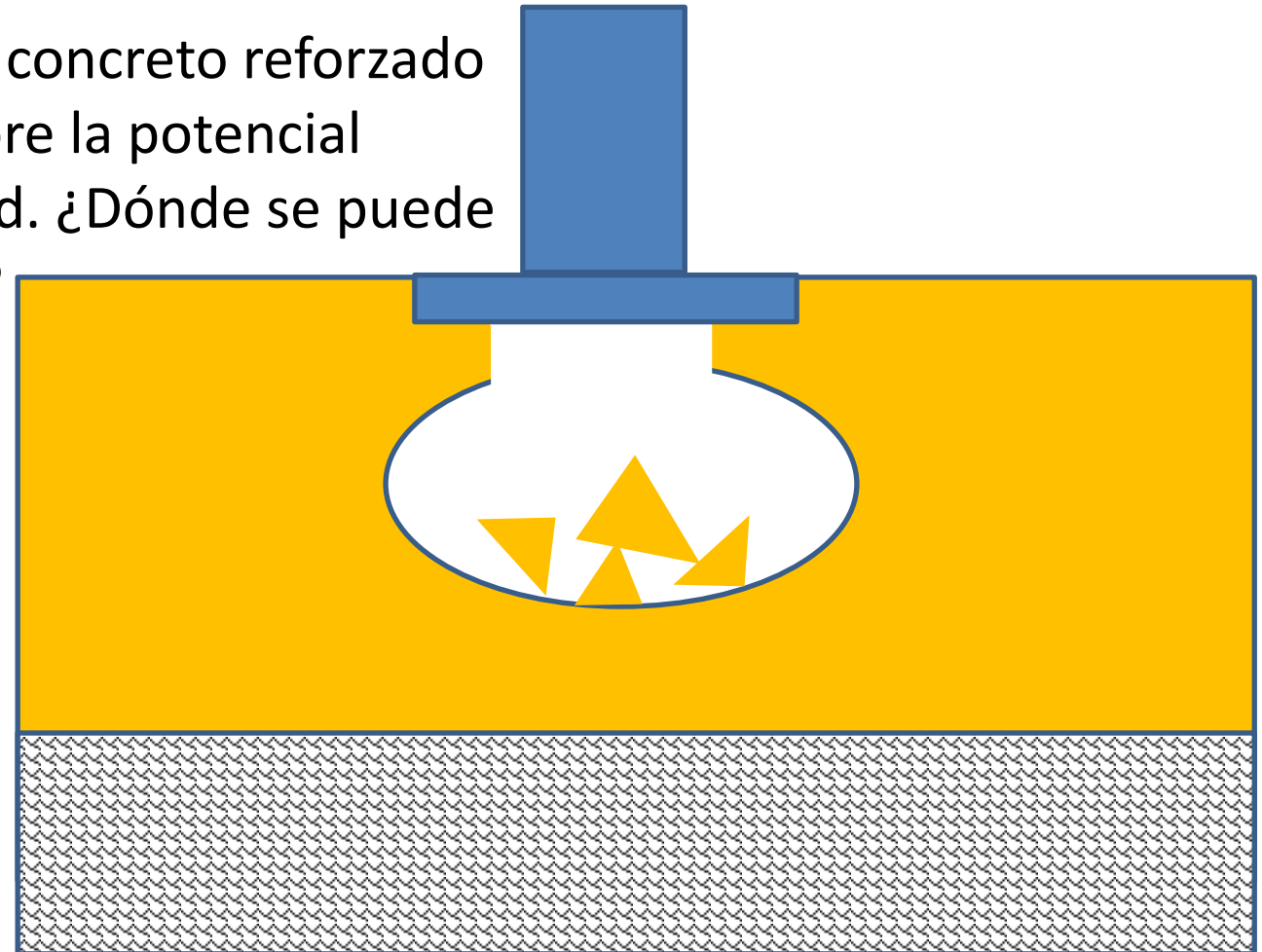
Pilotes hasta la
capa de suelo
competente



Esquema básico de equilibrio (esfuerzos)



Losa de concreto reforzado que cubre la potencial oquedad. ¿Dónde se puede apoyar?





Algunos ejemplos

Desalojan a mil 200 personas de predio en Chiapas; riesgo de otro hundimiento
Intentan rescatar a 6 víctimas del desplome de 15 viviendas en San Isidro Las banderas, Pantepec. 2003

Caso México



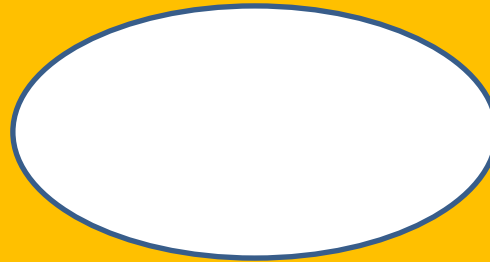


Esquema básico de equilibrio (esfuerzos)

Losa de concreto reforzado,
con alta capacidad a flexión



Suelo susceptible de ser disuelto



Roca competente

Esquema básico de equilibrio (esfuerzos)

Losa de concreto reforzado, con alta capacidad a flexión.
Permite redistribución de esfuerzos y, eventualmente reduce el colapso abrupto



Algunos ejemplos en obra civil



Colapso de cubierta de oquedad cárstica, marzo de 2003.

Afectó a la vía férrea de alta velocidad Madrid–Barcelona en las proximidades de la ciudad de Zaragoza, España.

Puente flotante para coches atracción y proeza de ingeniería.

Presiona **F11** para salir del modo de pantalla completa

TRIBUNA
NETWORKS

0:01 / 1:04

CONCLUSIONES

- **Indispensables los estudios geofísicos, geológicos y geotécnicos**
- **Existen procedimientos** para diseño de cimentaciones que incluyen mejoramiento de suelos
- No obstante, **indispensable mantener un monitoreo** de la condición topográfica de la superficie, así como del proceso de dilución de la roca y aumento de las dimensiones de las oquedades
- Cualquier procedimiento, remediación, demolición, construcción, en cualquier condición, especialmente en este tipo de suelo requiere de **procedimientos adecuados de supervisión**
- En general todos **los procedimientos de diseño original y/o remediación resultan costosos, más si no se realizan los estudios necesario y los procedimientos no son planteados y supervisados por especialistas**



GRACIAS

olb@cenapred.unam.mx
jgomez@cenapred.unam.mx