

ESTUDIOS DE BIOMINERALIZACIÓN BACTERIANA PARA LA CONSOLIDACIÓN DEL TAJO DE SAN PEDRO

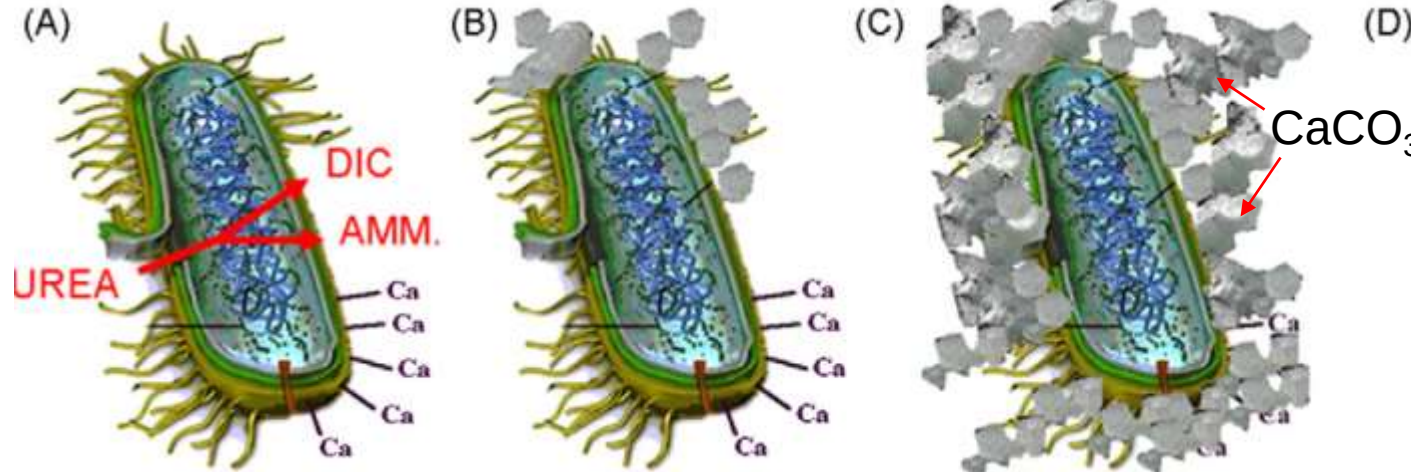
Carlos Rodriguez-Navarro y Kerstin Elert



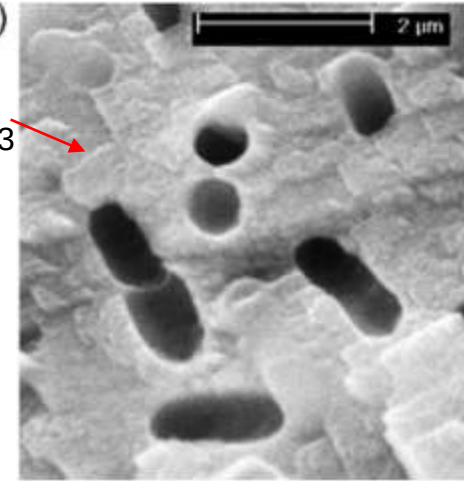
Departamento de Mineralogía y Petrología
Universidad de Granada



Biomineralización bacteriana

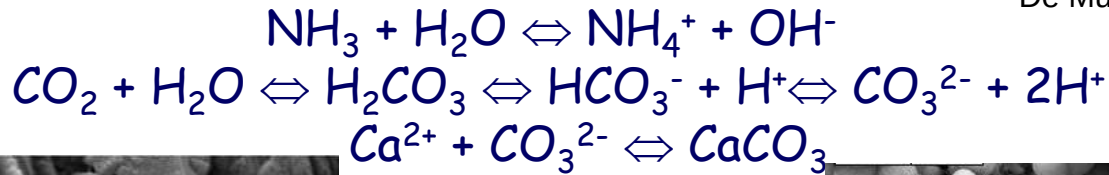


Ureolytic bacteria

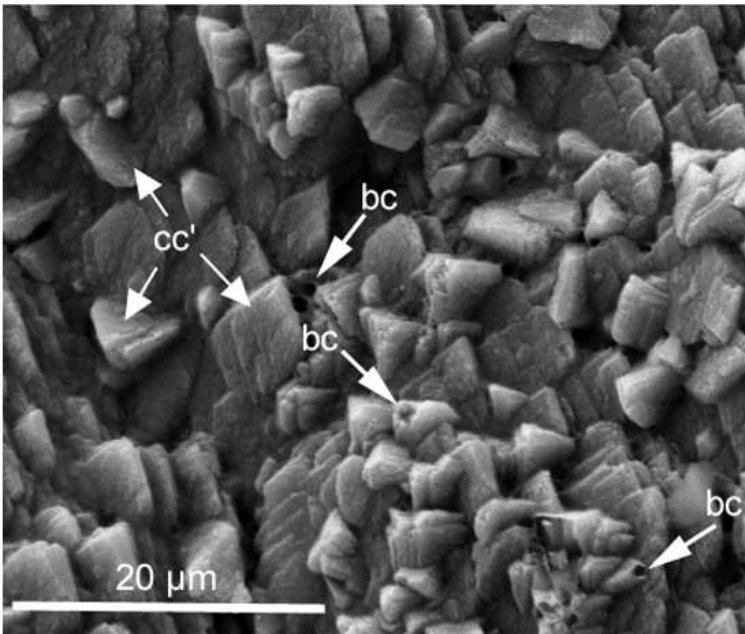


De Muyne et al. *Ecol. Eng.* 2010

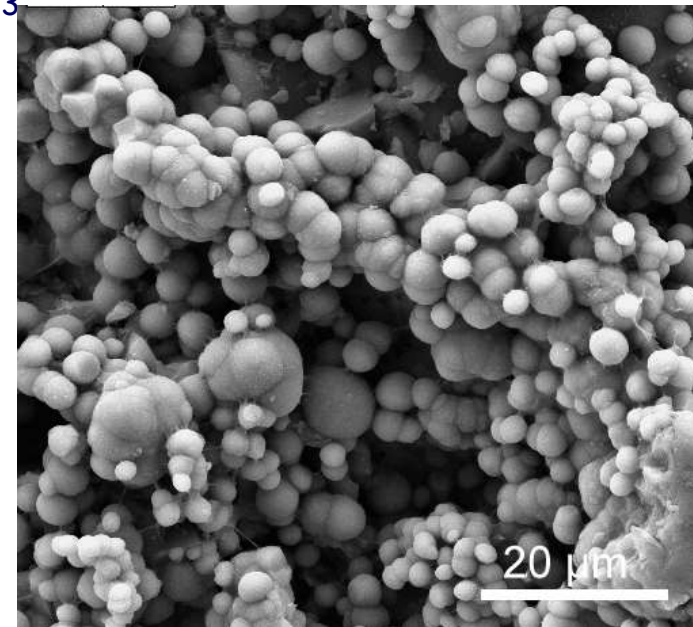
calcita



vaterita



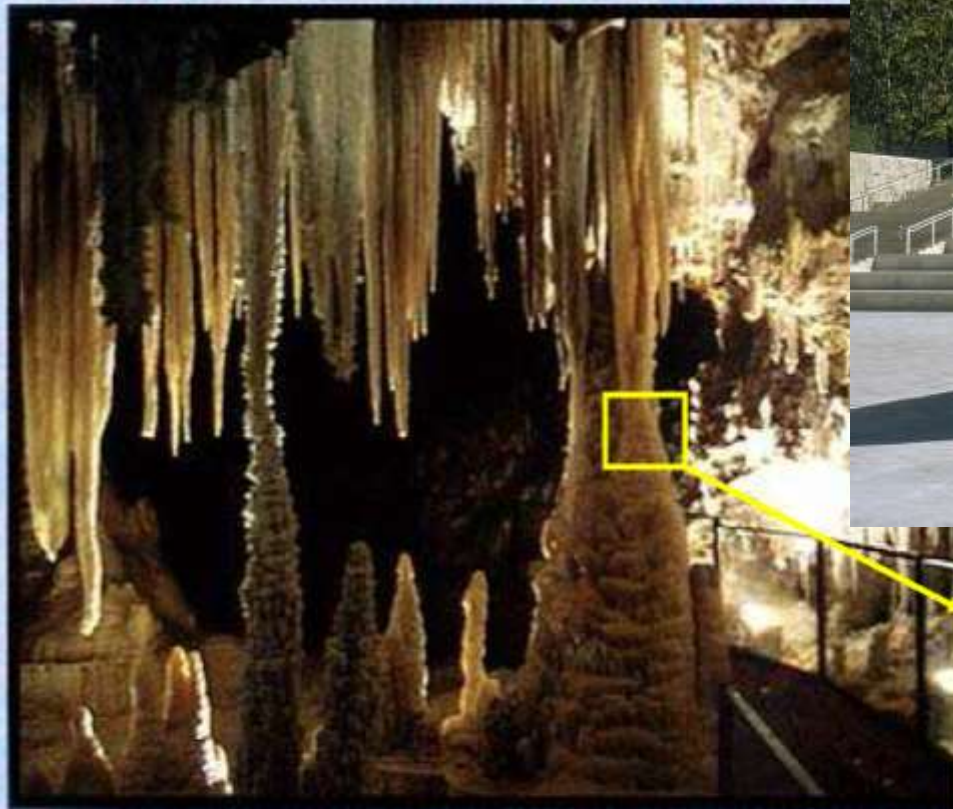
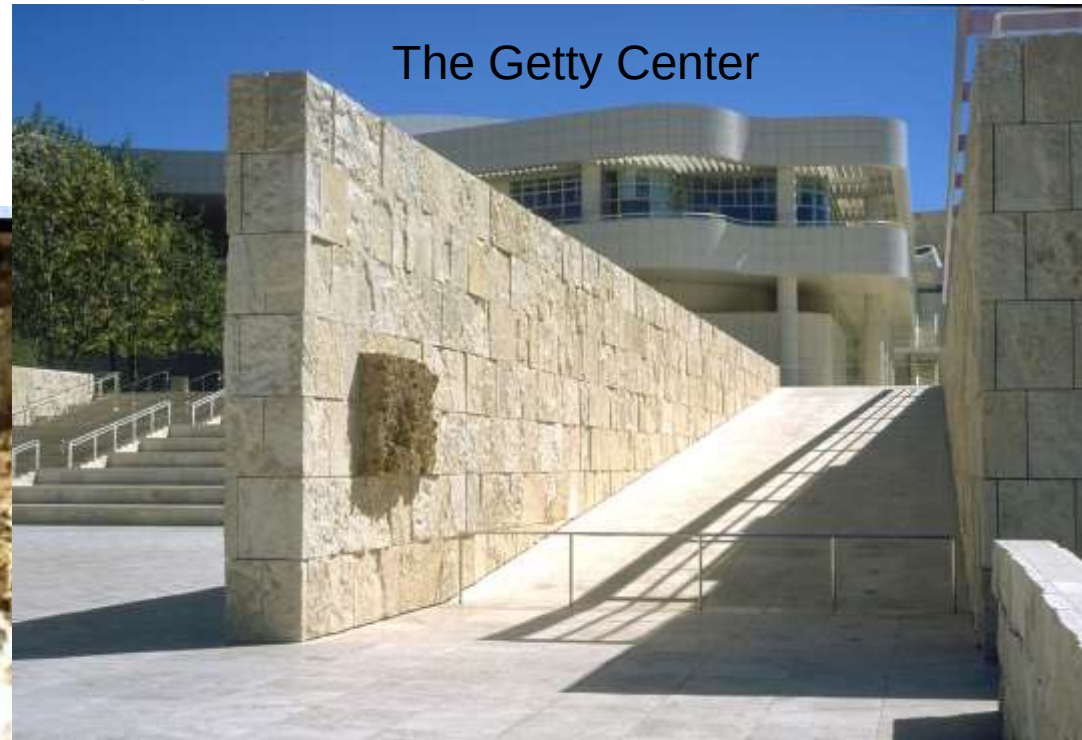
Biominerales



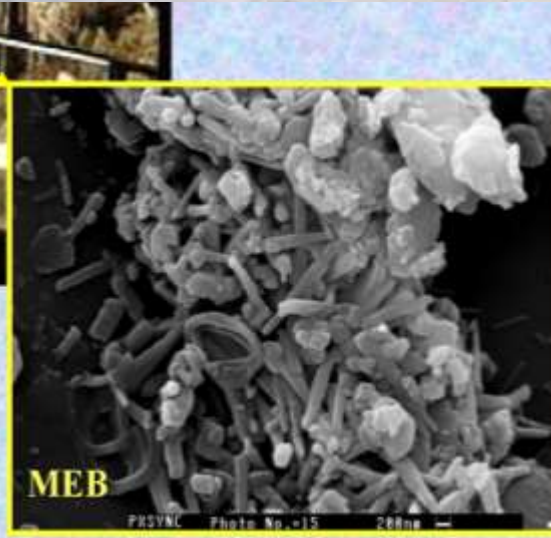


Biomíneralización bacteriana de CaCO_3

Proceso natural y ubicuo



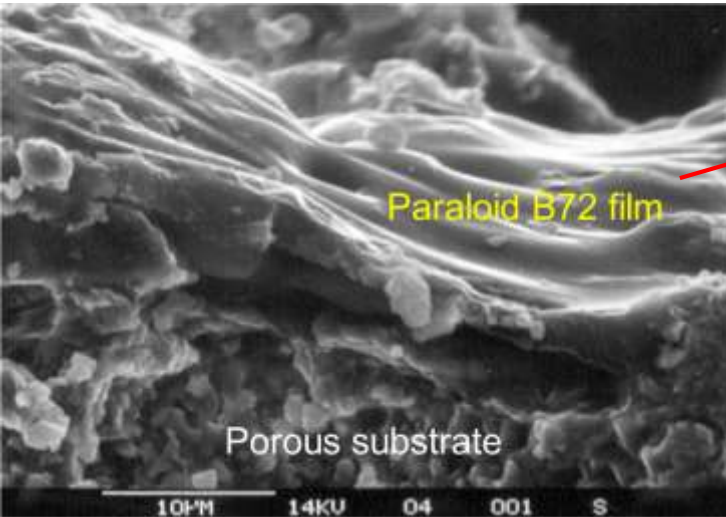
Las bacterias juegan un papel clave en la formación de rocas carbonatadas en la Naturaleza





Biomíneralización y conservación del Patrimonio Histórico

Mayan mural paintings



PROBLEMA
*Tratamientos
convencionales*



Giorgi et al. *Accounts Chem. Res.* **43**, 695 (2010).

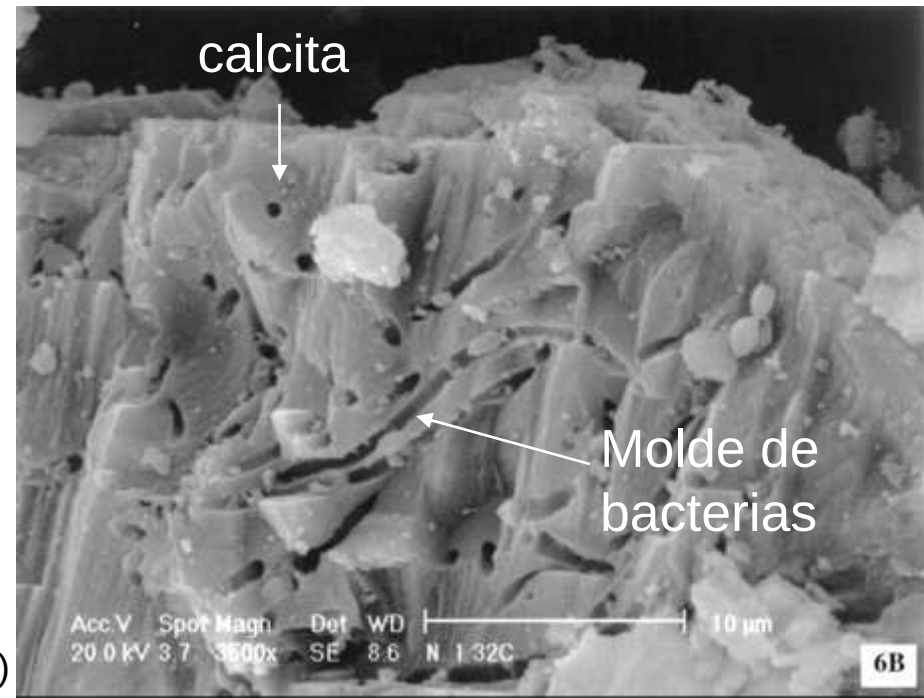
Biomíneralización

Nueva aproximación



CaCO_3 en conchas

**Mineralización
de CaCO_3
inducida por
bacterias**



Science, 300, 577 (2003)



Métodos de protección/consolidación bacteriana

Método 1: Inoculación con una especie exógena (método CALCITE)



1. Spray



2. Nutrición



3. Biomineralización



4. Recalcificación

Método 1: con grandes limitaciones: a) Complejidad; b) Coste; c) Problemas con el método original CALCITE (penetración limitada, consolidación limitada, uso de bacterias patógenas: *Bacillus cereus*)

Método 2: Activación de las bacterias carbonatogénicas del sustrato (método UGR)



1. Spray



2. Nutrición



3. Biomineralización



4. Recalcificación

(Schemes from: Jacques Livage, Collège de France)

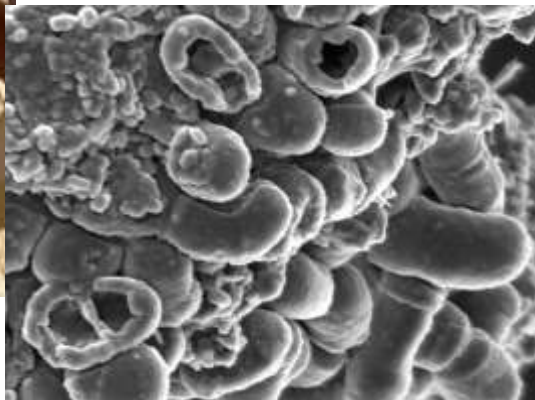


Tratamiento bacteriano (Método 2)

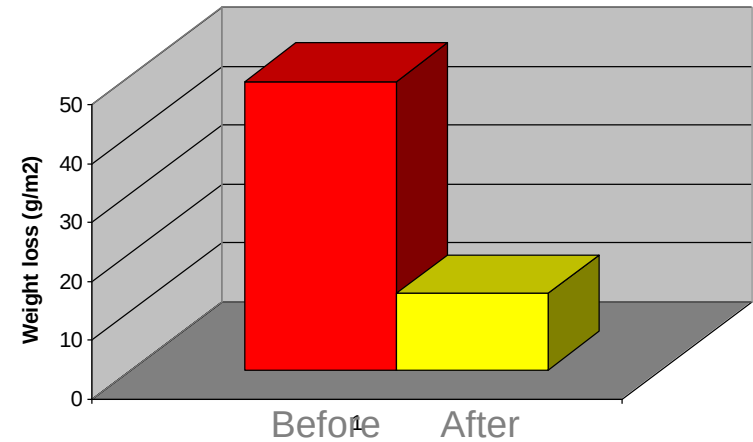
Capilla Real



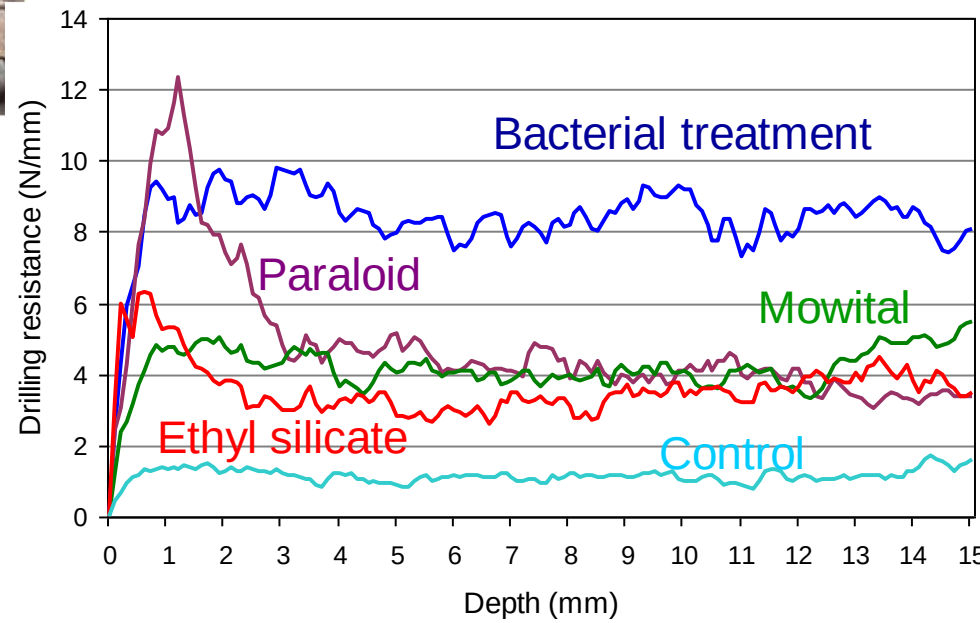
Patented M-3P nutritive medium



Scotch tape test

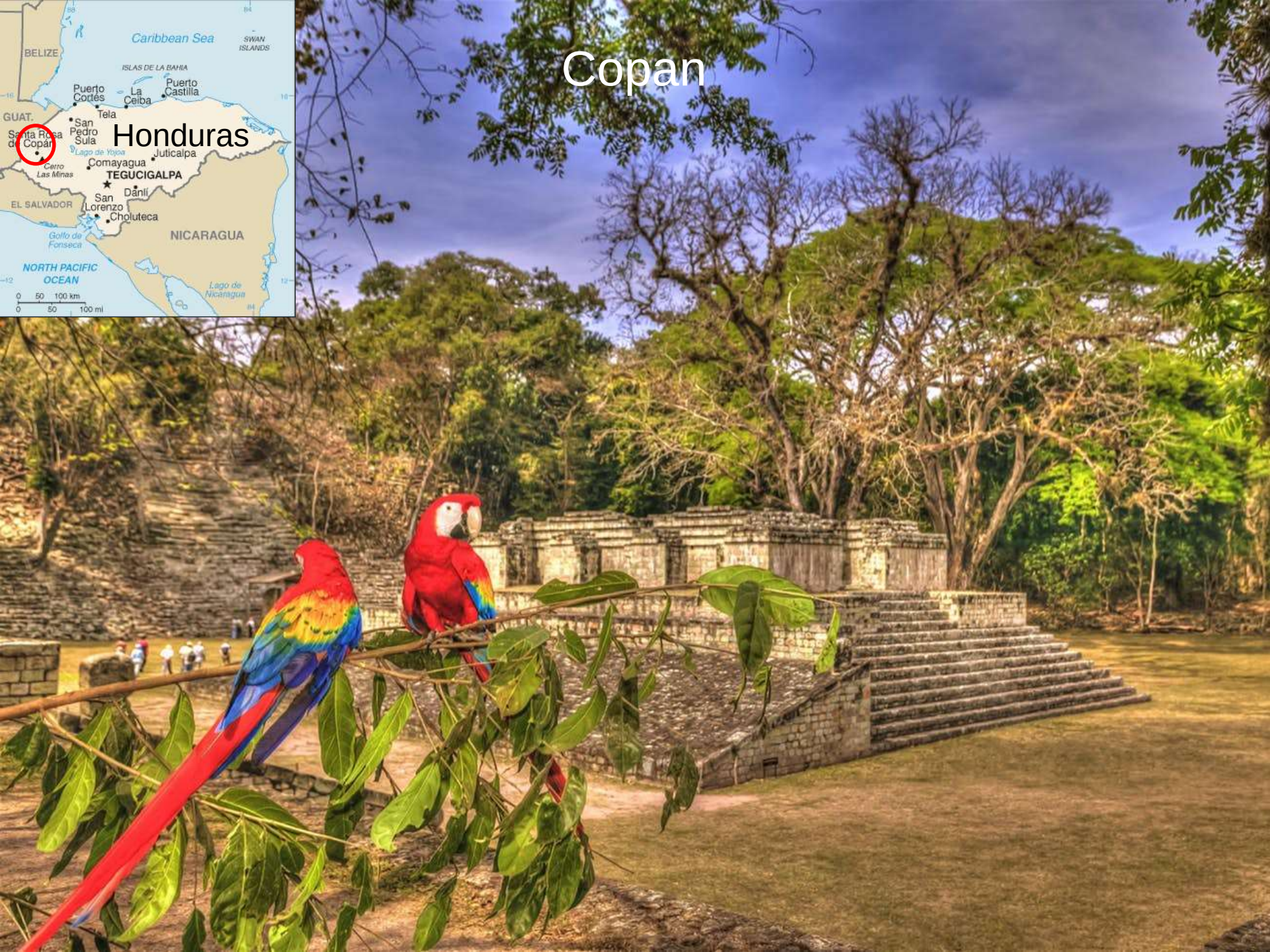


Resistencia al taladrado





Copan





Bacterial Conservation

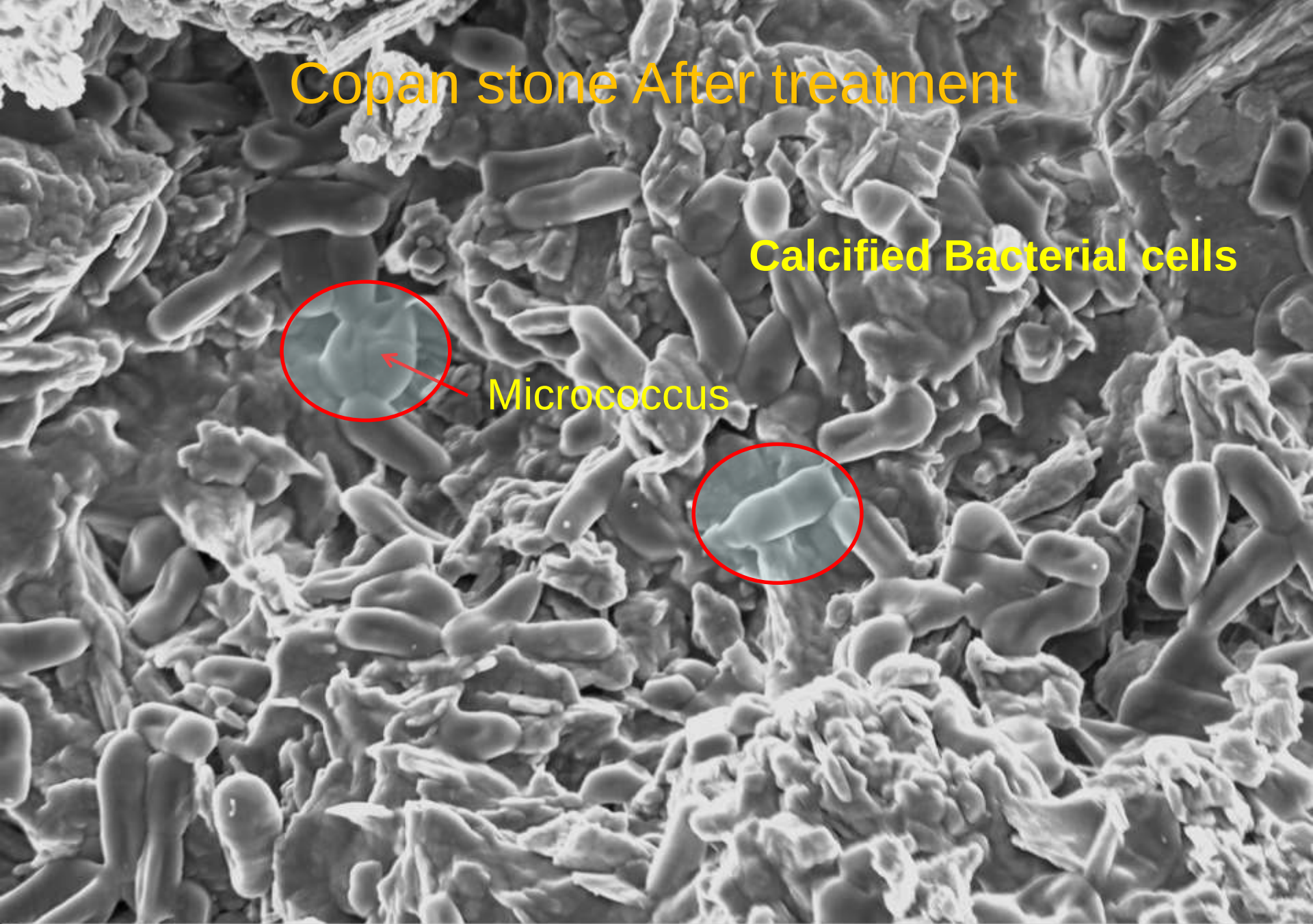
Temple 18



Copan stone After treatment

Calcified Bacterial cells

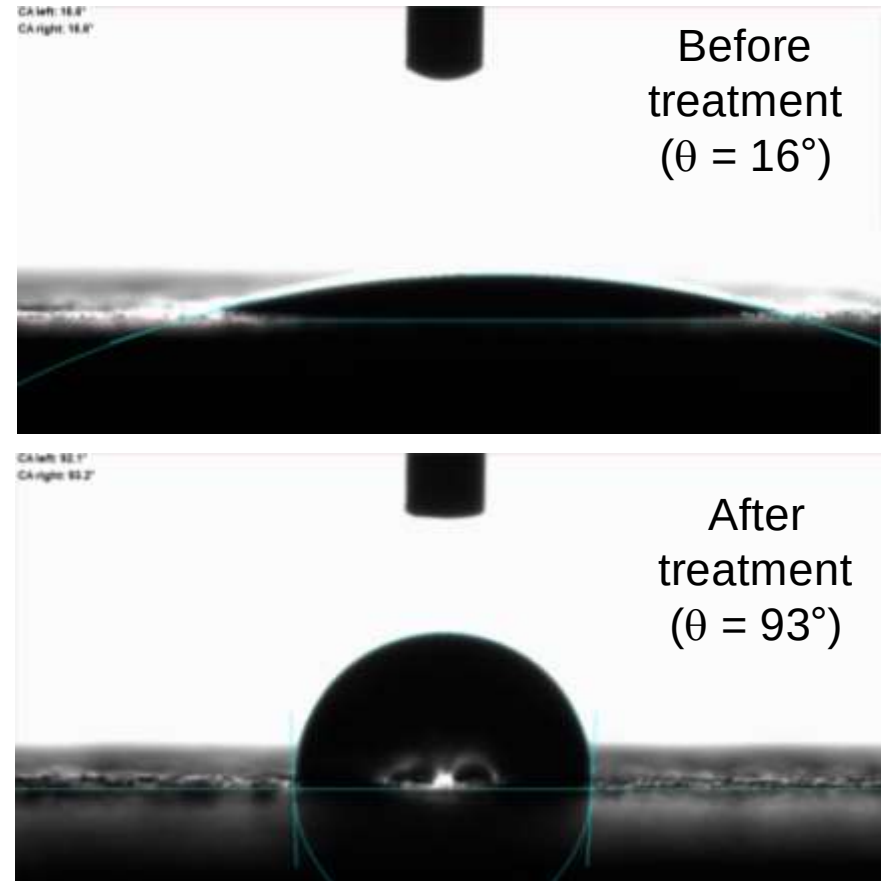
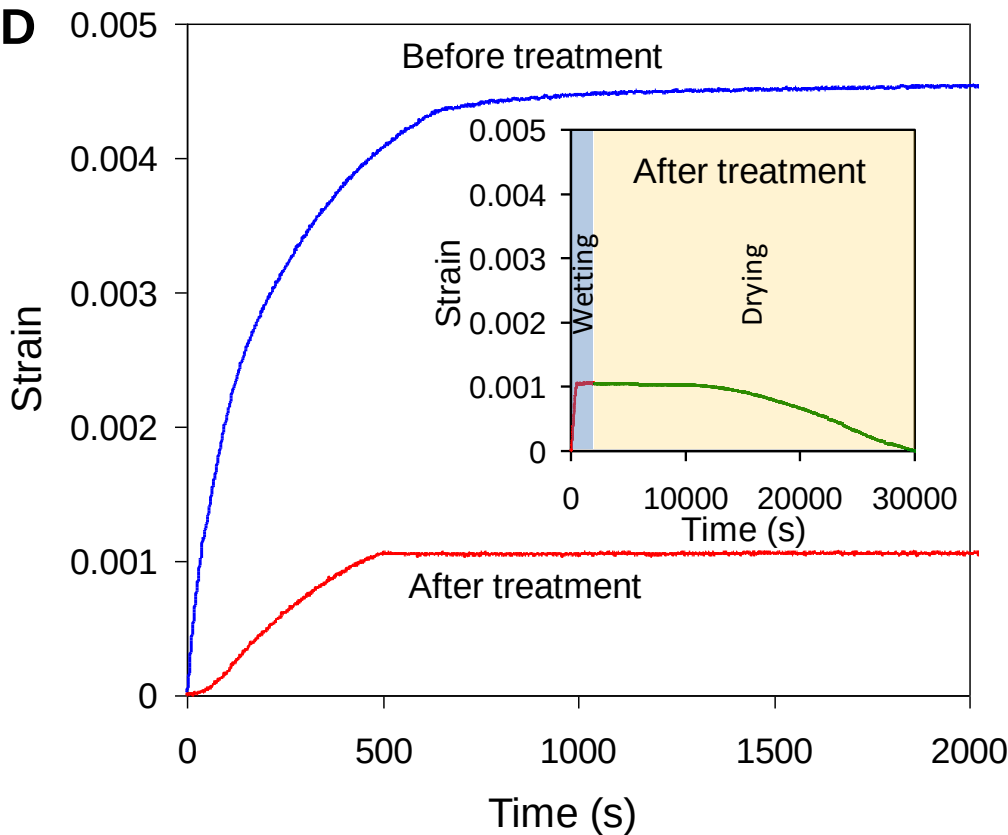
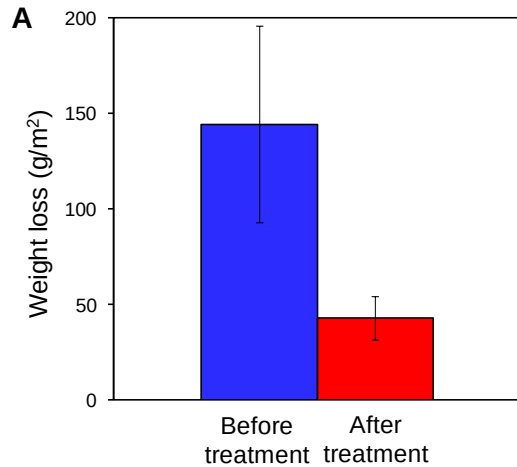
Micrococcus





Tratamiento de conservación bacteriana: **Método 2**

Piedra volcánica de Copan

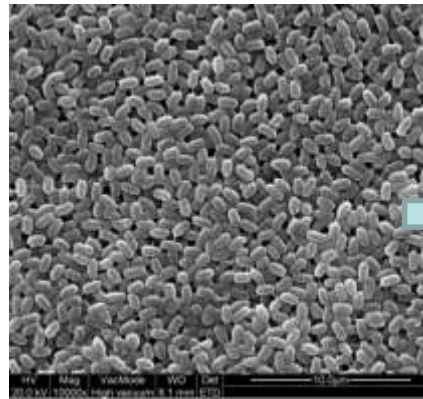
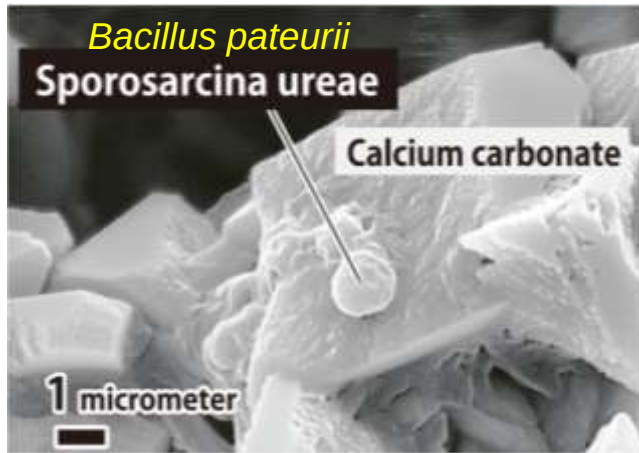




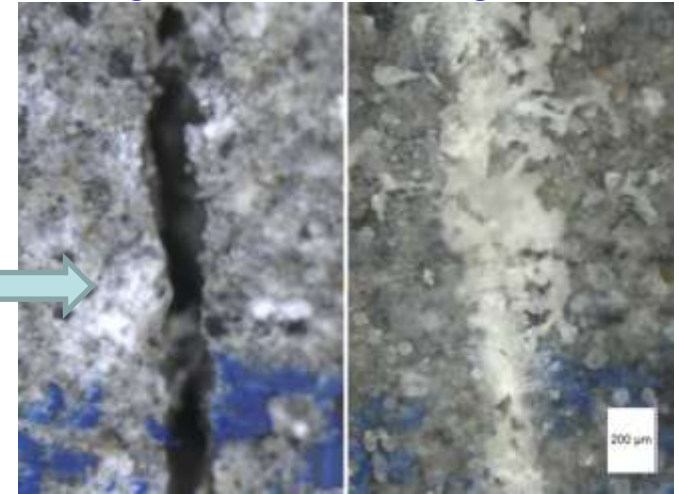
Aplicaciones de la biomineralización bacteriana

Autosellado de grietas en hormigón

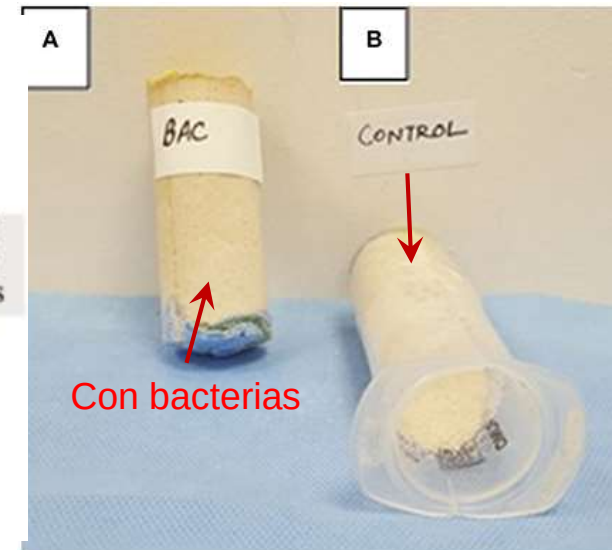
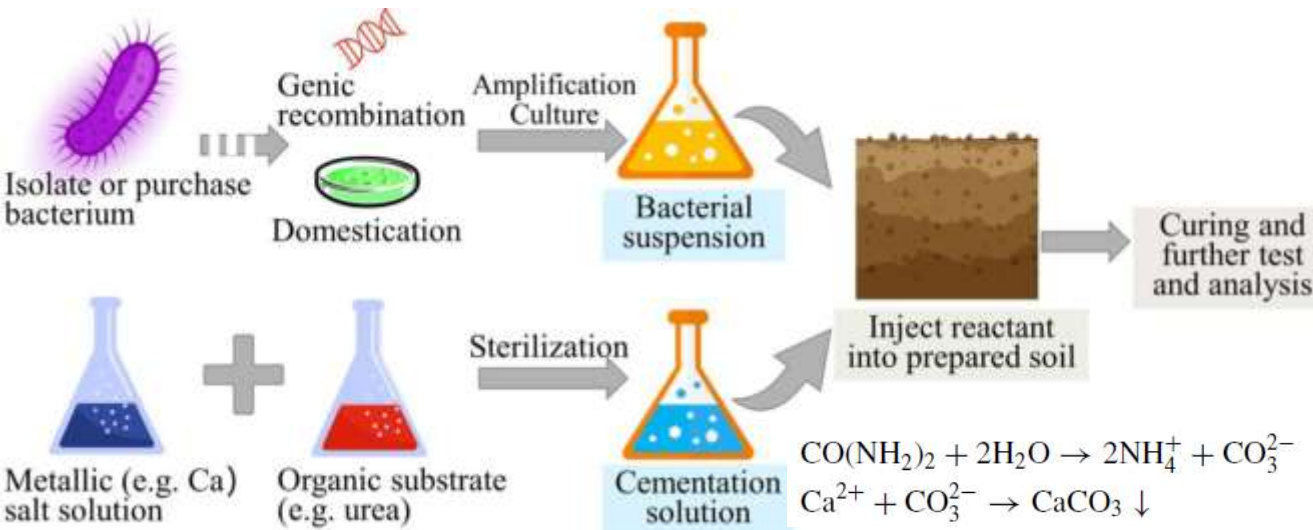
Sporosarcina pasteurii



Ghent University



Cementación de arena y suelos

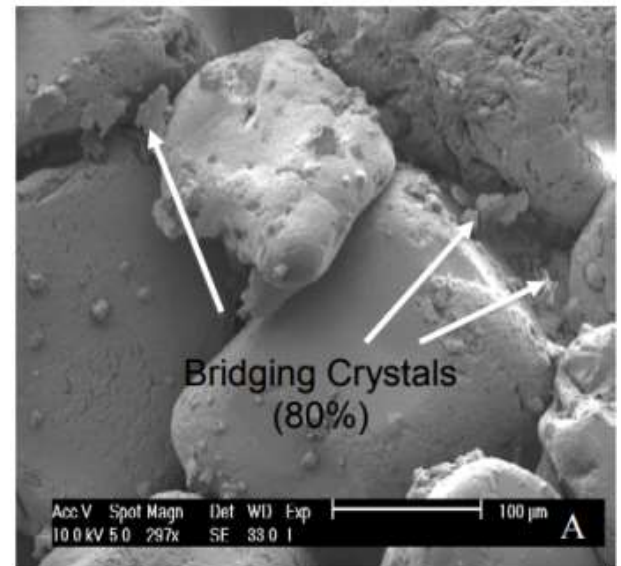


Bacterias ureolíticas (*Bacillus pasteurii*, *B. subtilis*)



Aplicaciones de la biomineralización bacteriana

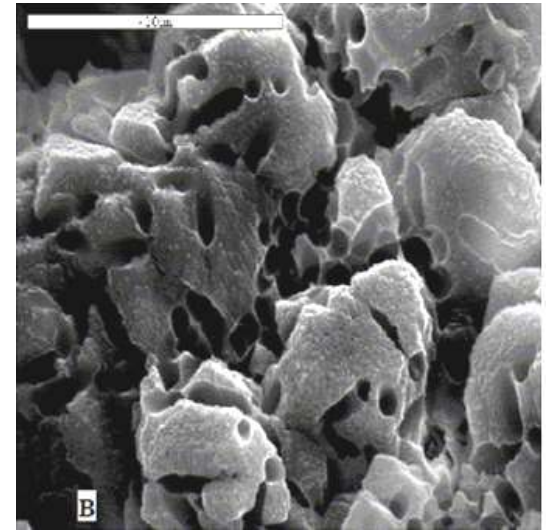
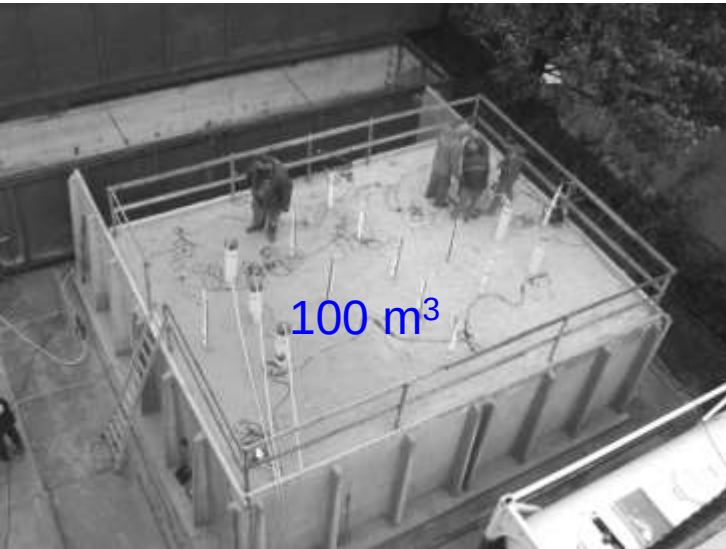
Consolidación de suelos





Aplicaciones de la biomineralización bacteriana

Consolidación de suelos



Coste = 25 a 75 US\$ m³



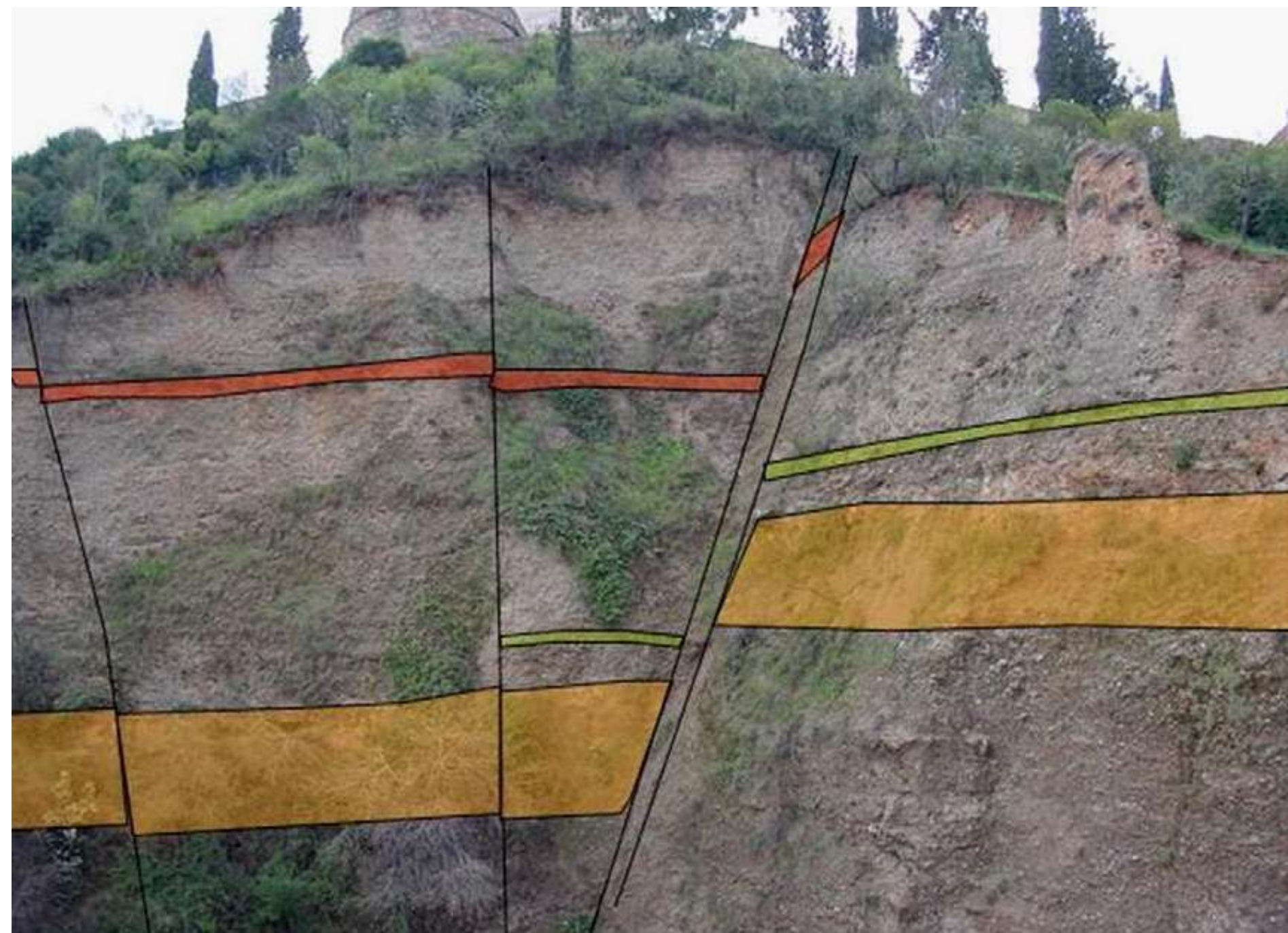
Futuro:

Bioestimulación de
bacterias ureolíticas: 12
m prof.



El Tajo de San Pedro







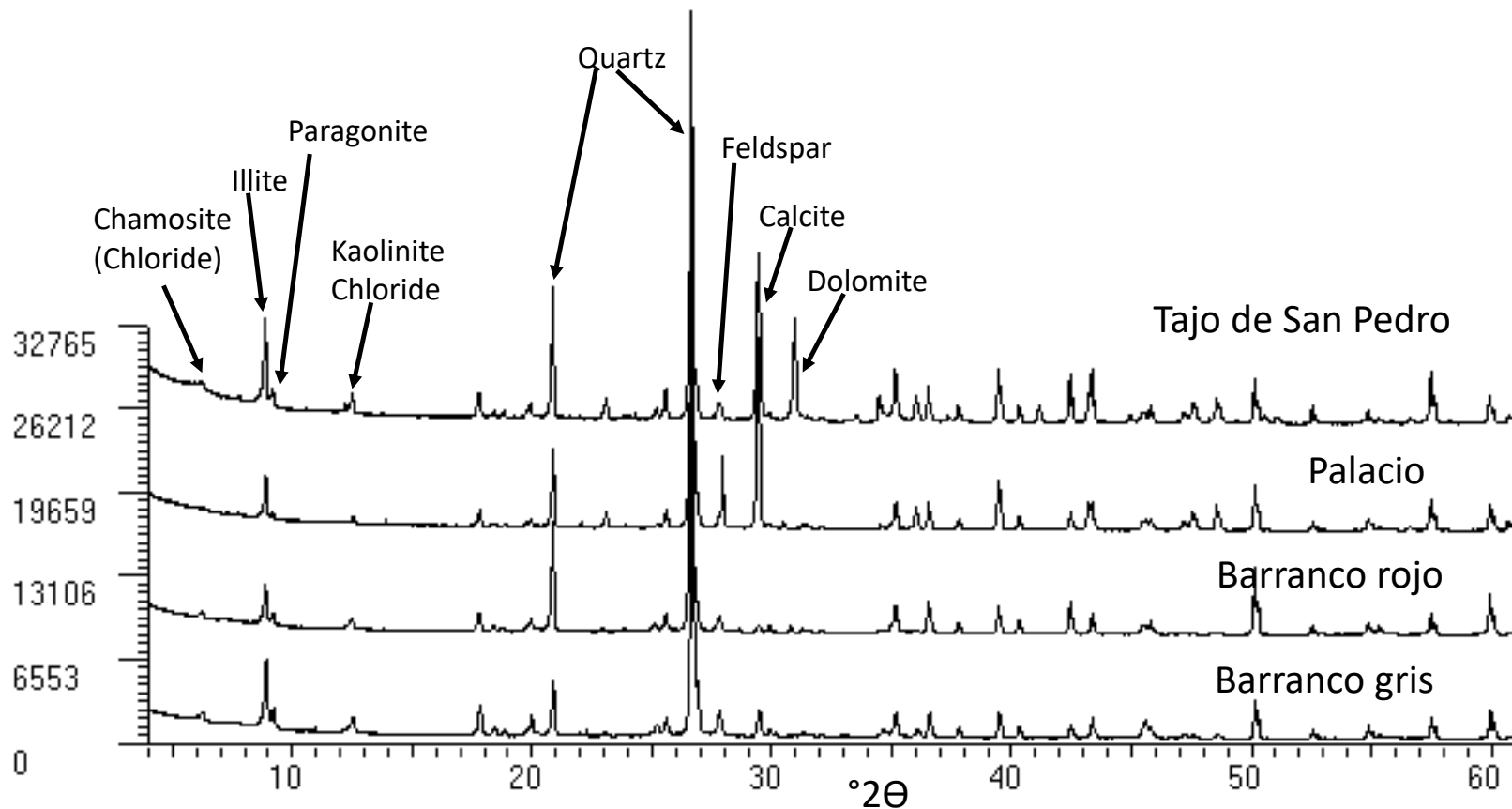
Conglomerado Alhambra



Tajo de San Pedro



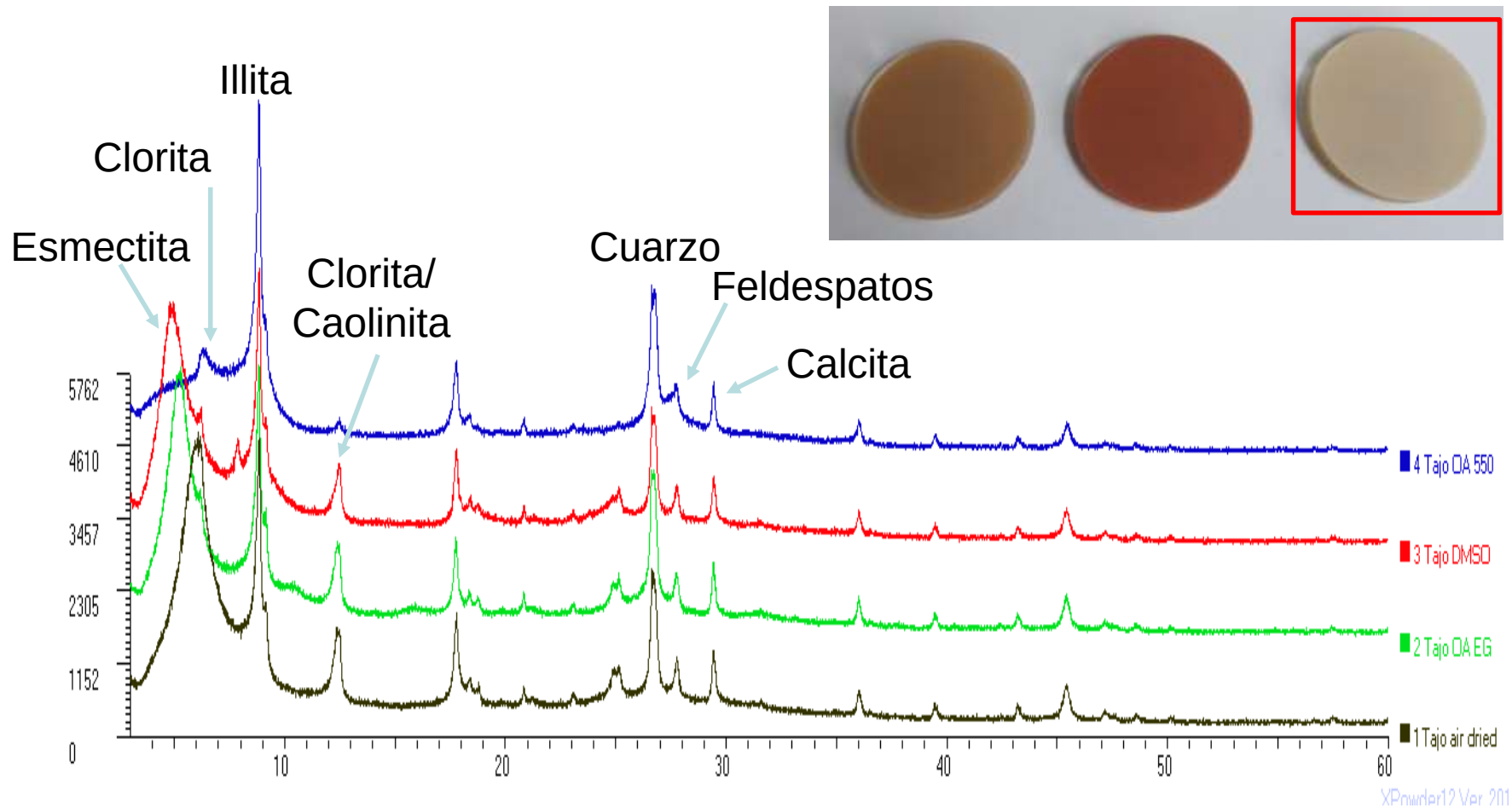
Composición Mineralógica (Difracción de rayos-X)



Muestras en polvo

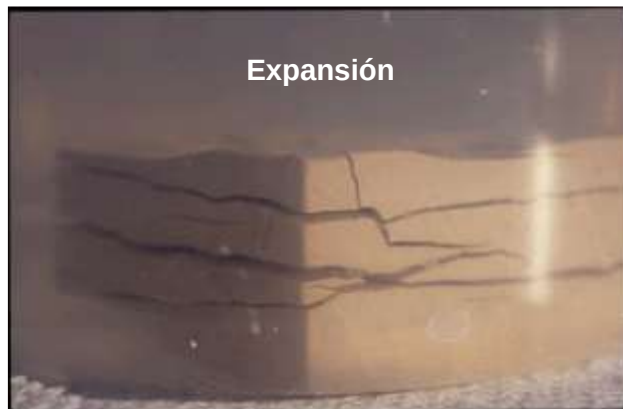


Composición Mineralógica (Difracción de rayos-X)

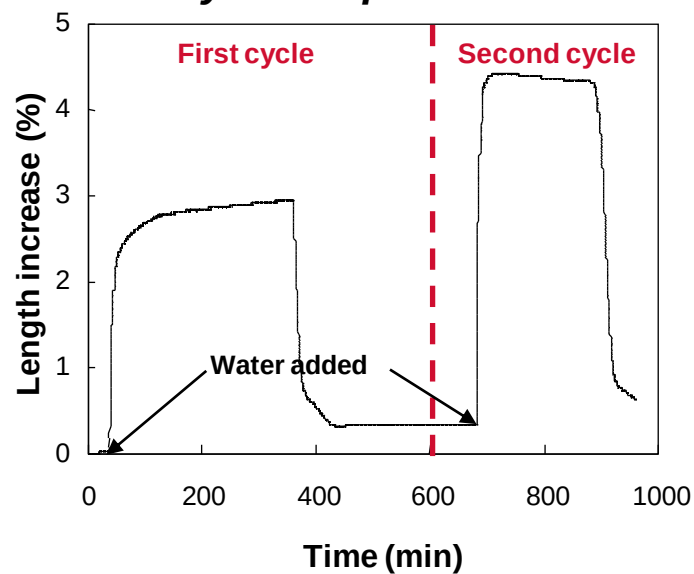


Tajo de San Pedro
Agregados Orientados – Fracción
Arcilla

ESEM



Hydric expansion

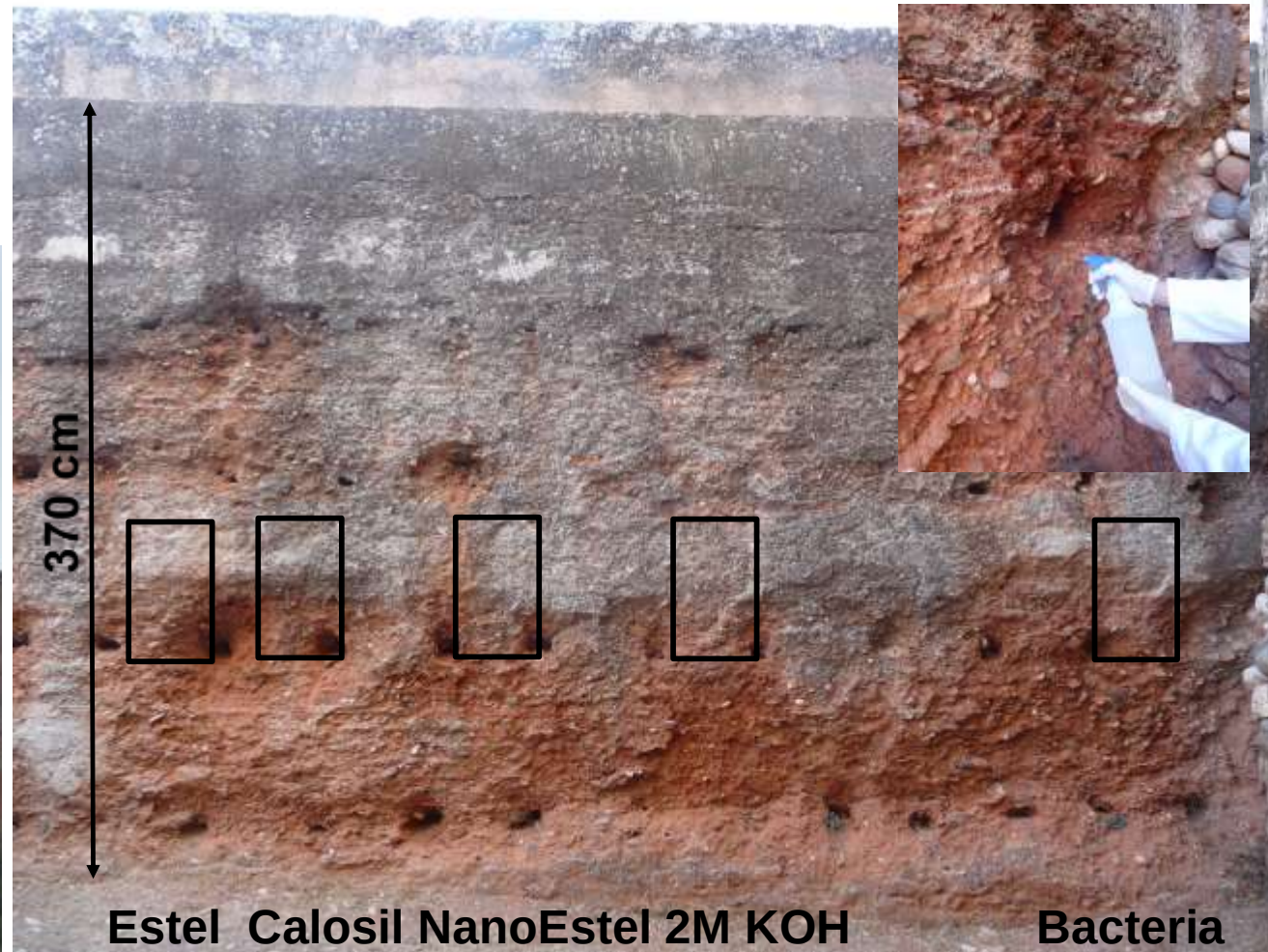


By Eric Doehne



Tratamiento de conservación bacteriana: **Método 2**

Tapial



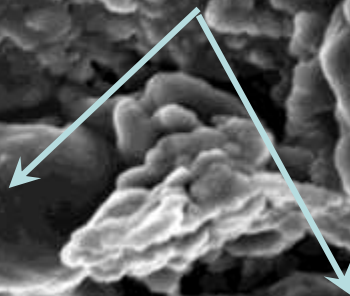
Microproyecto "Ciencia en la Alhambra"

Dirección: Kerstin Elert



Tratamiento de conservación bacteriana: Método 2

Bacterias calcificadas



EPS





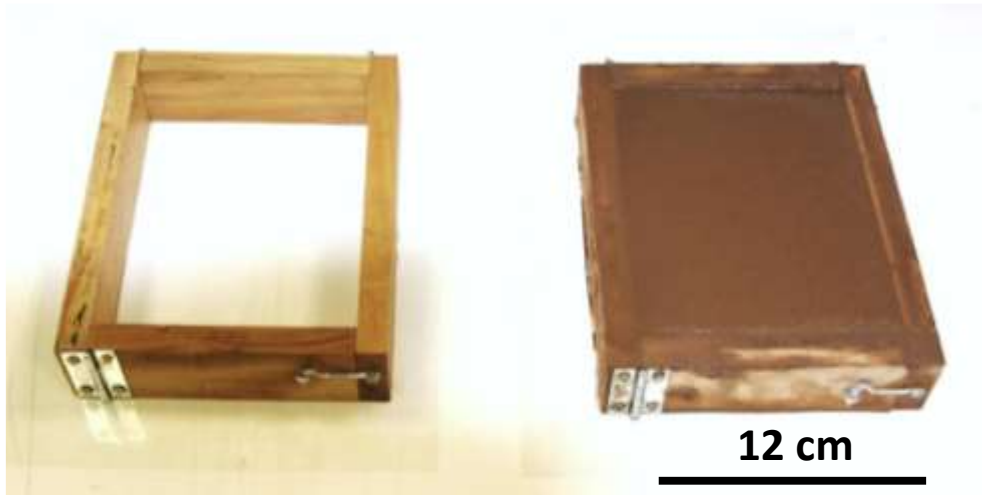
Consolidación bacteriana del Tajo de San Pedro

Estudio de viabilidad

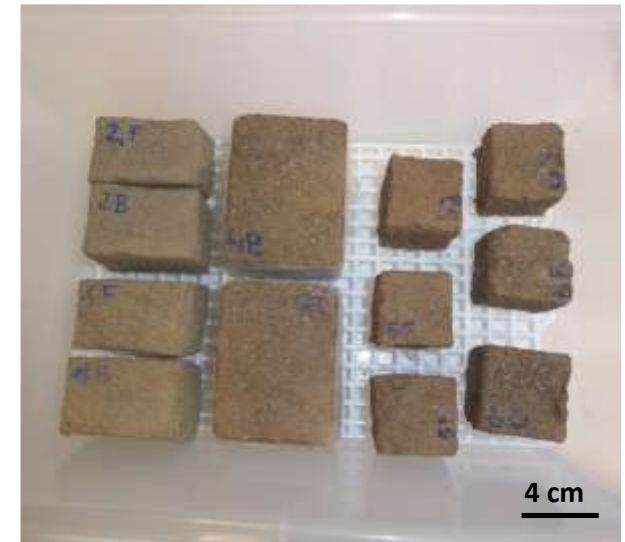




Preparación de Muestras



Preparación de bloques de tierra usando moldes de madera.



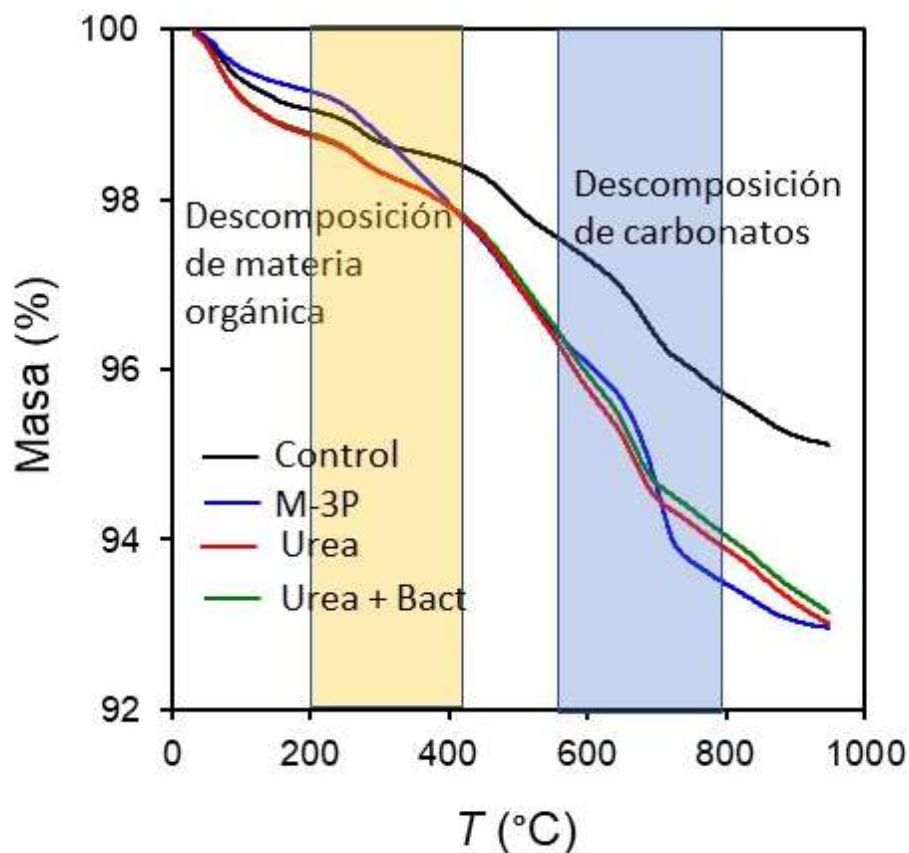
Bloques de tierra antes del tratamiento.

LOS TRATAMIENTOS:

- 1) Solución nutritiva para bacterias carbonatogénicos indígenas (M-3P)
- 2) Solución nutritiva para bacterias ureolíticas indígenas (*Sporosarcina pasteurii*)
- 3) Solución nutritiva para bacterias ureolíticas y bacterias ureolíticas (*Sporosarcina pasteurii*) cultivadas en el laboratorio



Evaluación de los Tratamientos



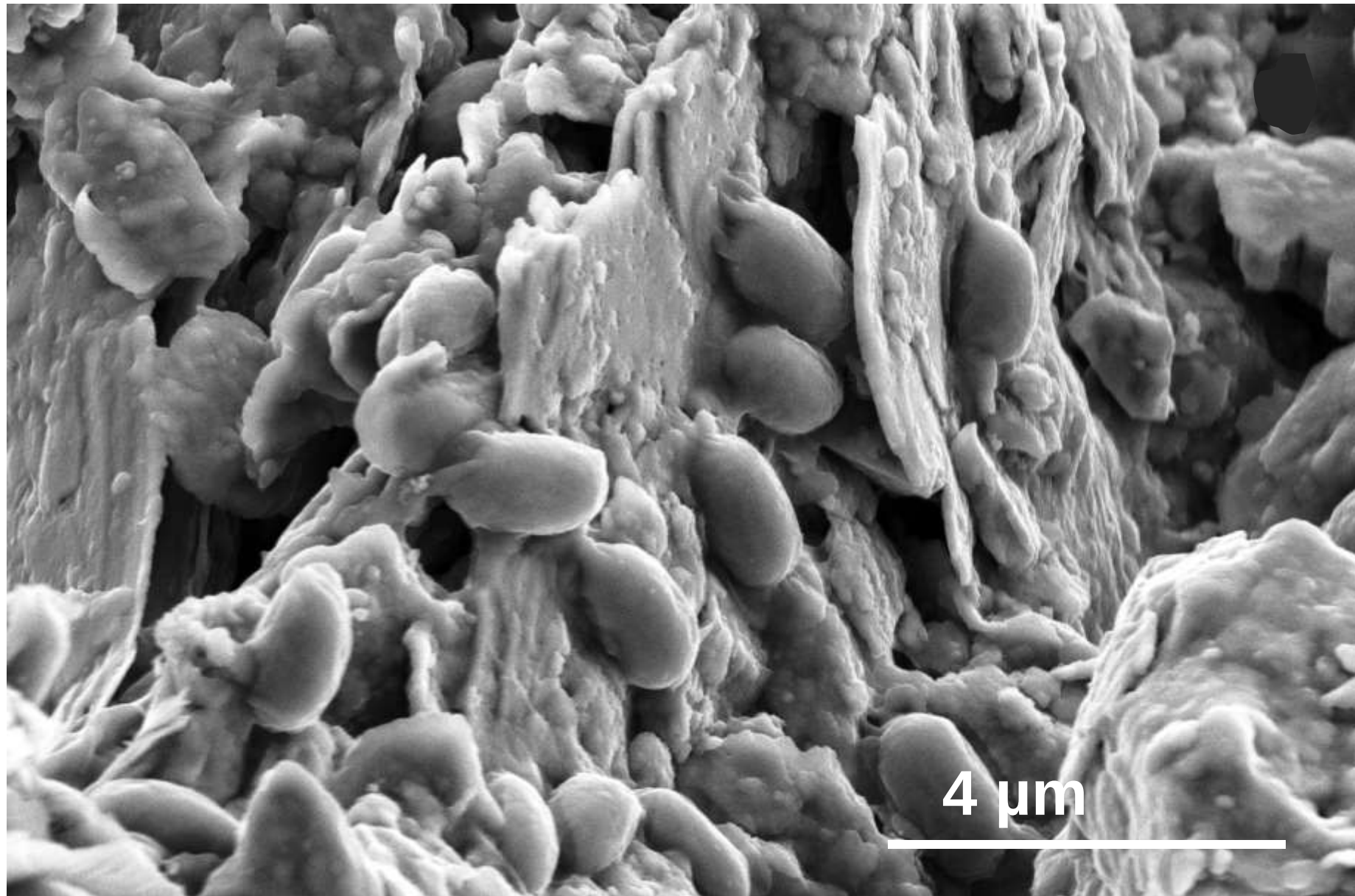
Diagramas de TG/DSC de los materiales sin tratar (control) y tratados (M-3p, Urea, y Urea+bacterias).

Concentración de carbonato cálcico (CaCO_3) en las muestras sin tratar (control) y tratadas. Datos en % en peso.

	Control	M-3P	Urea	Urea + Bacterias
CaCO_3	4.29	7.05	5.59	5.71



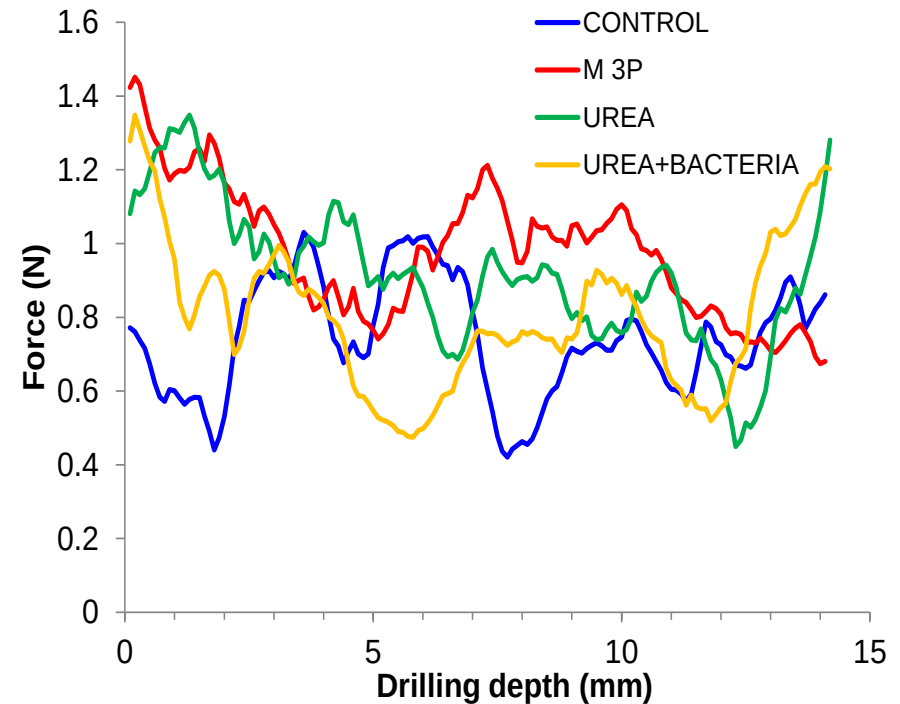
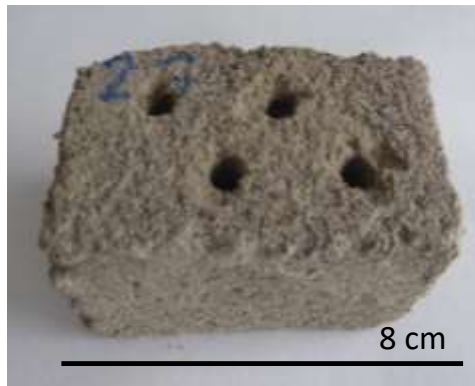
Evaluación de los Tratamientos



Imágenes de FESEM de células bacterianas calcificadas



Evaluación de los Tratamientos

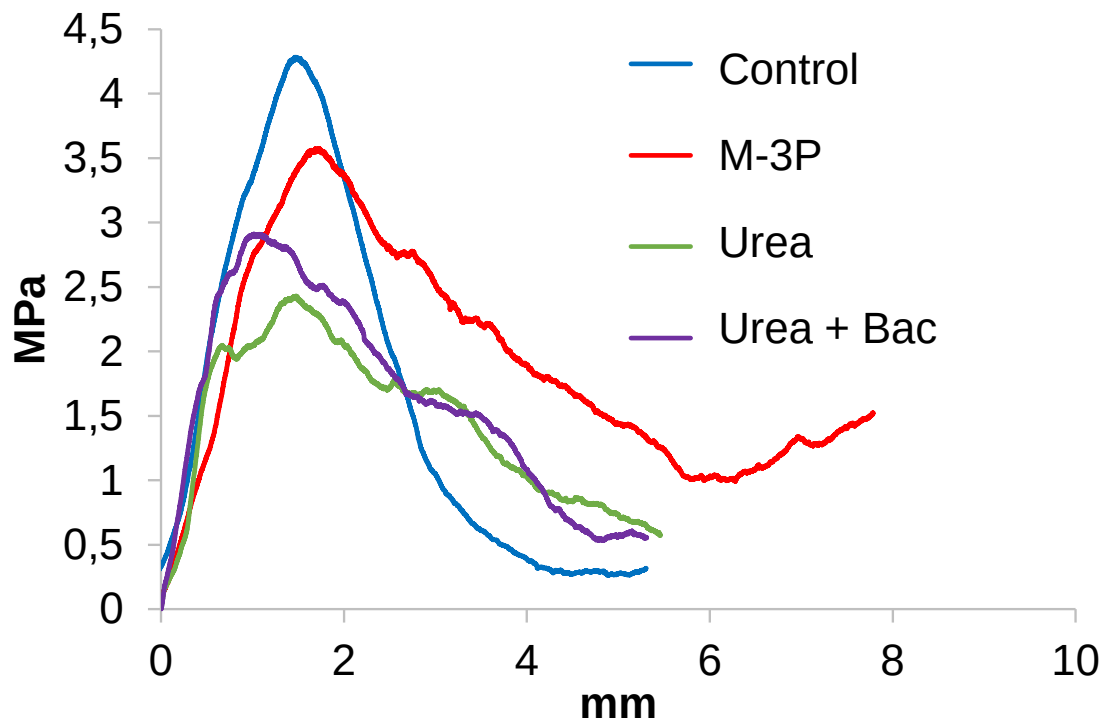


Sistema de medición de la resistencia a la perforación (DRMS) usado para la evaluación de la eficacia de los tratamientos de bioconsolidación.

Resultados de las medidas de la resistencia a la perforación de bloques de tierra antes (control) y después de la bioconsolidación.



Evaluación de los Tratamientos

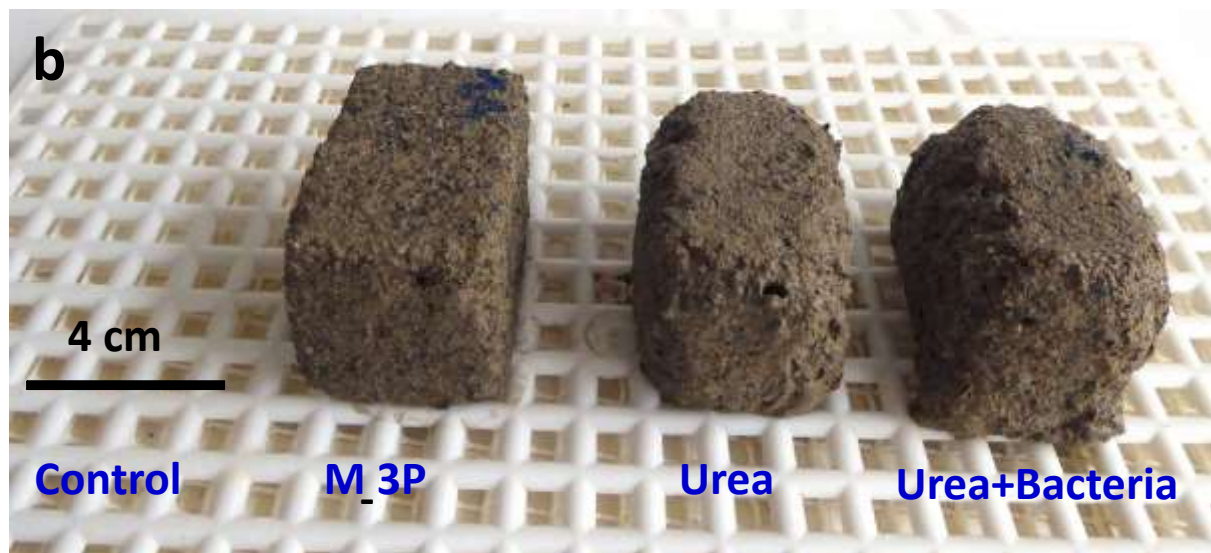
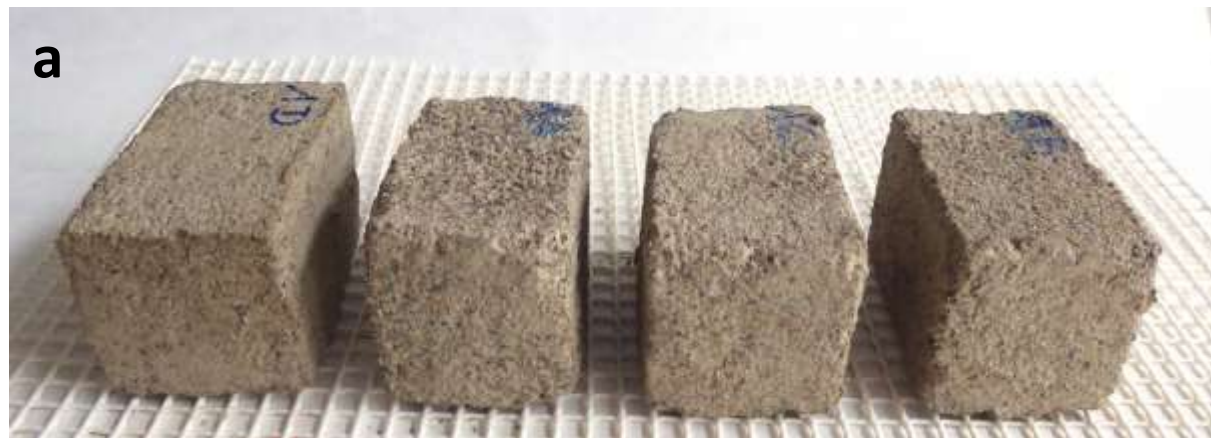


Muestra	Resistencia (MPa)
Control	4.33
M-3P	3.31
Urea	3.04
Urea + Bac	3.40

Curvas de esfuerzo/deformación y resistencia a compresión de las muestras antes (control) y después del tratamiento.



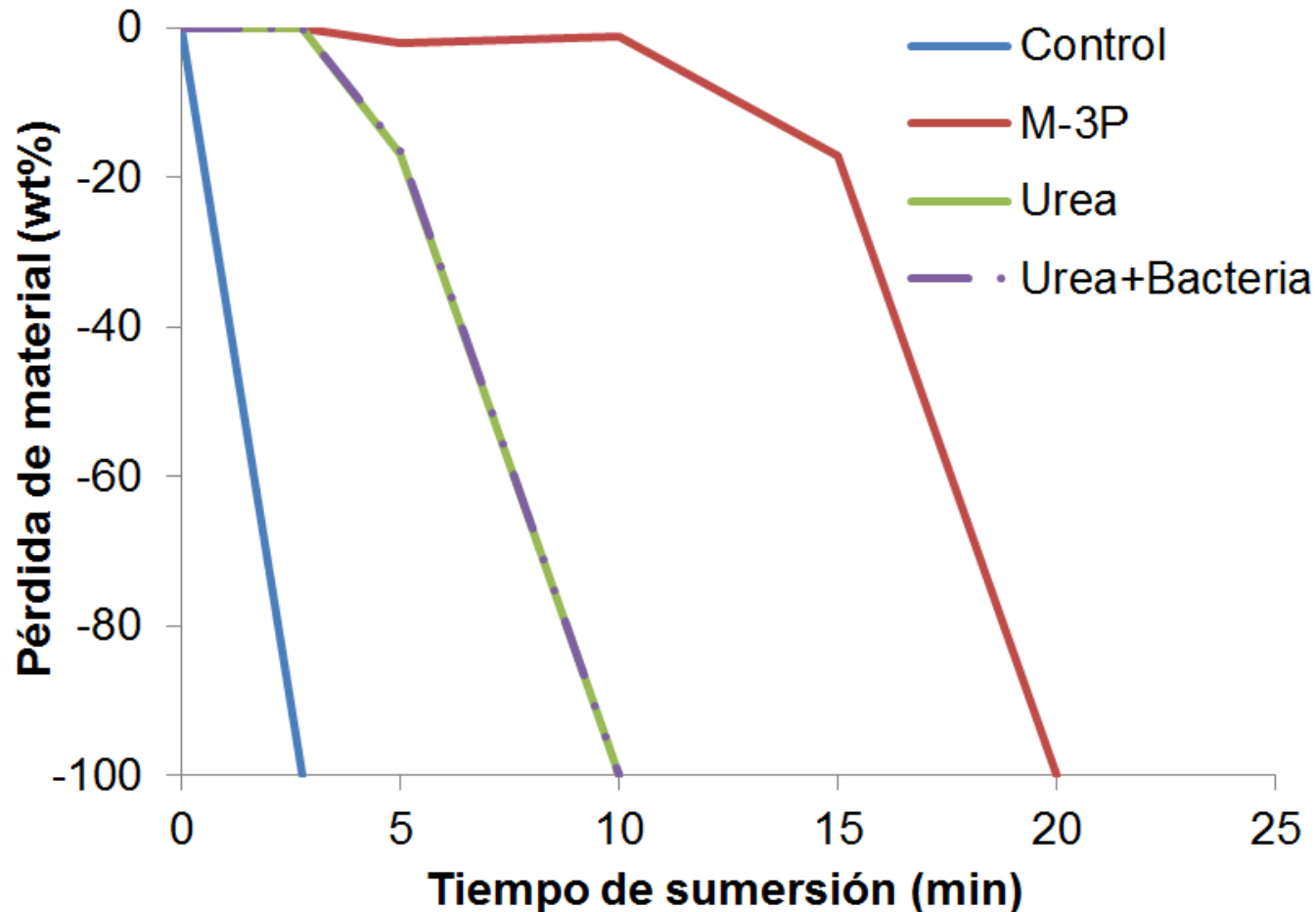
Evaluación de los Tratamientos



Aspecto de los bloques de tierra sin tratar y consolidados con las distintas soluciones nutritivas antes (a) y después de la inmersión en agua durante 5 minutos (b y c).



Evaluación de los Tratamientos



Pérdida de material de bloques de tierra sin tratar y consolidados con las distintas soluciones nutritivas durante la inmersión en agua.



Evaluación de los Tratamientos

Muestras de la Alhambra antes de tratarlas

	Microbiota TOTAL (UFC*/g)	Carbonatogénica (%)
Barranco de Tejar	$(7.7 \pm 0.2) \times 10^4$	99
Tajo de San Pedro	$(3.7 \pm 0.4) \times 10^4$	98

Muestras extraídas de los bloques de tierra del Barranco de Tejar después de los tratamientos

	Microbiota TOTAL (UFC*/g)	Carbonatogénica (%)
Tratamiento M-3P	$(3.8 \pm 0.2) \times 10^6$	100
Tratamiento UREA	$(1.2 \pm 0.2) \times 10^7$	100
Tratamiento UREA + Bacteria	$(1.0 \pm 0.8) \times 10^7$	100

Muchas gracias por su atención

