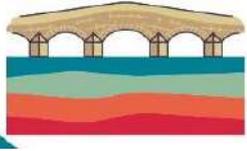


The role of geotechnical engineering to bring the ancient underground world of Napoli back to life

*El papel de la ingeniería geotécnica
para revivir el antiguo mundo subterráneo de Nápoles*

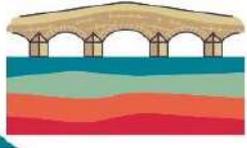
Alessandro Flora and Filomena de Silva
University of Napoli Federico II, ITALY



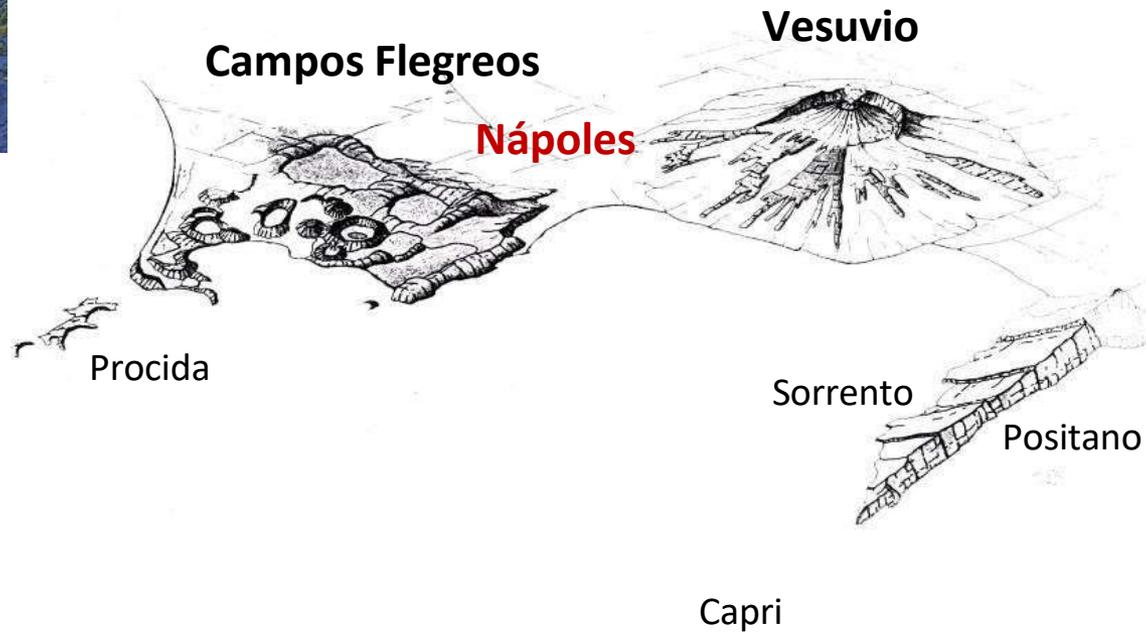
Contenido:

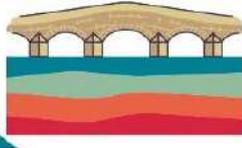
1. El mundo subterráneo de Nápoles (Italia)
2. Problemas de seguridad en espacios subterráneos
3. Estudio de dos cavidades de gran valor histórico
4. Observaciones finales

- 1. El mundo subterráneo de Nápoles (Italia)**
2. Problemas de seguridad en espacios subterráneos
3. Estudio de dos cavidades de gran valor histórico
4. Observaciones finales



Nápoles: una ciudad entre dos volcanes (activos)



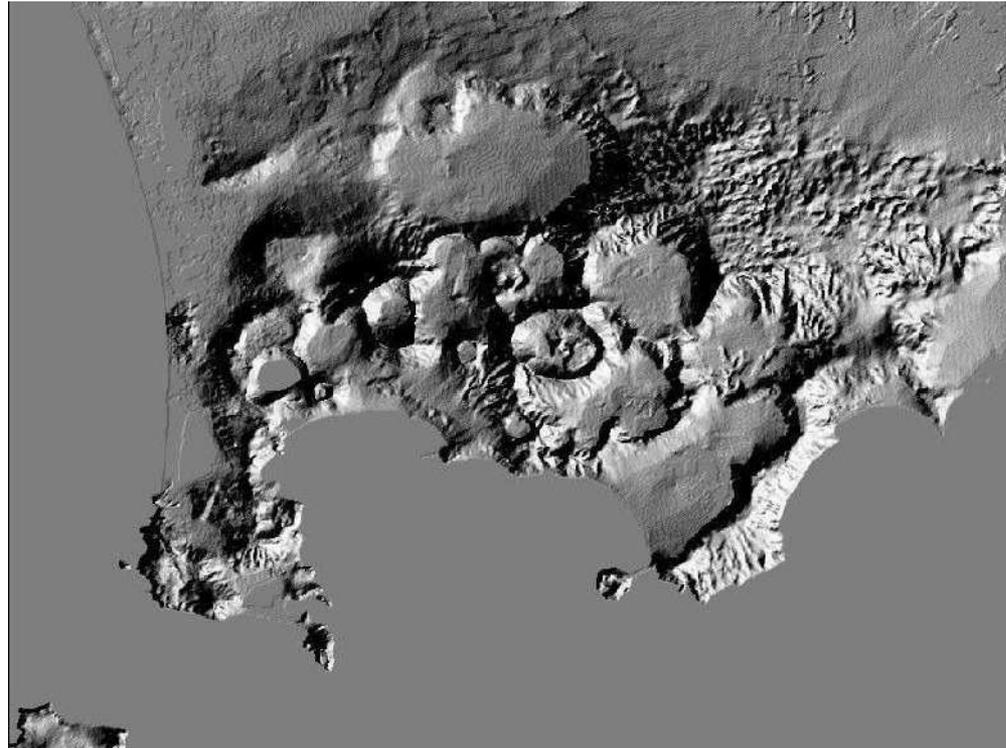


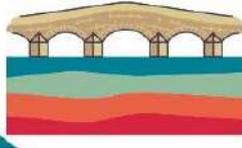
Los Campos Flegreos

Productos de los Campos Flegreos

Puzolana (arena con limo)

Toba (roca blanda)





Los Campos Flegreos

CAMPI FLEGREI - Italia febbraio 2022

Comunicazione sullo stato attuale della caldera dei Campi Flegrei



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA OSSERVATORIO VESUVIANO

www.ov.ingv.it



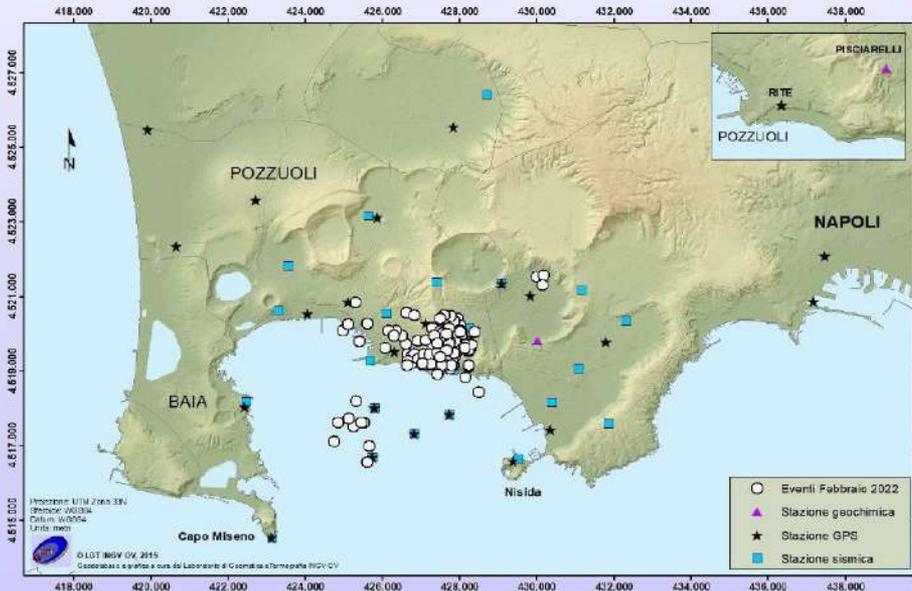
Nel corso del mese di febbraio 2022 sono stati registrati 246 terremoti ($M_{dmax}=2.2\pm 0.3$).

Il sollevamento registrato alla stazione GPS di RITE è di circa 58 cm partire da gennaio 2016.

I parametri geochimici indicano il perdurare dei trend già identificati in precedenza.



Per approfondimenti: www.ov.ingv.it/ov/it/bollettini.html



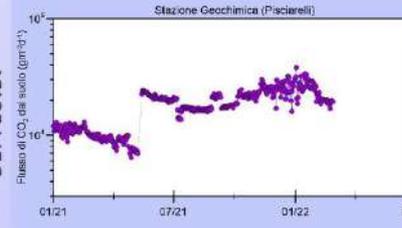
SISMICITÀ

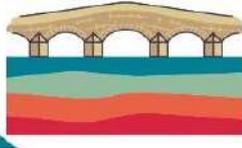


DEFORMAZIONI DEL SUOLO



GEOCHIMICA DEI FLUIDI





La toba



Toba amarilla de
Quarto



Toba verde
de Ischia



Toba amarilla
de San Rocco

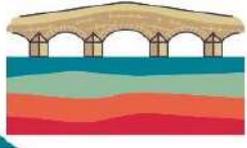
Nápoles y la toba – por encima



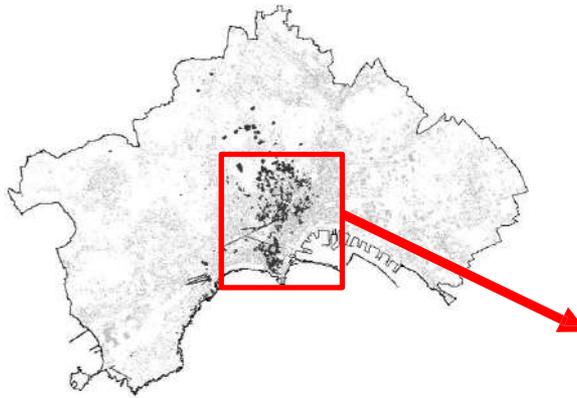
Castillo dell'Ovo (*del Huevo*)



Castillo Sant'Elmo



Nápoles y la toba – por debajo



Alrededor de 900
cavidades subterráneas
conocidas

Volumen total conocido $\approx 7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

Nápoles y la toba – por debajo

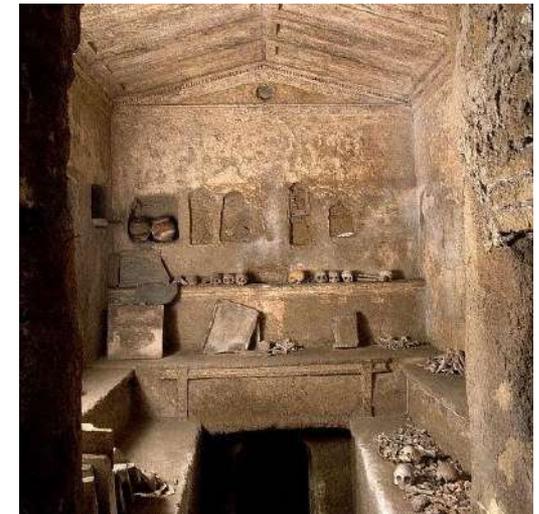
Las cavidades fueron excavadas por diversas razones:

- Canteras
- Lugares de culto y entierro
- Acueductos
- Galerías

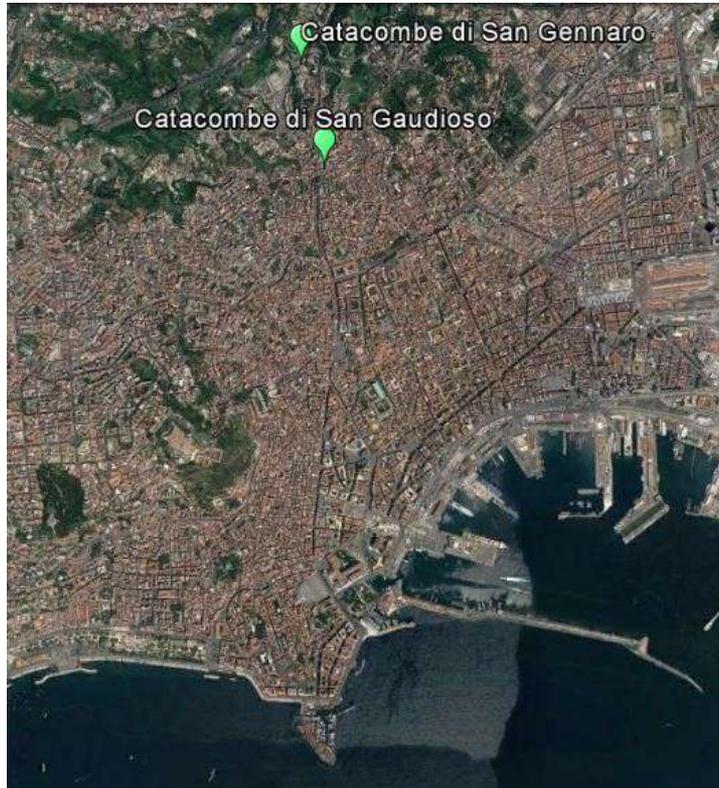


Primeras cavidades excavadas:

- Tumbas eneolíticas de Materdei (3000 años a. C.)
- Tumbas griegas (siglo VI - siglo III a. C.)
- Cavidades romanas (siglo III a. C. - siglo V d. C.)



Nápoles y la toba – por debajo

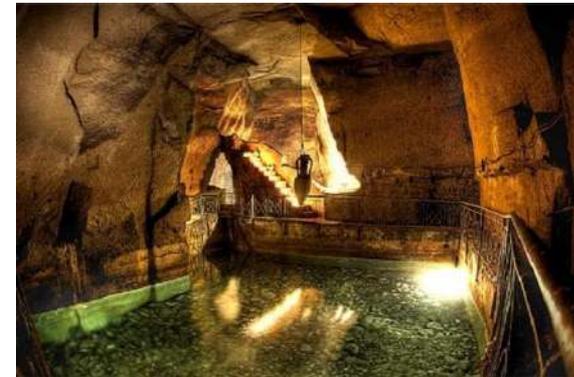
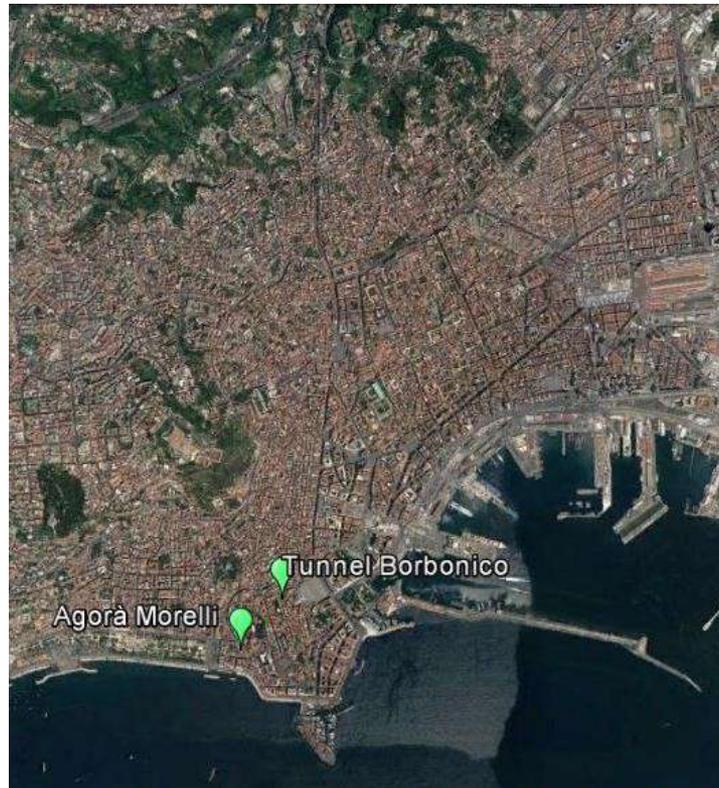


Catacumbas de San Genaro

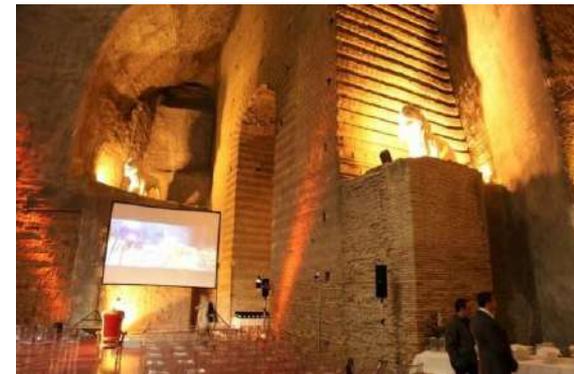


Catacumbas de San Gaudioso

Nápoles y la toba – por debajo

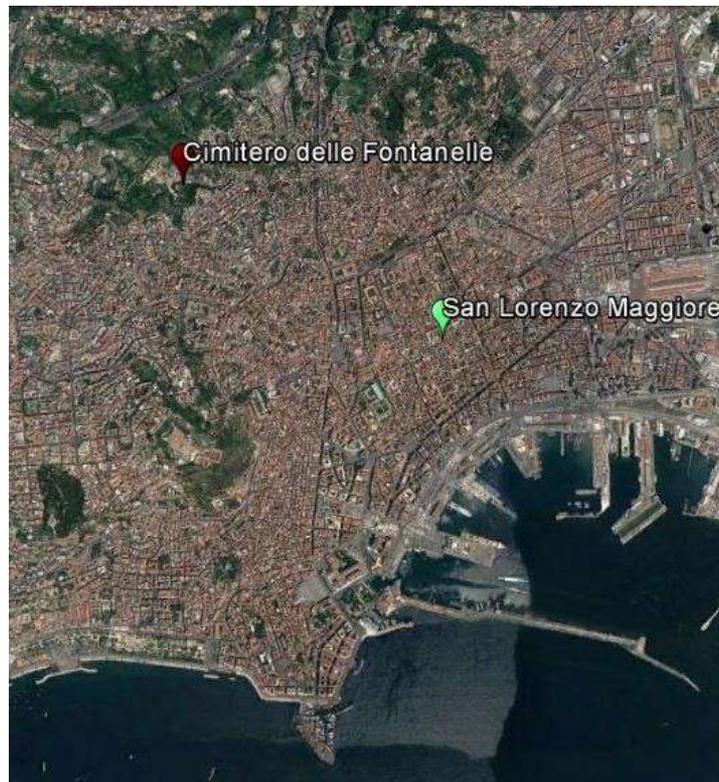


Túnel borbónico



Ágora Morelli

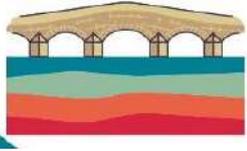
Nápoles y la toba – por debajo



Ruinas romanas bajo San Lorenzo Maggiore

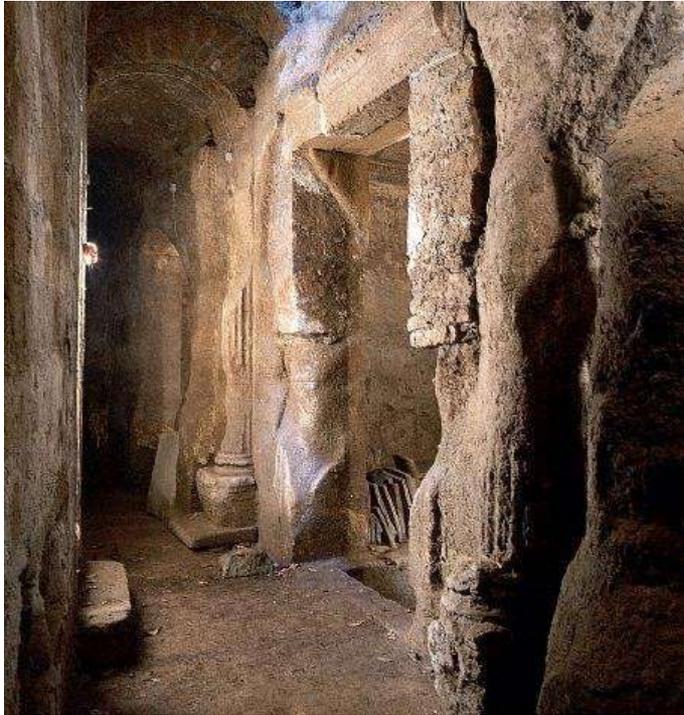


Cementerio de Fontanelle



1. El mundo subterráneo de Nápoles (Italia)
- 2. Problemas de seguridad en espacios subterráneos**
3. Estudio de dos cavidades de gran valor histórico
4. Observaciones finales

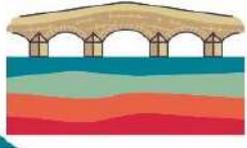
Revisión de la integridad de las cavidades bajo Nápoles



Algunas cavidades están
APARENTEMENTE en buenas
condiciones...

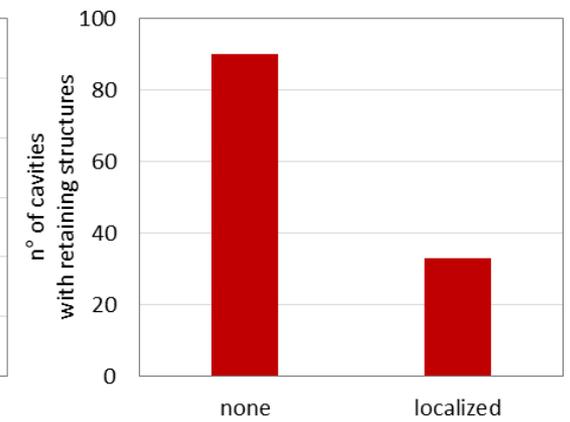
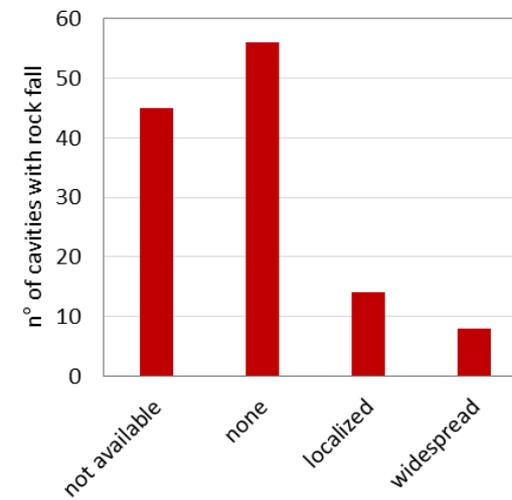
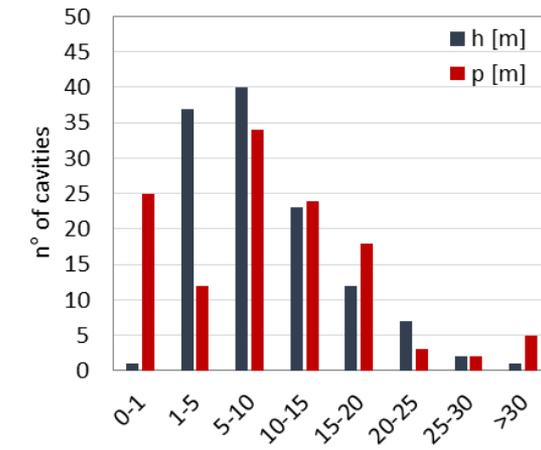
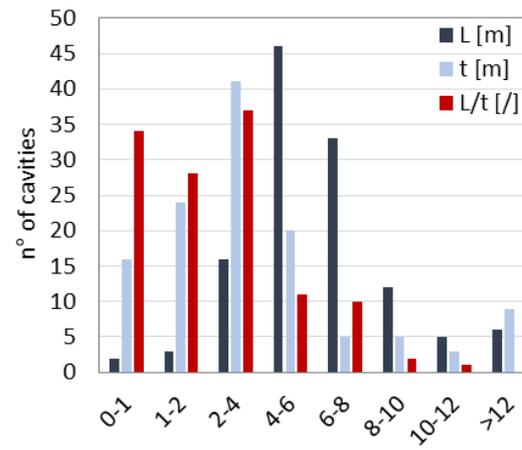
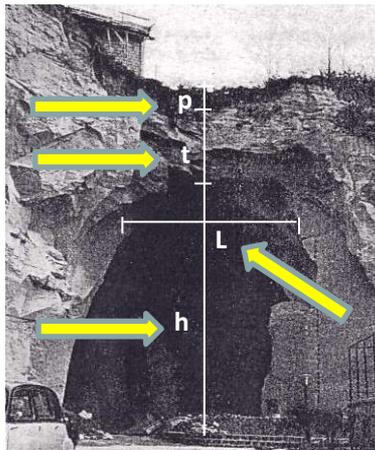


otras definitivamente no!



Revisión de la integridad de las cavidades bajo Nápoles

Estadística de 123 cavidades napolitanas bien conocidas

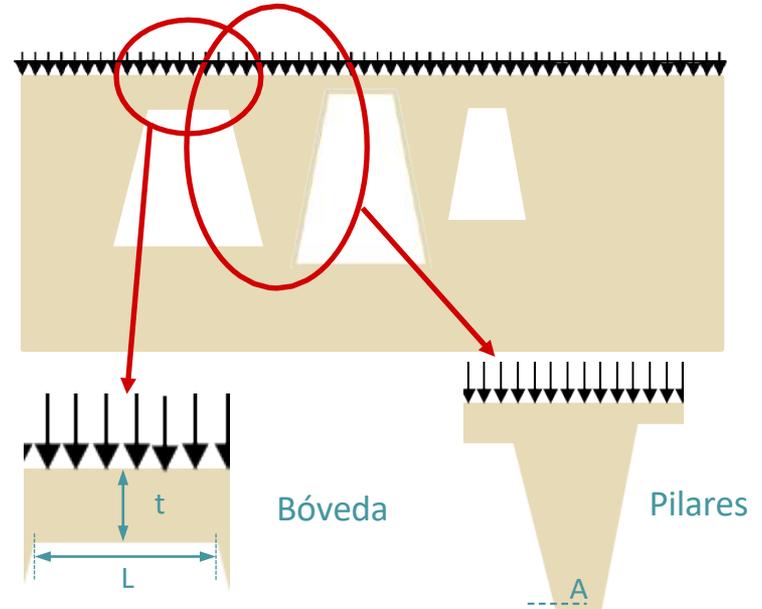
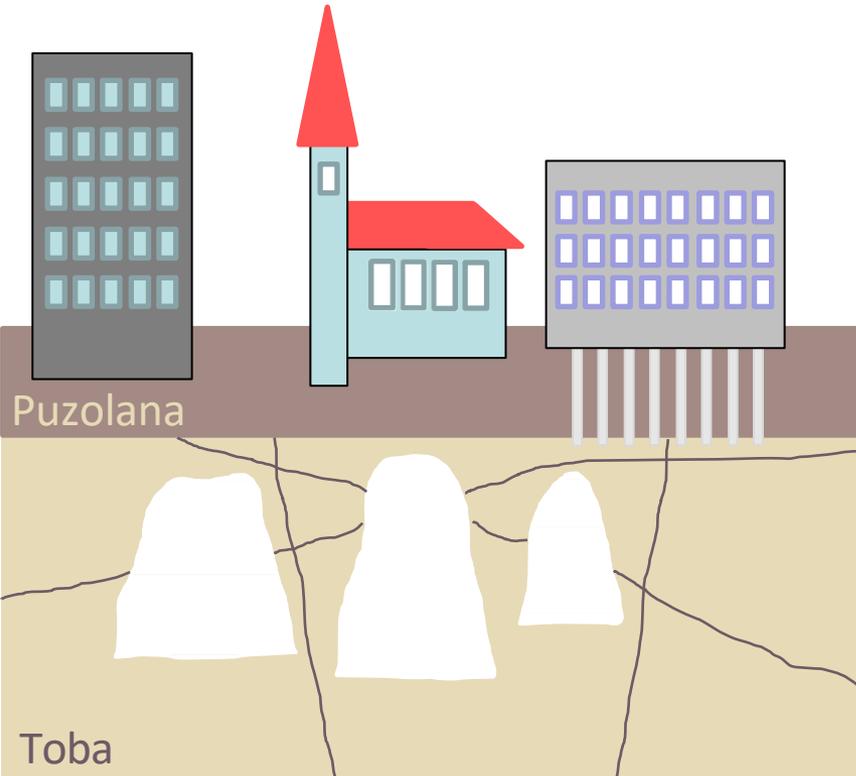


Características principales :

- Geometría irregular
- Bóveda aproximadamente plana
- Fisuras irregulares

Revisión de la integridad de las cavidades bajo Nápoles

Simplificaciones típicas

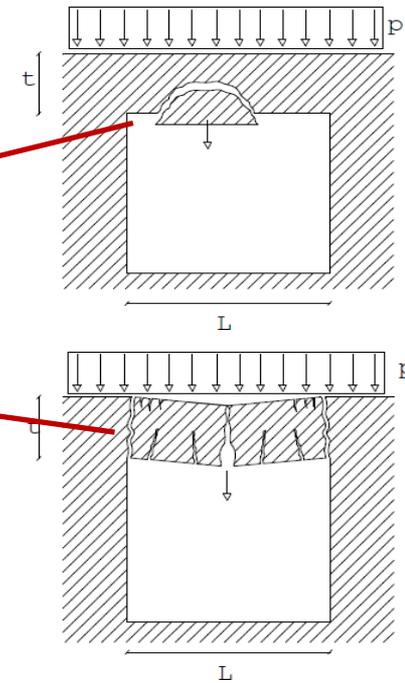
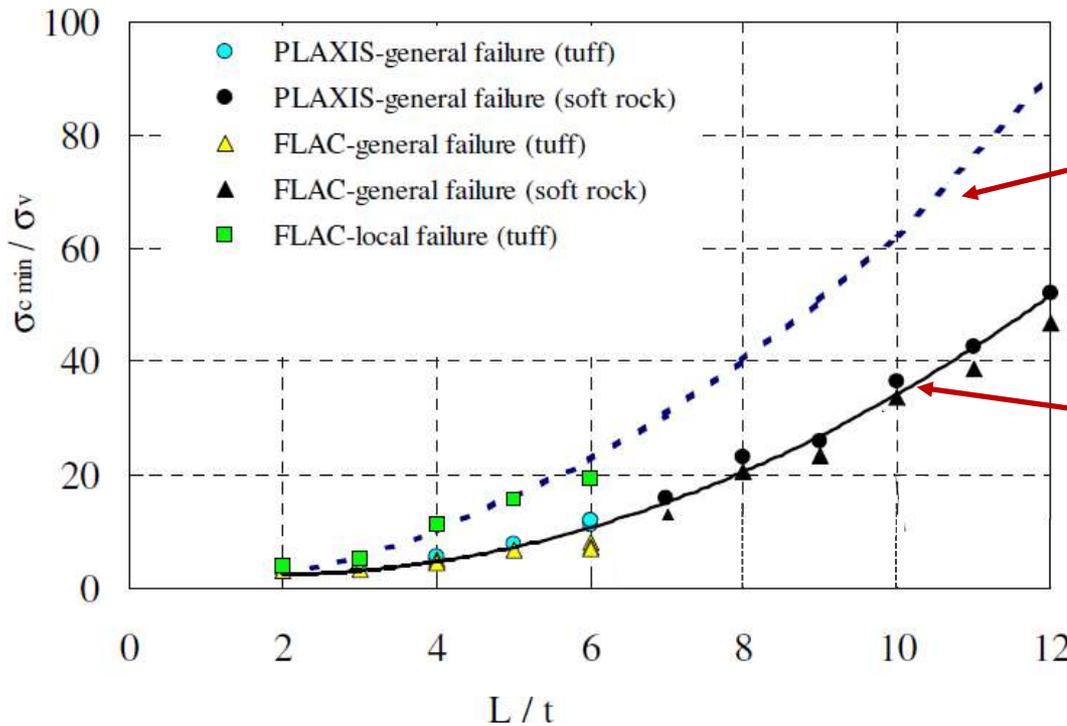


¿Cuán relevantes son estas simplificaciones?



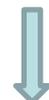
- Simplificar las cargas;
- Considerar una masa de toba homogénea, sin discontinuidades ;
- Simplificar la geométrica de las cavidades, separando el cálculo de bóvedas y pilares.

Controles simplificados de la estabilidad de la bóveda: enfoque determinístico



Falla local de la bóveda

Falla global de la bóveda

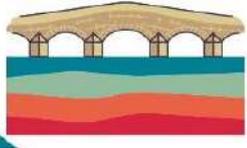


Toba Amarilla Napolitana

- a = 0,34
- b = 2

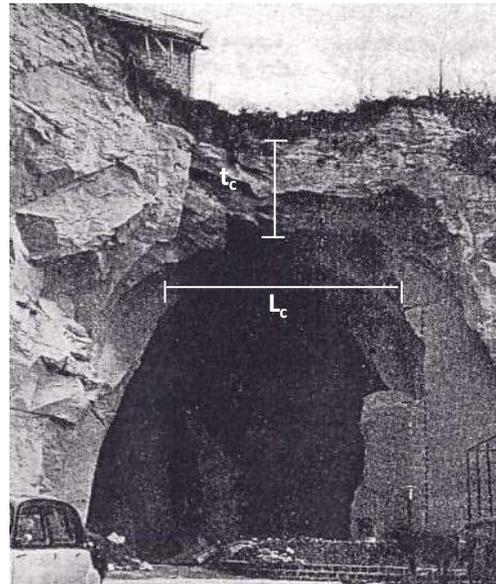
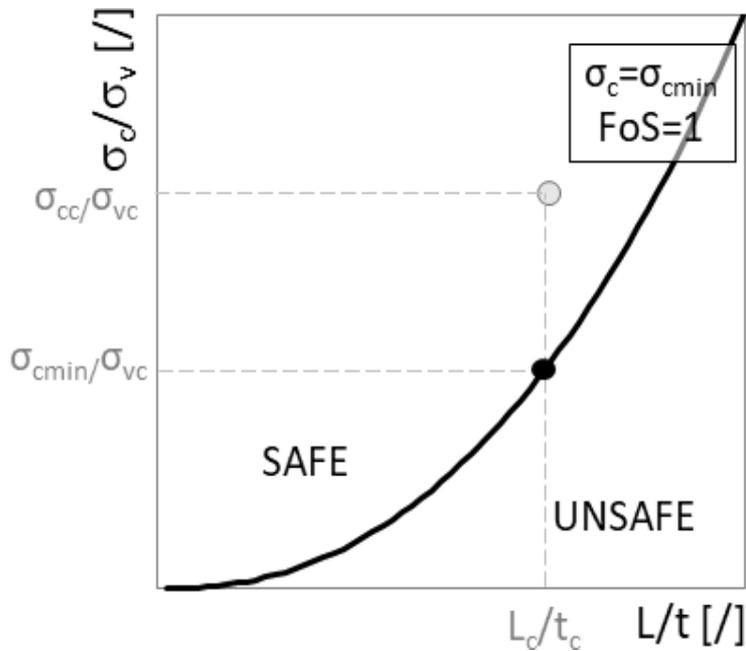
$\sigma_{c, \min}$ = resistencia a la compresión uniaxial mínima de la roca para la estabilidad
 σ_{vc} = tensión litostática vertical

$$\frac{\sigma_{c \min}}{\sigma_v} = a \left(\frac{L}{t} \right)^b$$



Controles simplificados de la estabilidad de la bóveda: enfoque determinístico

Resistencia de la roca constante

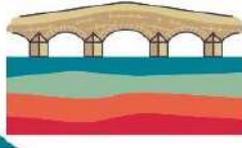


Factor de Seguridad :

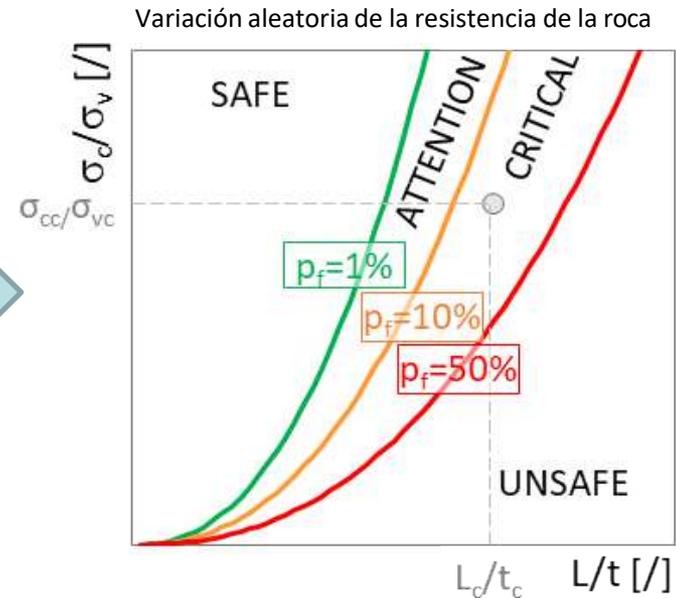
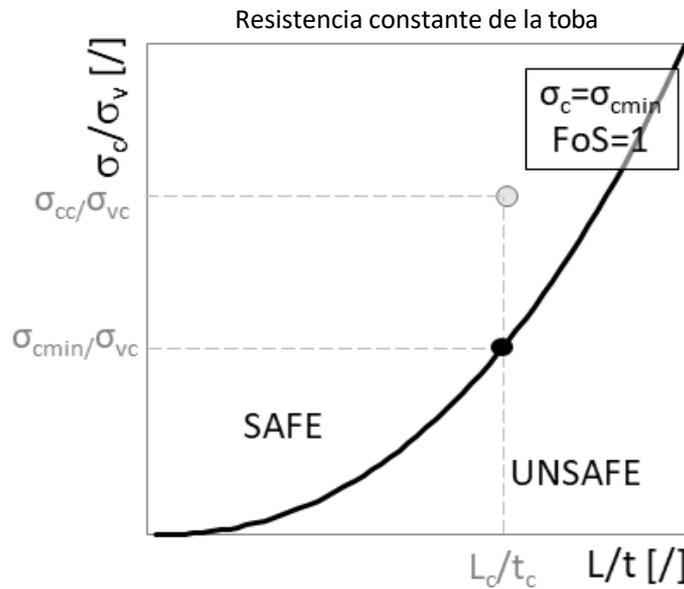
$$FoS = \frac{\sigma_c}{\sigma_{c \min}}$$

Condiciones determinísticas posibles:

- FoS < 1.5 → Colapso
- FoS < 3 → Daños

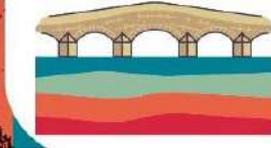


Controles simplificados de la estabilidad de la bóveda: de un enfoque determinístico a uno probabilístico



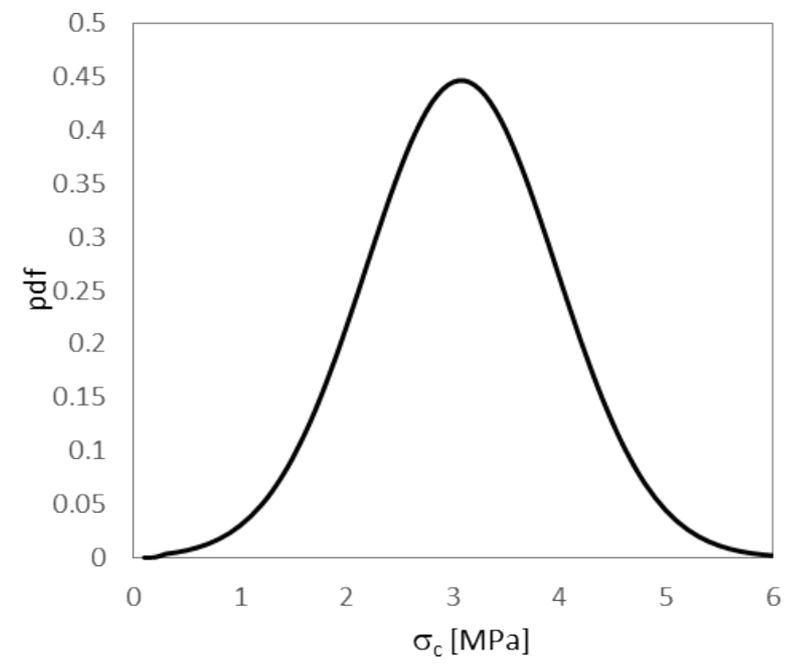
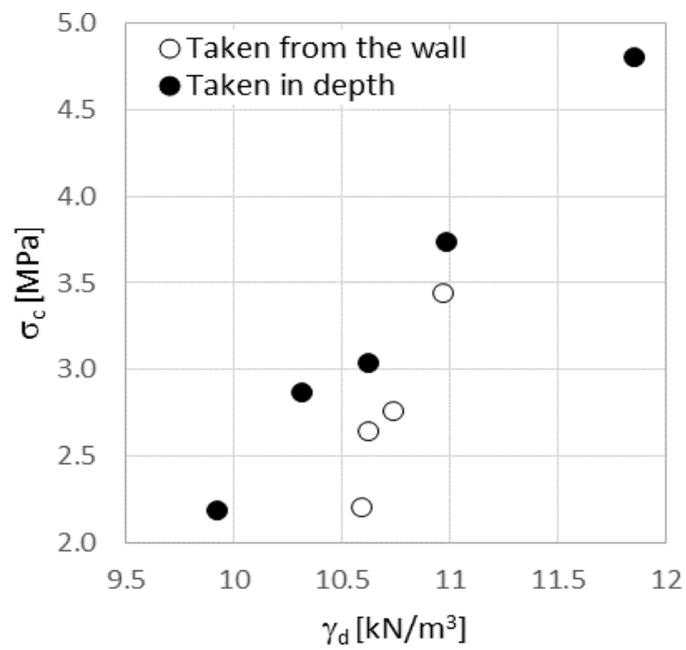
Las curvas de estabilidad pueden calcularse una vez que se tiene en cuenta la variabilidad aleatoria de las variables de interés (por ejemplo la resistencia al corte de la roca):

$$p_f = p[\sigma_{cc}/\sigma_{vc} < \sigma_{cmin}/\sigma_{vc} | L_c/t_c]$$



Controles simplificados de la estabilidad de la bóveda: de un enfoque determinístico a uno probabilístico

Variabilidad aleatoria de la resistencia a la compresión uniaxial de la toba σ_c

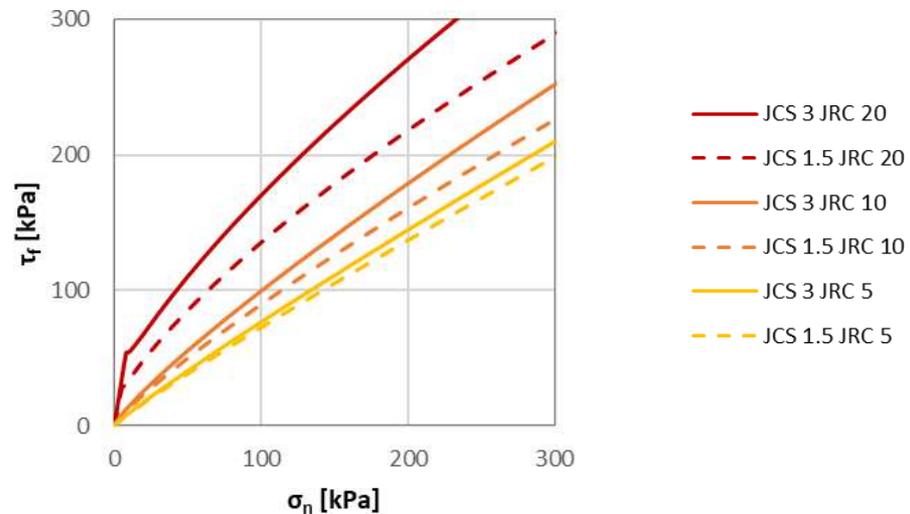


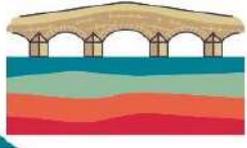
Controles simplificados de la estabilidad de la bóveda: de un enfoque determinístico a uno probabilístico

Presencia de discontinuidades

Resistencia al corte de las juntas de la roca (Barton, 1973):

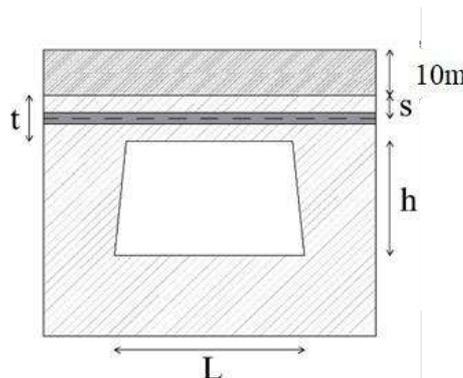
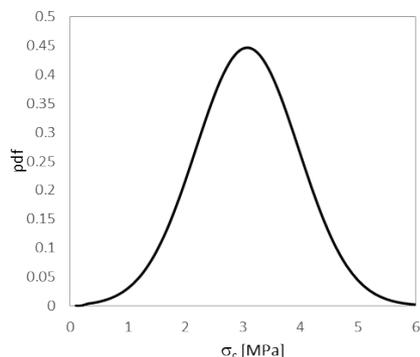
$$\frac{\tau_f}{\sigma_n} = \tan \left(JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + 30^\circ \right)$$





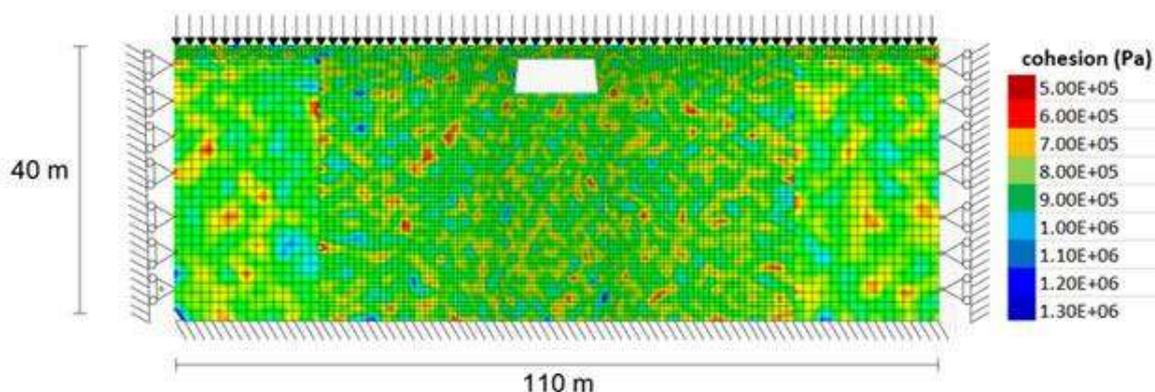
Controles simplificados de la estabilidad de la bóveda: de un enfoque determinístico a uno probabilístico

Análisis numéricos (variabilidad aleatoria de σ_c , variabilidad determinista de s)



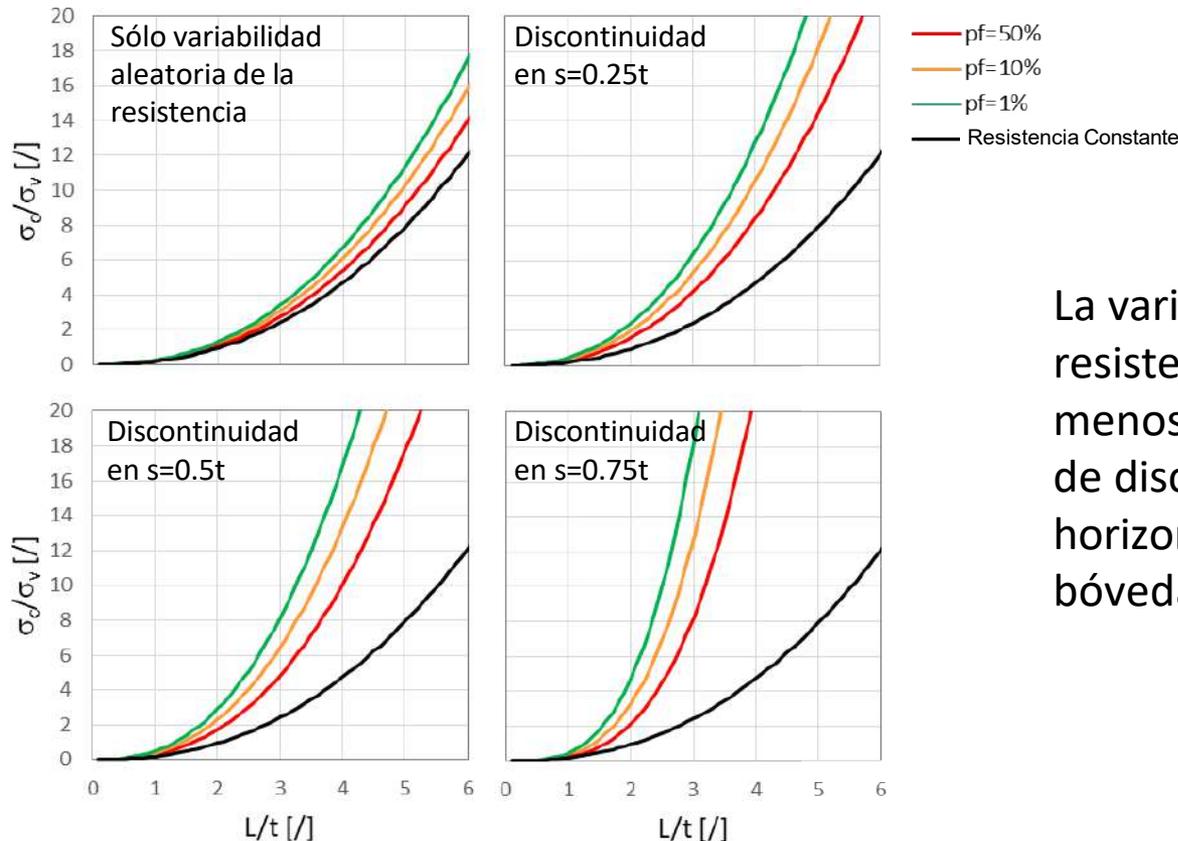
- L (m) = 8, 10, 12, 16, 18
- h (m) = 5
- p (m) = 10
- t (m) = 2, 3, 4
- s (m) = 0.25t, 0.50t, 0.75t

Para cada esquema geométrico,
se ejecutaron 50 análisis
usando una distribución
aleatoria de la resistencia al
corte en el macizo rocoso



Controles simplificados de la estabilidad de la bóveda: de un enfoque determinístico a uno probabilístico

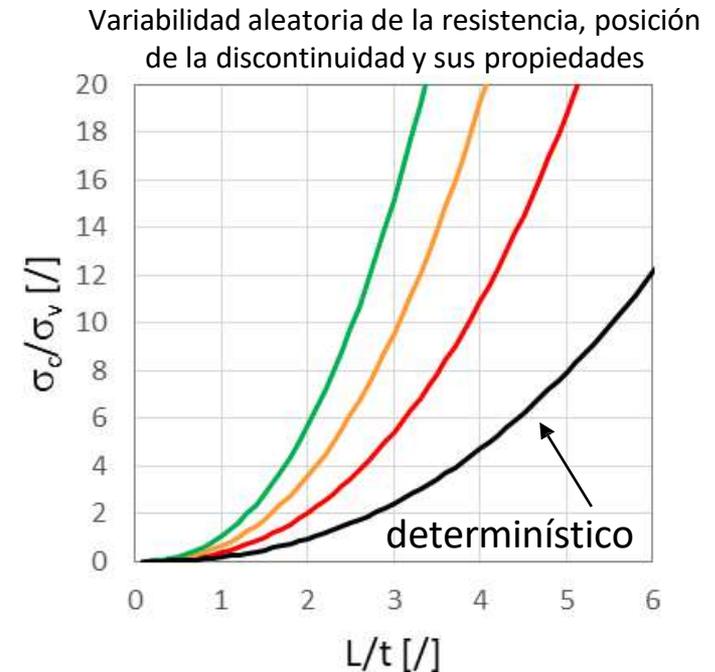
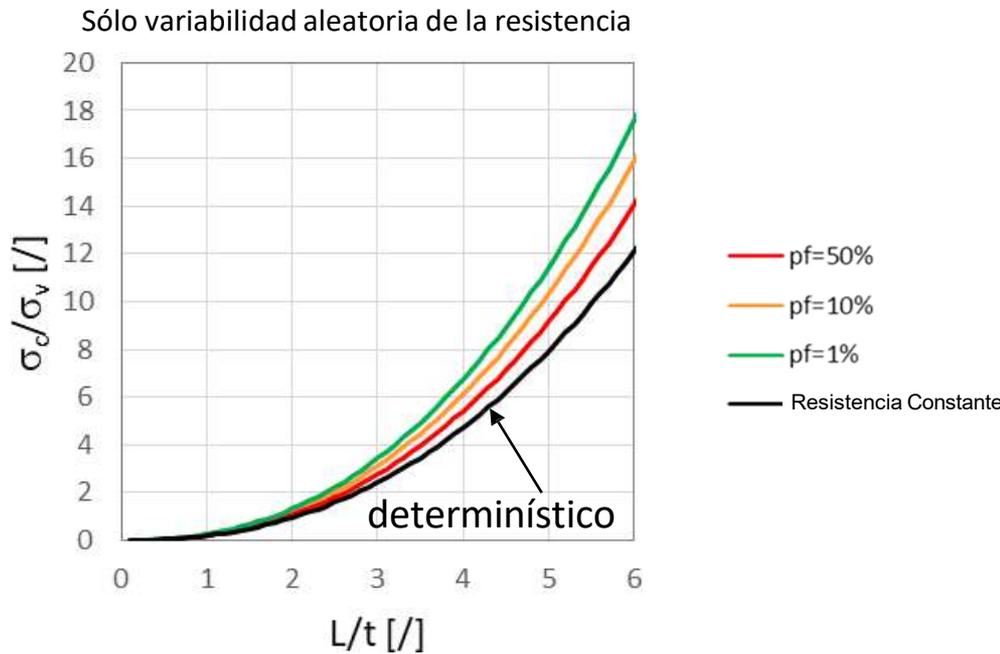
Resultados (variabilidad aleatoria de σ_c , variabilidad determinista de s)



La variabilidad aleatoria de la resistencia de la toba es menos crítica que la existencia de discontinuidades horizontales (juntas) en la bóveda de la cavidad

Controles simplificados de la estabilidad de la bóveda: enfoque probabilístico

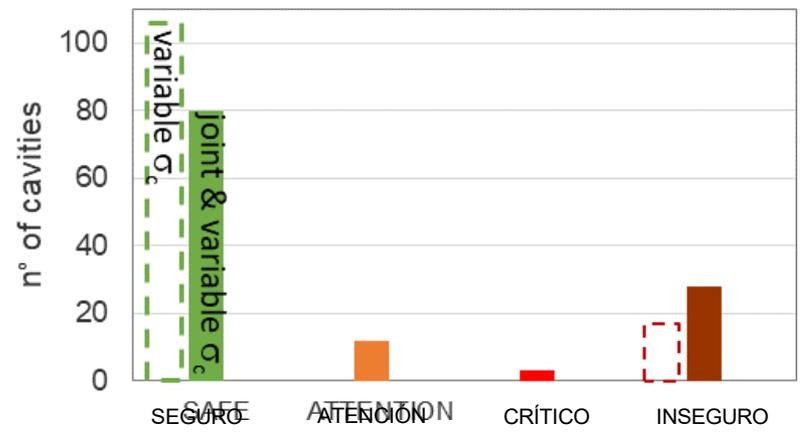
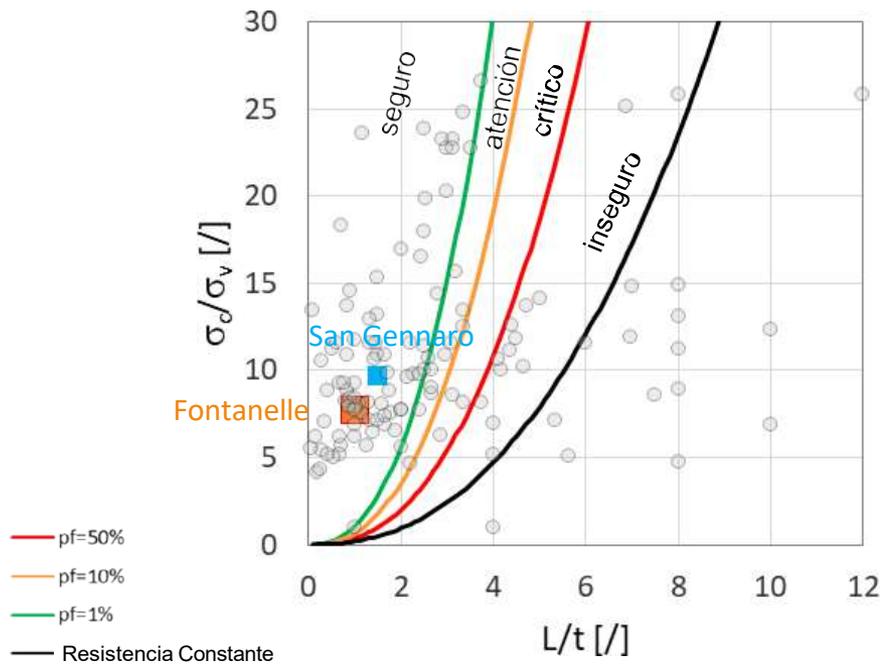
Resultados (variabilidad aleatoria de σ_c , de la posición de la discontinuidad y de las propiedades)

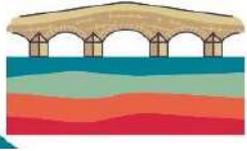


Controles simplificados de la estabilidad de la bóveda: enfoque probabilístico

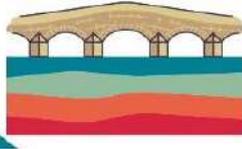
Aplicación en 123 cavidades en Nápoles

Variabilidad aleatoria de la resistencia, posición de la discontinuidad y sus propiedades





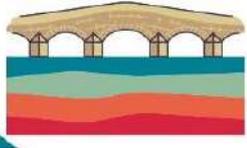
1. El mundo subterráneo de Nápoles (Italia)
2. Problemas de seguridad en espacios subterráneos
- 3. Estudio de dos cavidades de gran valor histórico**
4. Observaciones finales



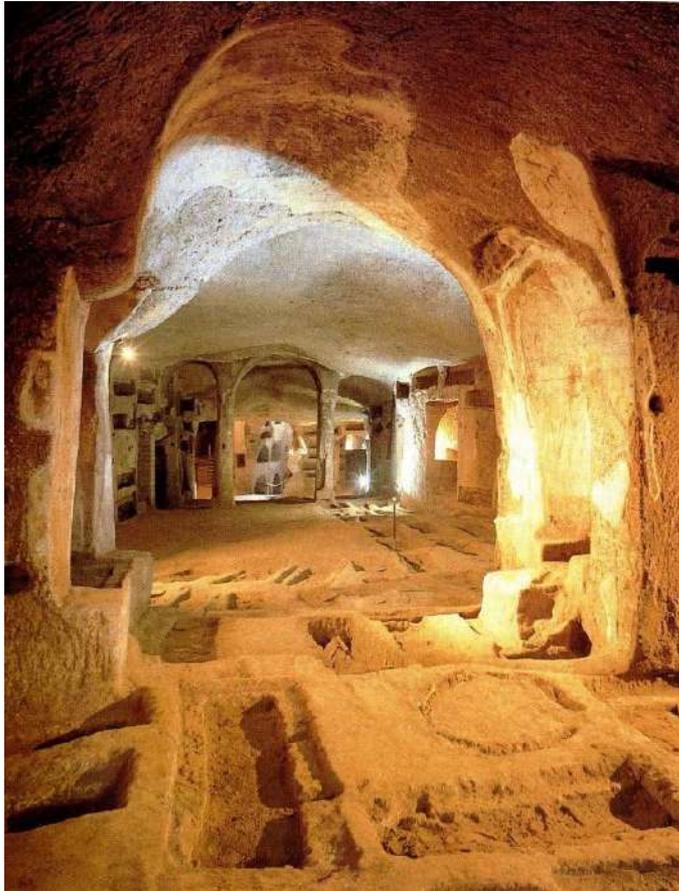
Las catacumbas de San Genaro en Nápoles (Italia)

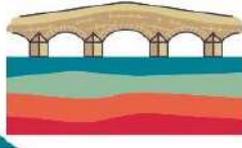
(Siglo II d.C.)





Catacumbas de San Genaro





Catacumbas de San Genaro

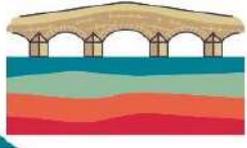
Problemáticas

Necesidad de colocar la entrada a las catacumbas en su posición original (actualmente los visitantes entran por la parte de atrás).

Aumentar el número de salas que pueden visitarse, revisando las condiciones de seguridad de las zonas actualmente en desuso.

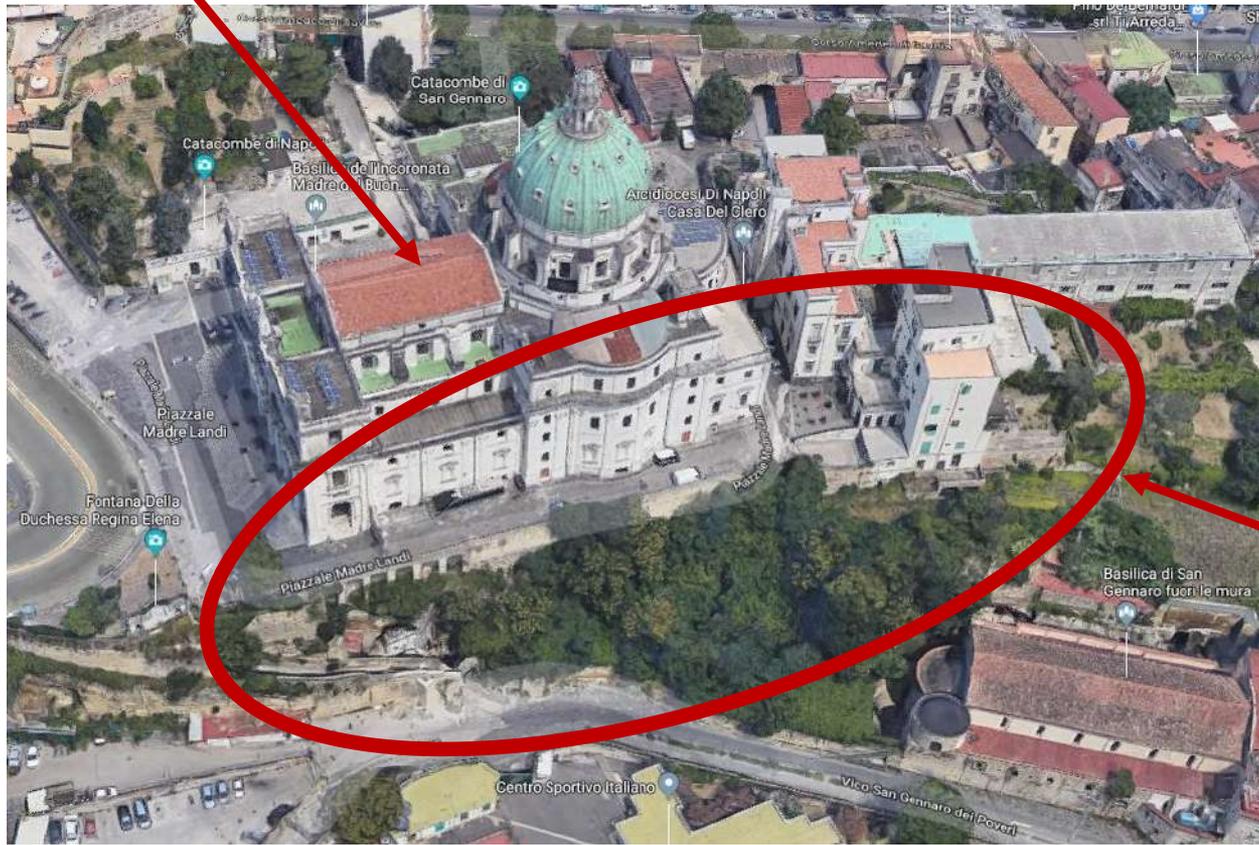
Intervenciones de reacondicionamiento (si es necesaria) para garantizar la seguridad

Reducir las intervenciones al mínimo (respetando su integridad)



Catacumbas de San Genaro

Iglesia de la Inconornata Madre del Buonconsiglio

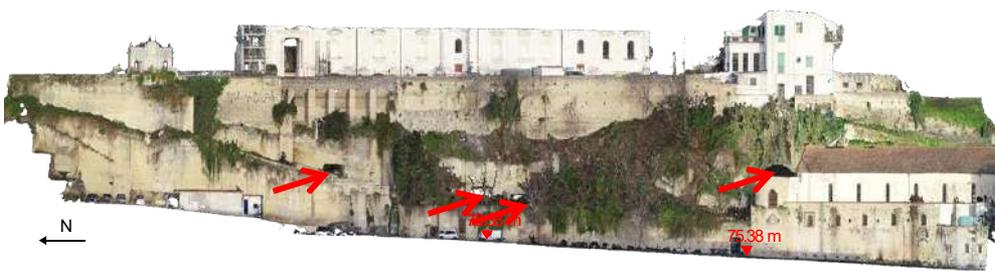


Catacumbas

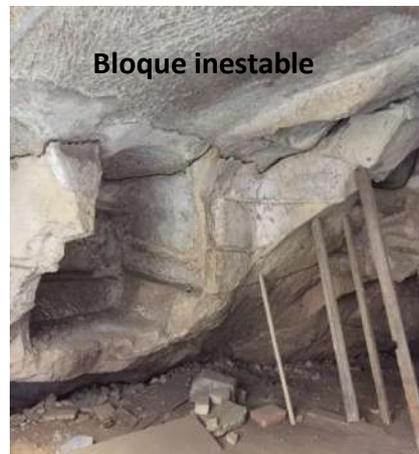
Catacumbas de San Genaro

Parte de las catacumbas aún no abierta a los visitantes

- Perforación & Down-Hole
- ▼ Ensayo de penetración dinámica (DPSH)
- ➔ Entrada de la cavidad no utilizada



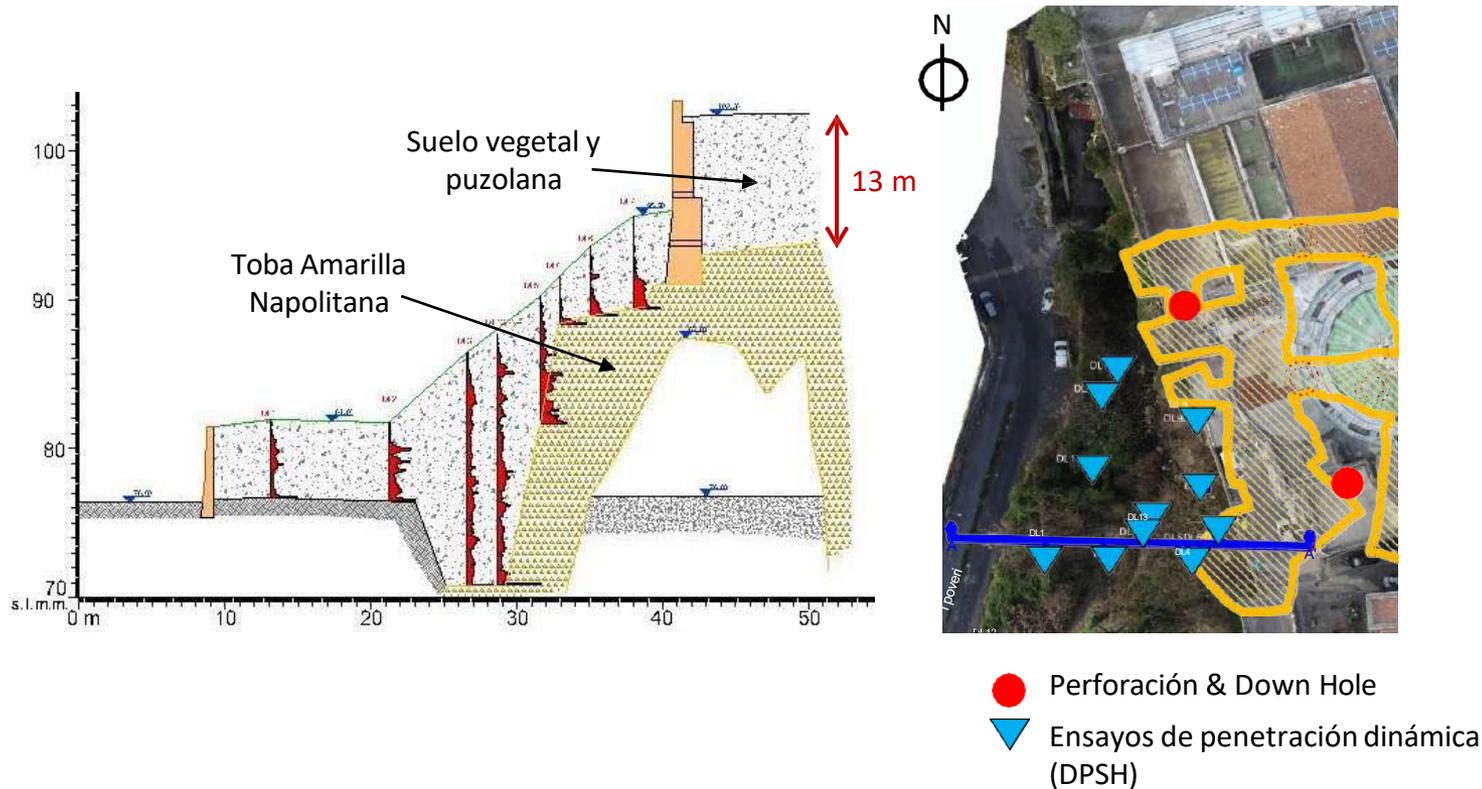
Catacumbas de San Genaro

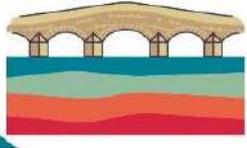


➔ Entrada de la cavidad no utilizada

Catacumbas de San Genaro

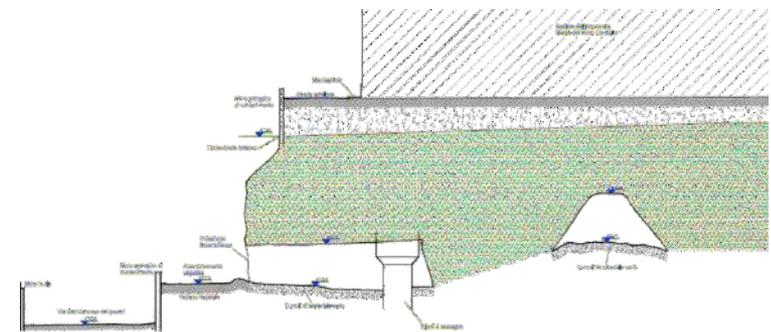
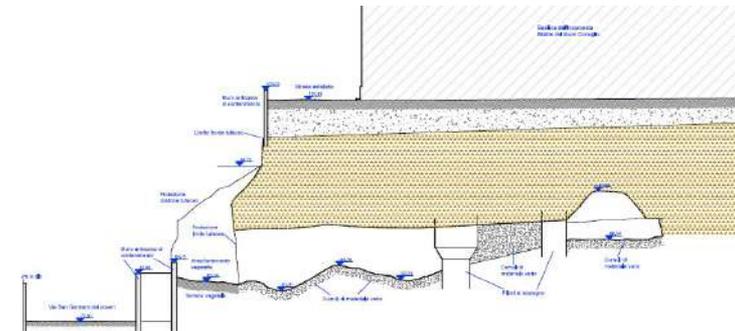
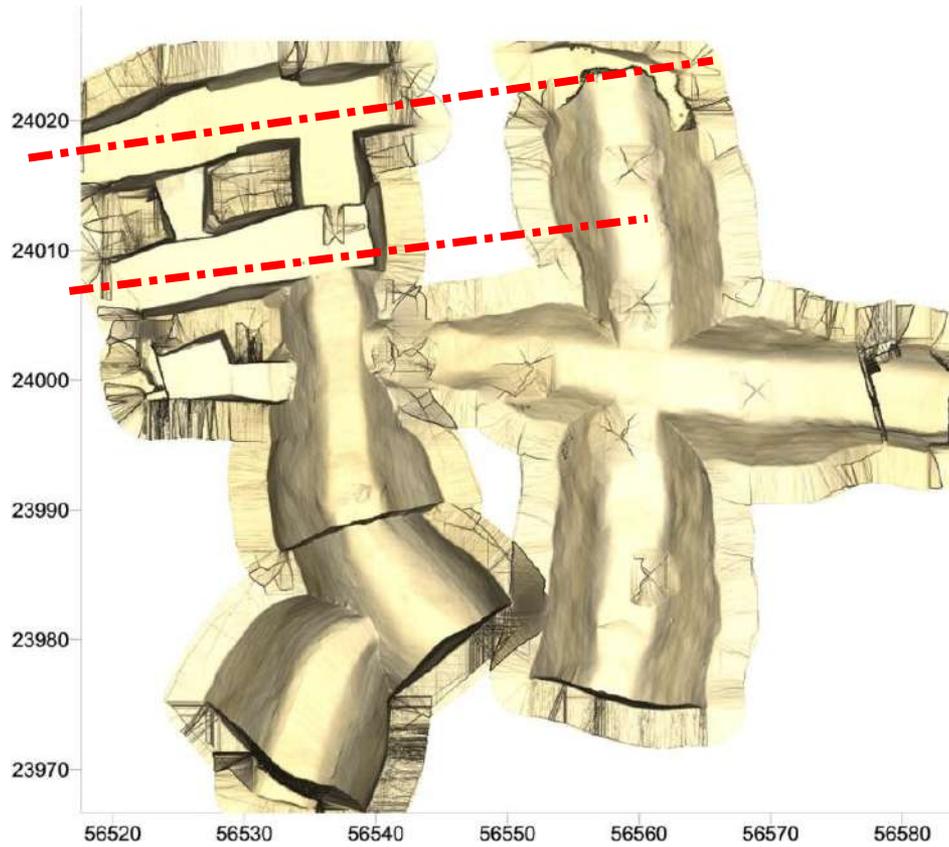
Detección de la profundidad de la toba mediante DPSH





Catacumbas de San Genaro

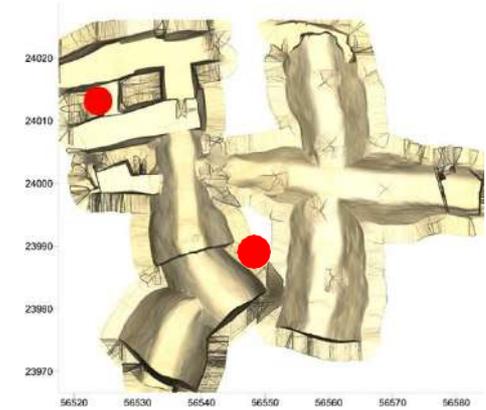
Escaneo láser 3D de la cavidad



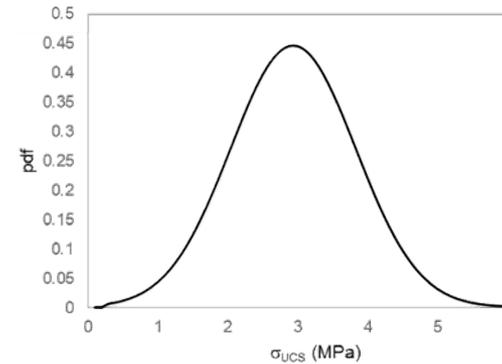
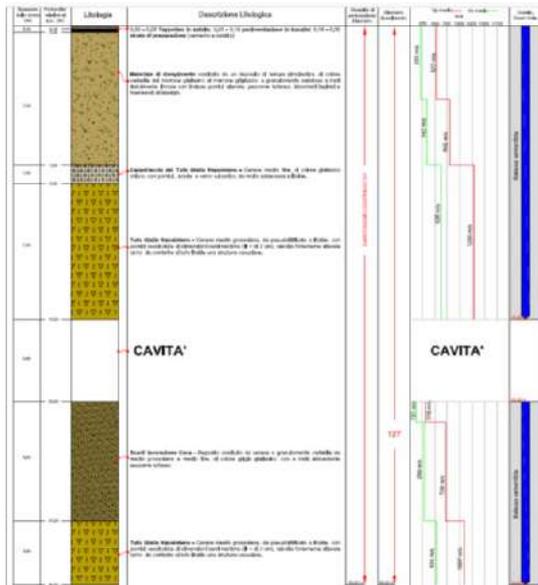
Catacumbas de San Genaro

Propiedades mecánicas de la toba

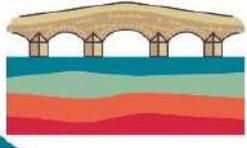
- Densidad medida en laboratorio a partir de muestras tomadas in situ
- Resistencia a la compresión no confinada en especímenes tomados in situ
- Rigidez desde ensayos Down-Hole



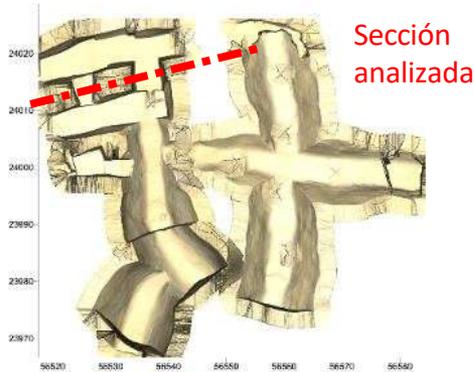
● Perforación & Down Hole



Media σ_{UCS} y desviación estándar δ de la distribución gaussiana calibradas de datos de compresión no confinada



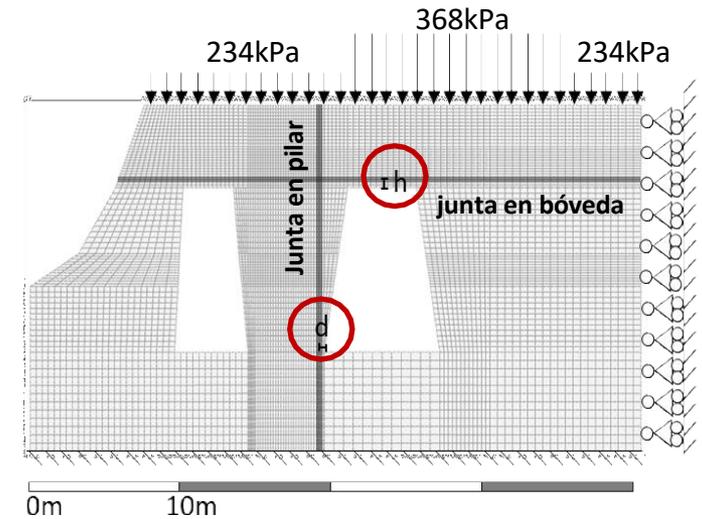
Catacumbas de San Genaro



Sección analizada

Modelo numérico

	γ	G	K	ϕ	c	σ_{UCS}	δ	σ_t
	kN/m ³	MPa	MPa	°	kPa	kPa	kPa	kPa
Roca	12	491	1431	28	882	2936	259	147
Junta	12	491	1431	20	0	0	/	0



ANÁLISIS

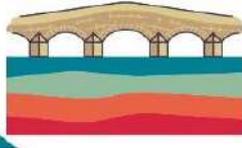
Toba → Mohr Coulomb con variabilidad espacial aleatoria de σ_{UCS}

Toba → Mohr Coulomb con σ_{UCS} constante

Discontinuidad en la bóveda de toba a una distancia h variable → Ubiquitous joint

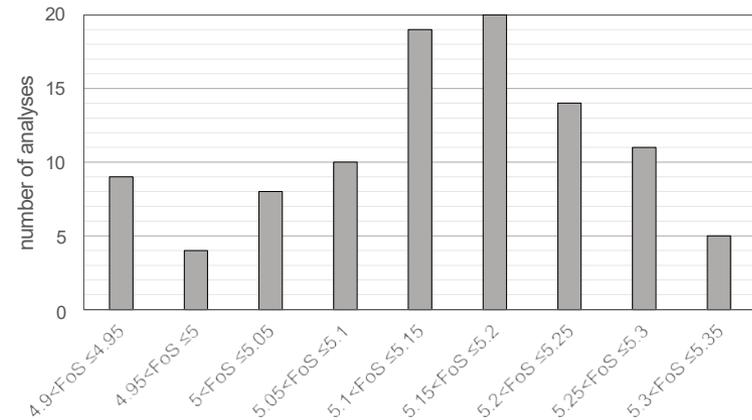
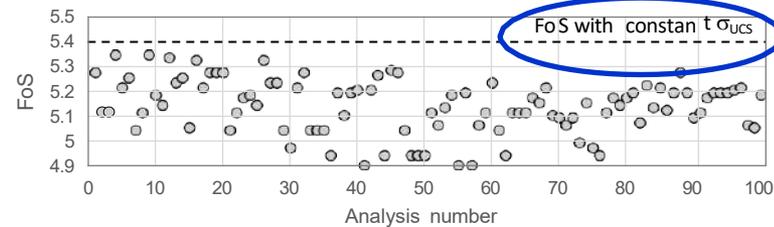
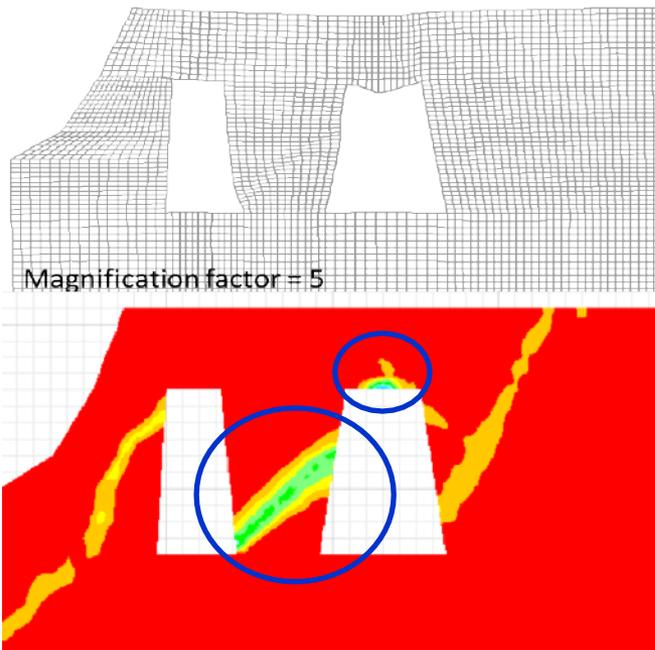
Toba → Mohr Coulomb con σ_{UCS} constante

Discontinuidad en el pilar de toba a una distancia d variable → Ubiquitous joint



Catacumbas de San Genaro

Toba → Mohr Coulomb con variabilidad espacial aleatoria de σ_{UCS}



- El FdS presenta una reducción menor ($\approx 10\%$ de la media) teniendo en cuenta la variabilidad espacial. No es crítico en este caso debido al alto valor de FdS (no siempre es así)
- El colapso global de la cavidad depende sobre todo de la posible falla por corte del pilar central
- Se produce una falla de tracción local en la bóveda antes de la falla global (potencialmente peligroso)

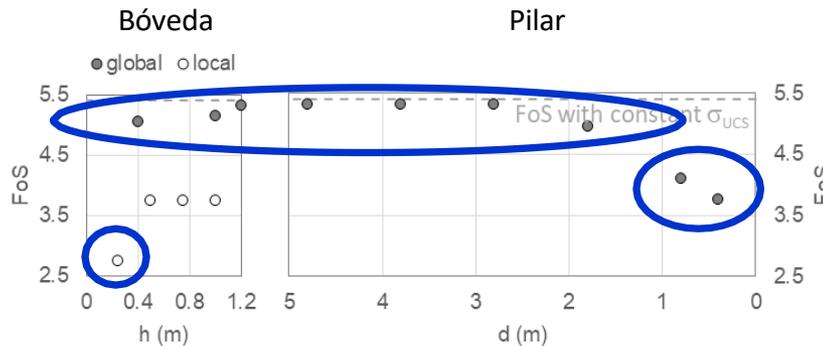
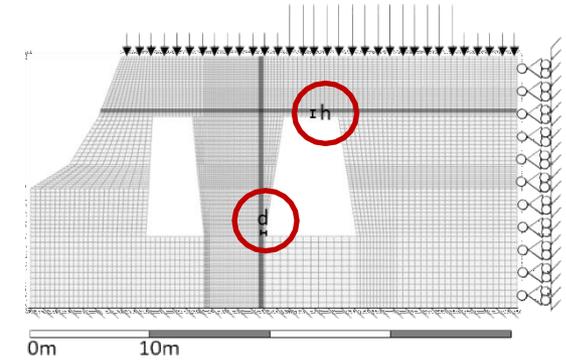
Catacumbas de San Genaro

Toba → Mohr Coulomb con σ_{UCS} constante

Discontinuidad en la bóveda de toba a una distancia h variable → Ubiquitous joint

Toba → Mohr Coulomb con una constante σ_{UCS}

Discontinuidad en el pilar de toba a una distancia d variable → Ubiquitous joint



- La reducción global del FdS debida a las discontinuidades es comparable a la inducida por la variabilidad espacial de σ_{UCS}
- El FdS para la falla de tracción local puede llegar a ser crítico para las discontinuidad horizontales cercanas a la bóveda
- El FdS para la falla global se reduce sobre todo para una discontinuidad vertical cercana al lado interior del pilar

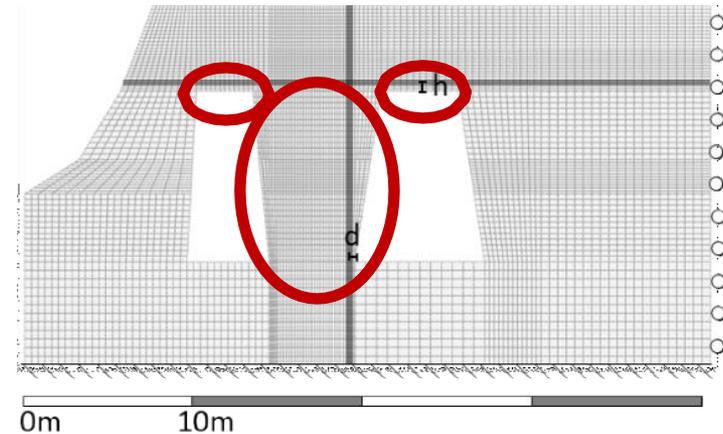
Catacumbas de San Genaro

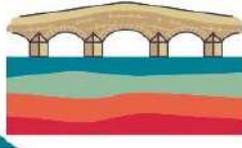
Consideraciones finales e intervenciones propuestas

Los controles de seguridad detallados, teniendo en cuenta las posibles variabilidades e incertidumbres, han demostrado que no hay riesgo de colapso global de la cavidad
(conocimiento exhaustivo)

Se adoptarán clavos de acero inoxidable (con protecciones de teflón para la toba) para reforzar el pilar central, que es el soporte vertical crítico de la cavidad
(intervención mínima y reversible)

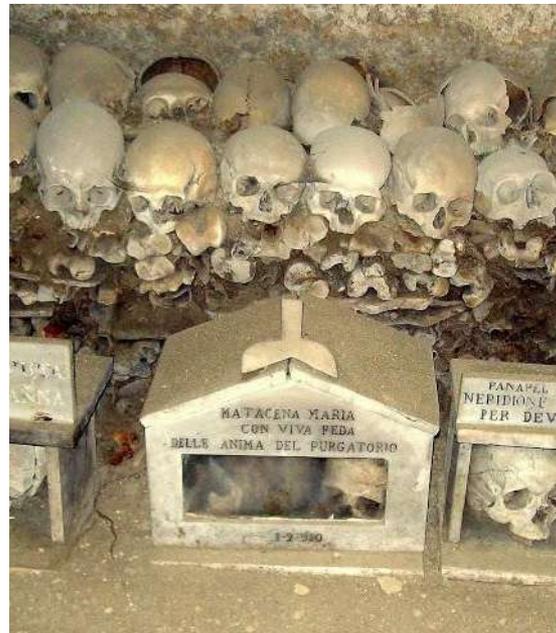
Se colocará una red de seguridad en el techo para proteger a los visitantes de la caída de pequeños bloques
(intervención mínima y reversible)





El cementerio de Fontanelle en Nápoles (Italia)

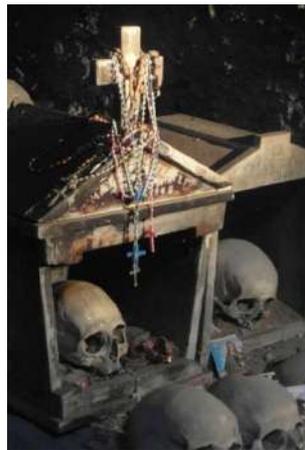
(Siglo XVII d.C.)



El cementerio de Fontanelle



El cementerio de Fontanelle



Donna Concetta

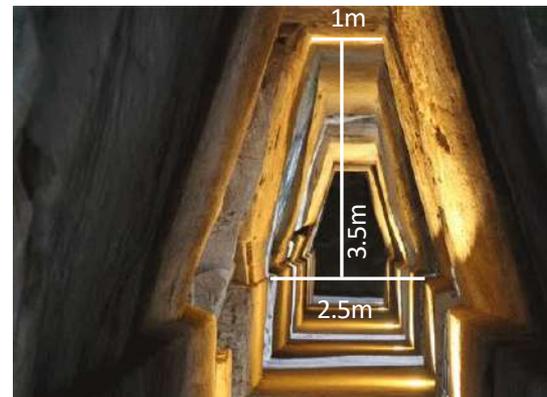
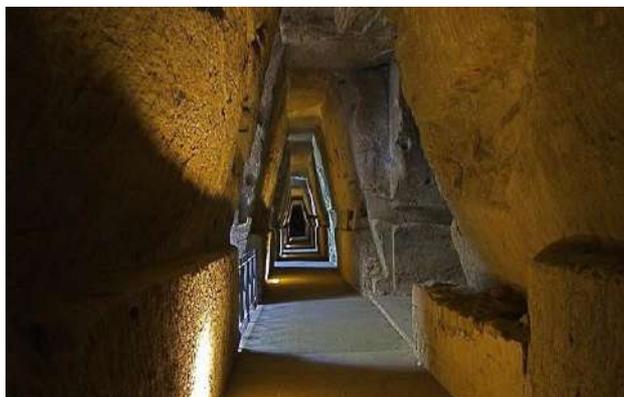


el capitán

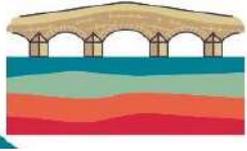
El cementerio de Fontanelle



Originalmente una cantera romana, excavada con la típica forma trapezoidal



Cueva de la Sibila, Cuma (cerca de Nápoles, Italia), VII seg. A.C.



El cementerio de Fontanelle

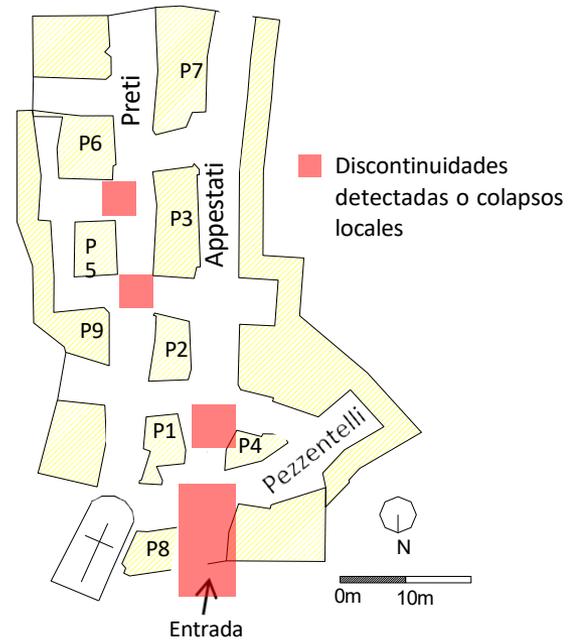
Problemáticas

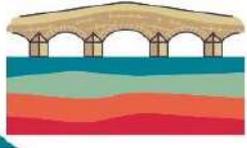
Necesidad de abrir el patrimonio a grupos de visitantes más grandes

Completar las intervenciones de reacondicionamiento y mejora de la bóveda de la cavidad para garantizar su seguridad

Reducir las intervenciones al mínimo

El cementerio de Fontanelle

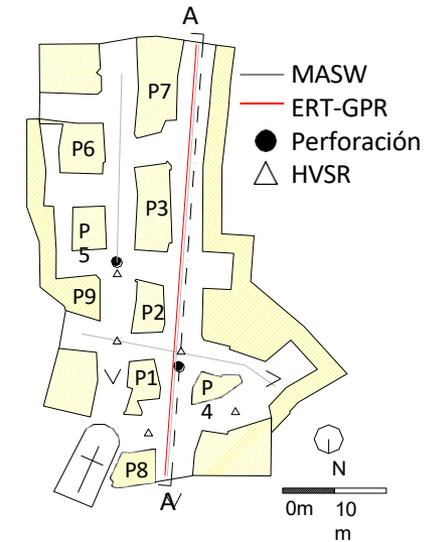
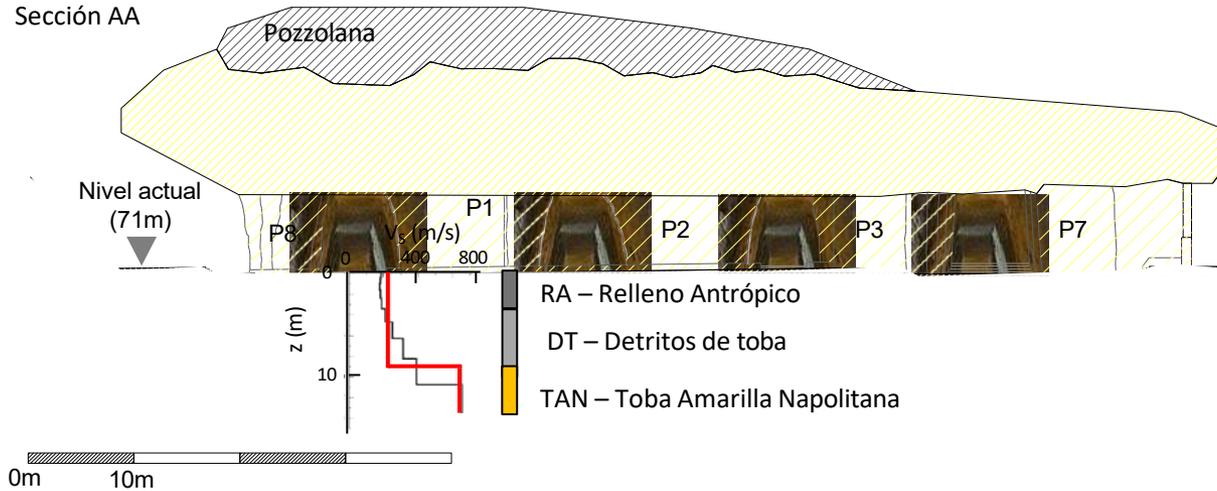




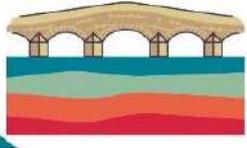
El cementerio de Fontanelle

Caracterización geotécnica

Sección AA



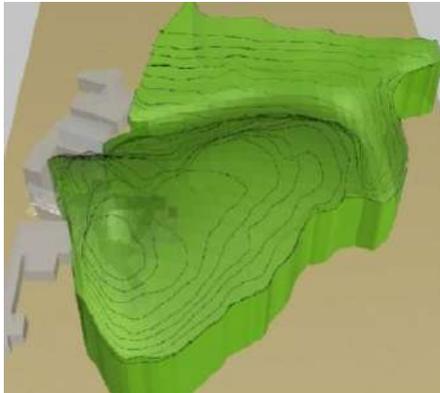
Materiales	γ_v (kN/m ³)	E (MPa)	ν (-)	ϕ (°)	c (kPa)
Puzolana	15.0	336	0.3	33	15
TAN	14.0	1420	0.17	29*	800*
RA y DT	13.0	122	0.37	25	7



El cementerio de Fontanelle

Relevamiento geométrico 3D con escáner láser

Relieve desde curvas de nivel



Forma de la cavidad desde relevamiento con escáner láser



Nube de puntos relevada del pilar P4

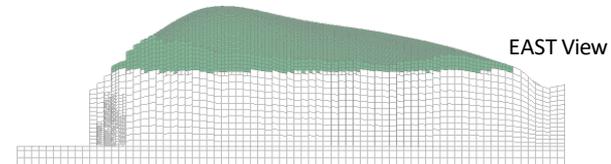
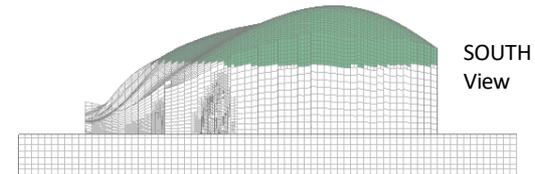
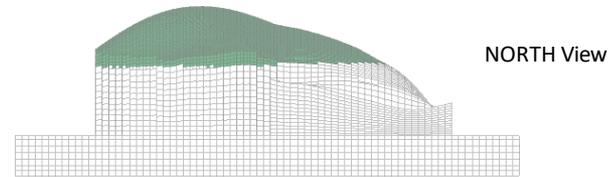
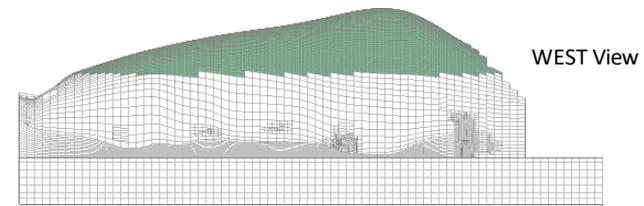
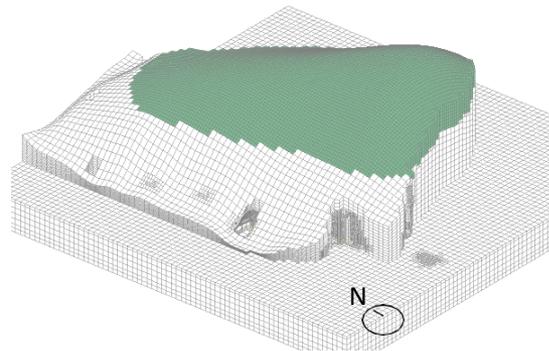
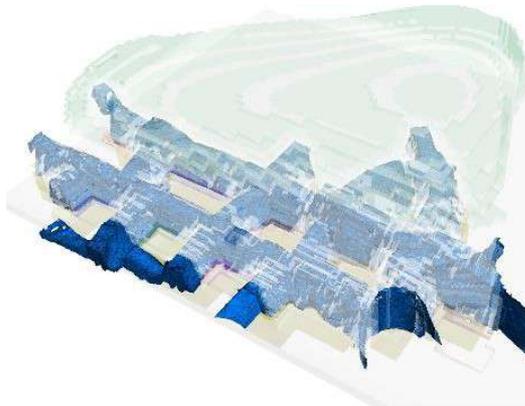


Nube de puntos relevada de toda la cavidad



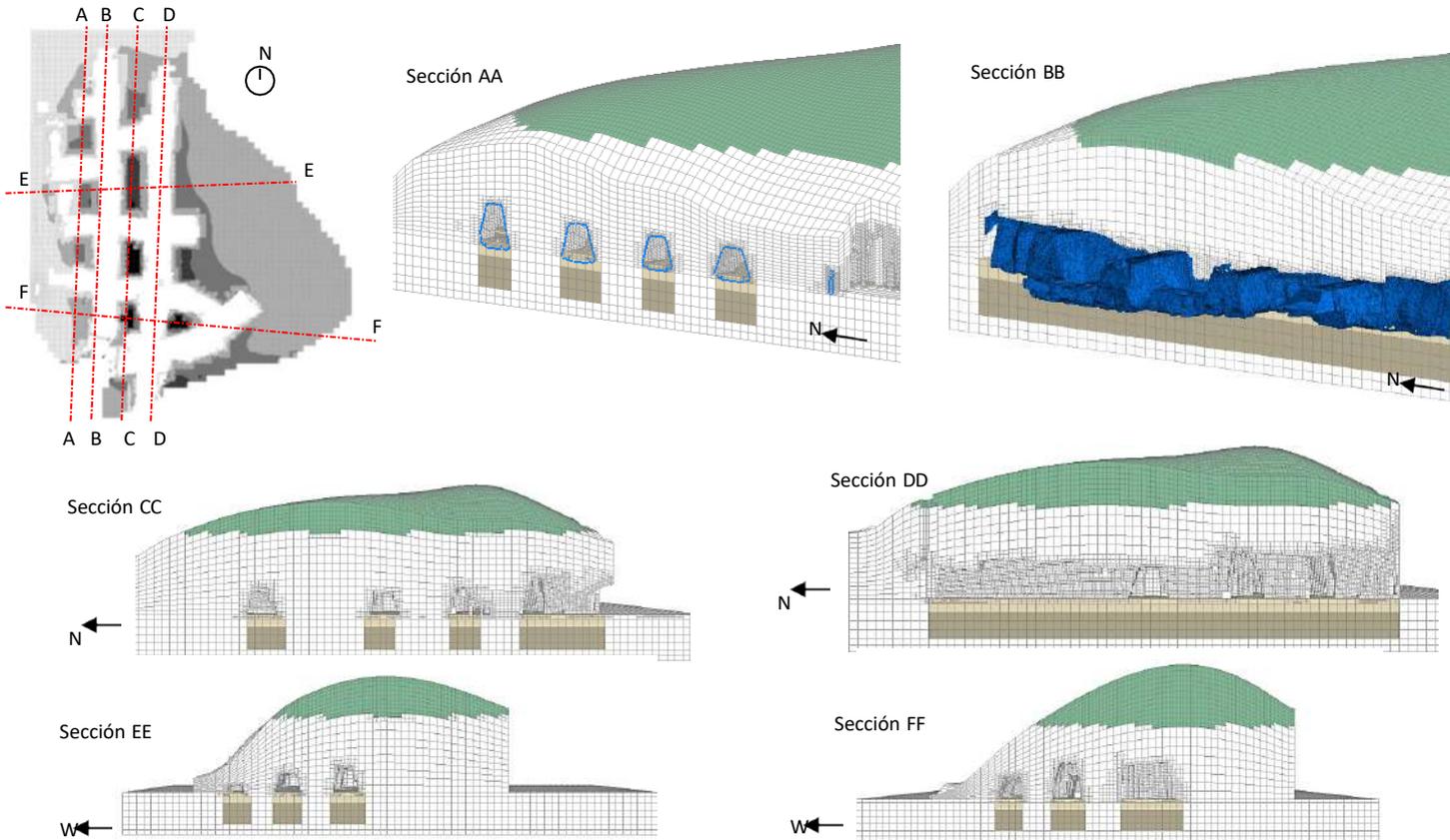
El cementerio de Fontanelle

Modelo geométrico avanzado



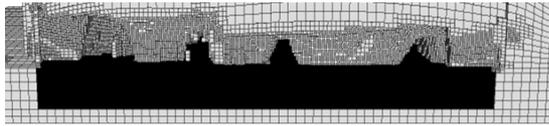
El cementerio de Fontanelle

Modelo geométrico avanzado



El cementerio de Fontanelle

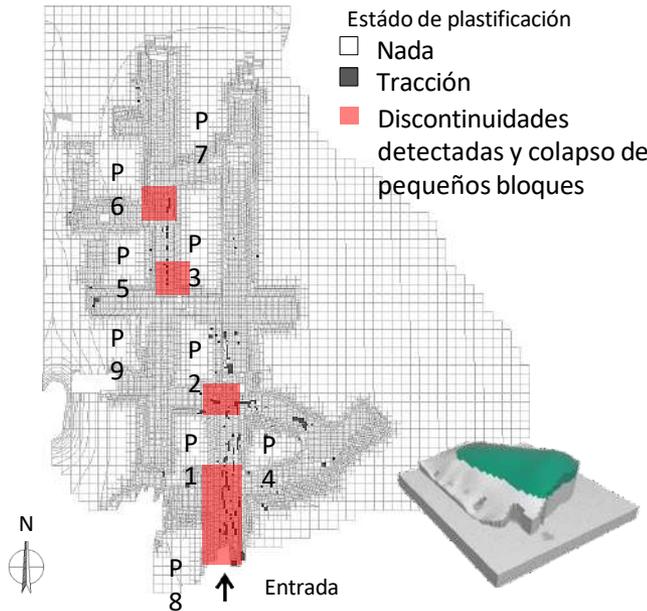
Efecto de la forma de la bóveda en mecanismos de falla locales

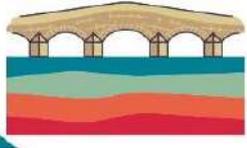


Bóveda de forma "realista"



Falla localizada





El cementerio de Fontanelle

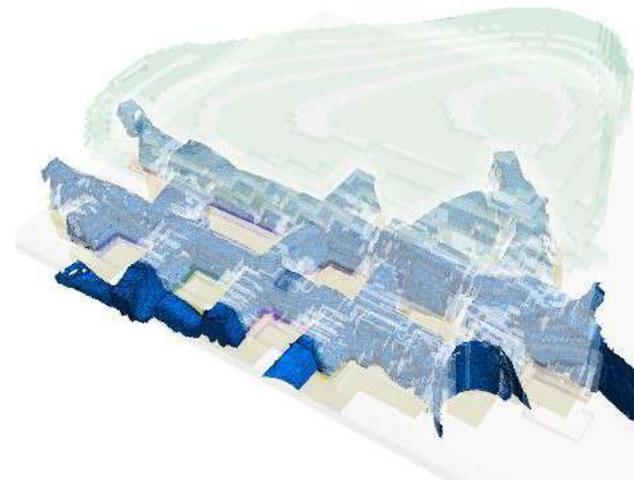
Consideraciones finales e intervenciones propuestas

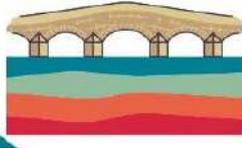
Relevamiento 3D detallado, combinado con investigaciones geológicas y geotécnicas, en busca de construir un modelo numérico preciso

La introducción en el modelo numérico de detalles aparentemente menores, como la ligera curvatura de la bóveda, haría los resultados de las simulaciones numéricas más realistas.

en este caso, el modelo simplificado (incluso probabilístico) da una mala estimación de las condiciones de seguridad en relación con el fallo local de la bóveda.

Se colocará una red de seguridad en el techo para proteger a los visitantes de la caída de pequeños bloques
(intervención mínima y reversible)





1. El mundo subterráneo de Nápoles (Italia)
2. Problemas de seguridad en espacios subterráneos
3. Estudio de dos cavidades de gran valor histórico
- 4. Observaciones finales**

Observaciones finales

1. las verificaciones simplificadas de la estabilidad de las bóvedas y los pilares de las cavidades son útiles para un análisis a escala urbana.
2. Al introducir la variabilidad aleatoria de la resistencia de la toba y las características de las grietas, el análisis de estabilidad de las bóvedas de cavidad puede ser más fiable.
3. En el caso de cavidades de gran interés histórico, deben realizarse análisis más complejos.
4. Las medidas de preservación tiene que ser:
 - Solo las necesarias
 - Poco invasivas
 - Posiblemente reversibles

¡Toma tu tiempo y poné especial cuidado en la investigación, monitoreo y diseño!

En todos los casos, es esencial compartir la responsabilidad de la selección de alternativas con expertos de diversas disciplinas.