



II JORNADAS DE INVESTIGADORES JÚNIOR EN PATRIMONIO

Jornadas JIP - 2, 3 y 4 de abril de 2025

Ge-conservación
Conservação | Conservation

Inhibidores de cristalización salina en la conservación de madera y cerámica arqueológicas en las salinas espartinas (Ciempozuelos, Madrid)

Blanca Zarzalejos Vicens, Encarnación Ruiz-Agudo, Sarah Bonilla-Correa

Resumen: Las sales solubles son uno de los agentes de deterioro del patrimonio material más dañinos, actuando cíclicamente. Destacan, entre otros, los sulfatos, sales mayoritarias en el yacimiento arqueológico Las Salinas Espartinas (Ciempozuelos, Madrid) que afectan a todos sus bienes muebles e inmuebles. Por este motivo, se estudiaron los modificadores de la cristalización de la sal. En concreto, se empleó el ácido aminotris-metilenfosfónico (ATMP), muy afín al sulfato sódico (Na_2SO_4) que predomina en la degradación de los materiales del yacimiento, como posible tratamiento de conservación de los materiales arqueológicos *in situ* (cerámica y madera). Se realizaron ensayos de alteración acelerada, complementados con técnicas analíticas de caracterización, como, por ejemplo, espectroscopía Raman, antes y después de los ensayos. Se corroboró así la efectividad del aditivo y la mejor conservación de los materiales como consecuencia de su presencia en ellos, al observarse, fundamentalmente, una disminución en la pérdida del material durante los ensayos.

Palabras clave: sulfato sódico, cerámica, madera, ATMP, conservación

Salt crystallization inhibitors to preserve archaeological wood and ceramics from las salinas espartinas site (Ciempozuelos, Madrid)

Abstract: Soluble salts are one of the most damaging agents of deterioration of material heritage, acting cyclically. Among others, sulfates stand out, which are the main salts found at the Las Salinas Espartinas archaeological site (Ciempozuelos, Madrid) and affect its built structures, as well as objects. This is the reason why salt crystallization modifiers were studied. Specifically, aminotrimethylene phosphonic acid (ATMP), which responds well to sodium sulfate (Na_2SO_4), the main agent responsible for the degradation of materials at the site, was used as a possible treatment for the *in situ* conservation of archaeological materials (ceramics and wood). Accelerated alteration tests were carried out, complemented by analytical characterization techniques, such as Raman spectroscopy, before and after the tests. This confirmed the effectiveness of the additive and the improved conservation of the materials as a result of its presence in them, as a decrease in material loss was observed during the tests.

Keywords: sodium sulphate, ceramic, wood, ATMP, conservation

Introducción

La cristalización de sales es una de las causas más comunes en la degradación de los materiales, con evidentes efectos no sólo en el aspecto, sino también en la superficie y en la estructura interna del material. En concreto, los sulfatos (SO_4^{2-}), han demostrado ser uno de los grupos de sales más dañinos para los materiales (Martínez-Martínez *et al.* 2021; Menéndez 2017; López-Arce 2012; Cassar *et al.* 2008; Ruiz-Agudo 2007; Lubelli y van Hees 2007; Rodríguez-Navarro y Doehne 1999; Grossi y Esbert 1994).

A pesar de la relevancia de la sal en la degradación del patrimonio, y aunque actualmente se conocen los

mecanismos de cristalización de algunas especies salinas, otras cuestiones se desconocen todavía, como, por ejemplo: cómo interactúan las sales con el material, la distinta capacidad de daño de cada una, la diferencia de degradación según la composición del sustrato o cómo influyen exactamente los factores ambientales en los procesos de disolución-cristalización (Rodríguez-Navarro y Doehne, 1999; Ruiz-Agudo, 2007; Martínez-Martínez, 2021; Wang y Zhang, 2023; Ruiz Agudo *et al.* 2024).

Generalmente, las labores de conservación buscan aislar al material del agente de deterioro. Esta es una estrategia poco viable frente a las sales y especialmente en el caso del patrimonio inmueble, construido y arqueológico, ya

que, por lo general, se encuentra expuesto a la intemperie, lo cual dificulta el control de las condiciones del entorno para la preservación (Oguchi y Yu 2021; Cassar et al. 2008; Rodríguez-Navarro y Doehe 1999). Por ello, diversos autores abordan el uso de modificadores de la cristalización de la sal, debido a su interacción con este agente de deterioro en las diferentes fases en las que se produce (Cassar et al. 2008; Lubelli y van Hees 2007; Ruiz Agudo 2007).

La literatura acerca del empleo de estos modificadores de la cristalización de la sal, en relación con la conservación de patrimonio como medida de prevención frente al daño que la cristalización de sales ocasiona, es escasa, aunque es una de las vías de investigación más frecuentada en las últimas décadas (Rodríguez-Navarro et al. 2000; Ruiz Agudo 2007; Cardinali et al. 2021; Ruiz Agudo et al. 2024).

Los estudios consultados, como los llevados a cabo por Lubelli y van Hees (2007), Ruiz Agudo (2007; et al. 2024), o Vavouriki y Koutsoukos (2015) sugieren que algunos de estos productos sí podrían ofrecer resultados positivos, si bien los primeros (Lubelli y van Hees 2007) subrayan que la efectividad de los modificadores disminuye al añadirlos en materiales con un alto contenido en sales ya presente. De manera similar, Ruiz Agudo et al. (2024) advierten sobre la posibilidad de provocar las reacciones de disolución y re-precipitación dañinas en los materiales saturados de sales, especialmente si la metodología de aplicación de los modificadores escogida implica humectación.

Debido al desconocimiento tanto sobre el daño por cristalización de sales como sobre la actuación de los modificadores y los posibles perjuicios a largo plazo que pudieran ocasionar sobre los materiales (Rodríguez-Navarro et al. 2000; Martínez-Martínez et al. 2021), el empleo de estos productos para la conservación del patrimonio no suele recomendarse, especialmente sin estudios previos de laboratorio que lo justifique (IPCE 2013). El estudio de los métodos de aplicación también es fundamental, ya que se ha demostrado que influye directamente en la efectividad del producto que se quiera usar (Rodríguez-Navarro et al. 2000; Lubelli y van Hees 2007; Ruiz Agudo et al. 2024). Este desconocimiento es mayor en relación con las mezclas de sales, cuyo comportamiento es considerablemente más complejo.

Las mezclas de sales se dan con más frecuencia, tanto en la naturaleza como en los materiales de construcción, que cada una de sus partes individualmente. Sin embargo, apenas han sido investigadas, ni su comportamiento como agente de deterioro ni su interacción con modificadores de cristalización (Lubelli y van Hees 2007; Linnow et al. 2013; Lindström et al. 2015; Menéndez 2017; Godts et al. 2023; et al. 2024), a pesar de que conformarían un escenario de estudio más realista y, por tanto, aportarían resultados más precisos y relevantes acerca de la efectividad de los modificadores de la sal.

Cabe destacar, por tanto, los estudios de: Linnow et al. (2013), acerca del comportamiento del sistema NaNO_3 -

$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ para tratar de determinar su grado de sobresaturación; Lindström et al. (2015) y Abu Alhassan (2024) al respecto, ambos centrados en la actuación de las mezclas de sales en areniscas; Godts et al. (2023), sobre, entre otros, los sulfatos de sodio y magnesio, su mezcla, y la degradación tanto en materiales pétreos como cerámicos; Wang y Zhang (2023), concretado en la meteorización del patrimonio en piedra por la actuación conjunta de la cristalización de mezclas de sales y la congelación; y Godts et al. (2024), en el que los autores definen el comportamiento de diversas mezclas de sales ante fluctuaciones rápidas y lentas de humedad relativa (HR), del 15% al 95%, bajo temperatura (T) constante de 20°C, con la intención de aportar modelos fidedignos de cara a la elaboración de estrategias de conservación de patrimonio construido, entre otros fines.

El yacimiento arqueológico de Salinas Espartinas (Ciemposuelos, Madrid) engloba un conjunto de estructuras relacionadas con la explotación de la sal, desde el Neolítico hasta el siglo XX, según la Sociedad Española de Historia de la Arqueología (Ayarzagüena y Carnaval 2005:72). Se encuentran en un terreno semidesértico, con gran cantidad de cerros yesíferos, donde Rafael de Rodas y José Luis Casaseca descubrieron la presencia de thenardita (Na_2SO_4) en 1826, junto con otras sales secundarias, como la halita (NaCl), la glauberita ($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$) y la anhidrita (CaSO_4) (IGME 2021). Cabe destacar la presencia de grandes afloramientos de sales, las cuales proceden tanto del suelo como de fuentes de agua salobre subterráneas. Estos afloramientos se formaron hace aproximadamente 15-23 millones de años, durante el Mioceno Inferior, cuando el terreno era lacustre. A causa del cambio a un clima árido, se evaporó el agua presente y precipitaron las sales (endorreísmo), que se mezclaron con los depósitos de yeso y el suelo. A día de hoy, vuelven a ser visibles gracias a los cursos de agua de la zona (Ayarzagüena 2024b; Valiente et al. 2003) [Figura 1].

En base a las fuentes bibliográficas previas (Ayarzagüena y Carnaval 2005; Ruiz-Agudo 2007; García y Valiente 2009; Ayarzagüena 2024a; Ayarzagüena 2024b), se anticipó en la muestra de sal estudiada, tomada directamente de uno de los afloramientos mencionados, la presencia de todas o algunas de las siguientes fases cristalinas: thenardita (Na_2SO_4), glauberita ($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$), mirabilita ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), bloedita ($\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), halita (NaCl), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y epsomita ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Se incluyó además un estudio acerca del comportamiento de un aditivo orgánico, el ácido aminotris-metilenfosfónico (ATMP), en la cristalización de mezclas de sales en el seno de los materiales, ya que resultados previos de Ruiz-Agudo y colaboradores (2007:126-130) concluyeron que era uno de los aditivos que presentaba mejor interacción con los sulfatos, tanto durante su nucleación como su crecimiento, para minimizar el daño que estas sales producen en los materiales.

El objetivo principal de esta investigación es el estudio del modificador de la cristalización de la sal ATMP como posible

tratamiento de conservación de la cerámica y la madera, los dos materiales mejor conservados y más frecuentemente hallados en el yacimiento descrito, tanto en los restos de infraestructuras conservados como fragmentos de objetos de uso. De manera secundaria, se caracterizarán los materiales y su degradación por cristalización de las sales, profundizando en el conocimiento de esta área, de especial relevancia en el caso de la madera, debido a la falta de bibliografía al respecto.

Por lo tanto, el propósito del estudio de los modificadores desde el punto de la vista de conservación patrimonial, en el que se enfoca esta investigación, es determinar la viabilidad de incluir estos productos en futuras intervenciones de conservación y restauración sobre materiales saturados en sales con el fin de lograr su mejor preservación, en concreto los materiales cerámicos y líneos constructivos encontrados en el yacimiento arqueológico [Figura 1].

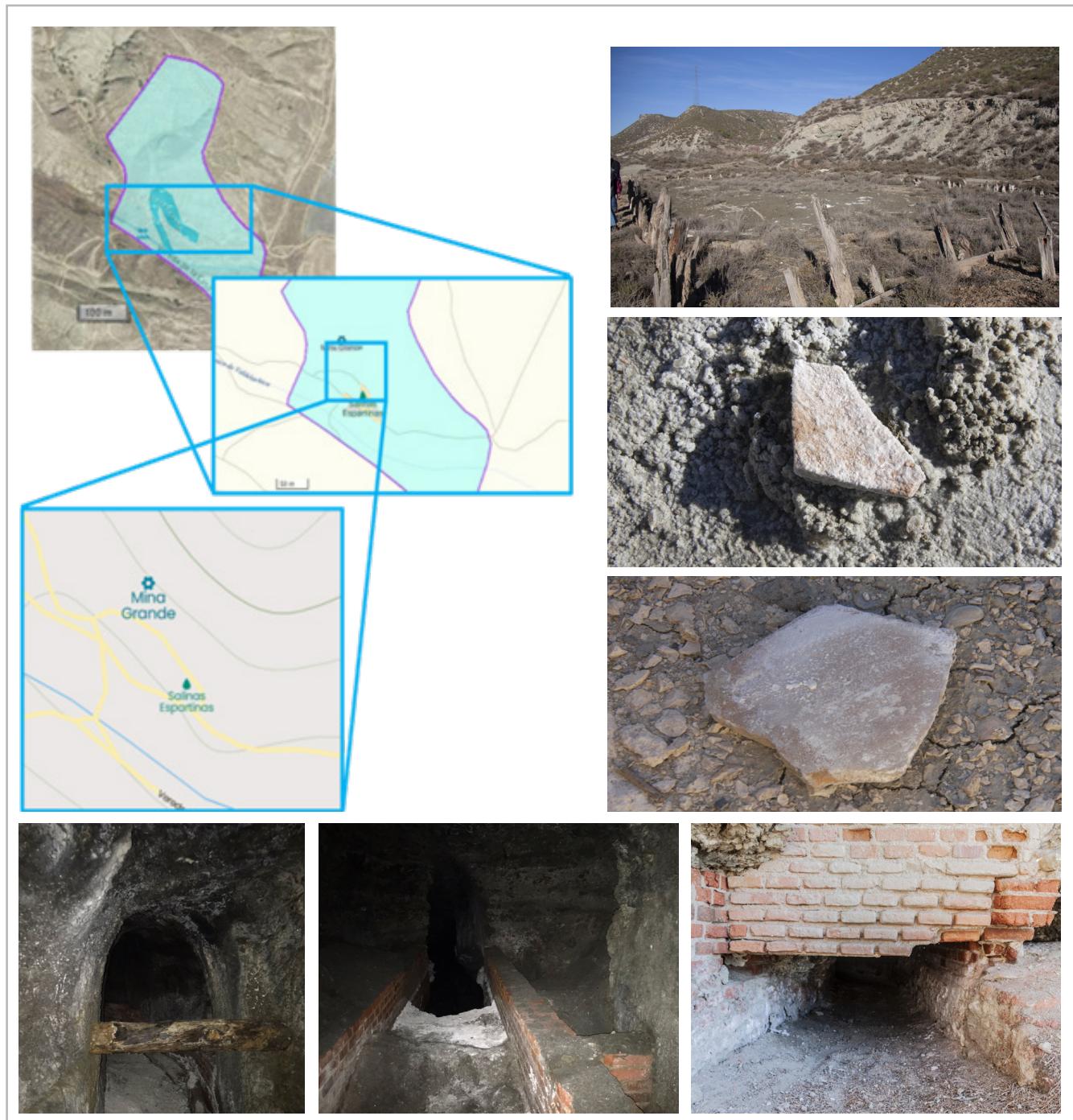


Figura 1.- Localización y materiales en el yacimiento arqueológico Las Salinas Espartinas (Ciempozuelos, Madrid): A) Localización del yacimiento y de la principal fuente de agua salobre subterránea, junto con su acceso por la Mina Grande (IGME 2021, Mapcarta 2021); B) de arriba hacia abajo: tablones de madera perimetrales de la balsa-calentador de San Miguel y fragmentos de cerámica de uso; y C) materiales en el interior y en el exterior de la Mina Grande. Fotografías propias.

Metodología

Para la consecución del objetivo del estudio, se recurrió a la ejecución de ensayos de alteración acelerada, fundamentalmente de cristalización de sales (utilizando mezclas procedentes del yacimiento), sobre probetas preparadas simulando los materiales presentes *in situ*, y el análisis de los efectos de esta cristalización en la cerámica evaluada mediante diferentes técnicas analíticas, como, por ejemplo, porosimetría por intrusión de mercurio (PIM). Se añadió además ATMP a las soluciones salinas, para determinar el efecto del aditivo en el estado de conservación de los materiales y su interacción con la sal. Con la intención de comprobar de manera más realista la efectividad del aditivo, se simularon las condiciones ambientales registradas en el municipio de Ciempozuelos, a partir de los datos recogidos en Weatherspark (2024), en uno de los ensayos de cristalización. Cabe señalar que no se pudo tener acceso a los materiales originales, por lo que las probetas se prepararon a partir de la información recogida en la literatura: la cerámica había sido previamente caracterizada mediante difracción de rayos X en 2009; pero no así la madera, sobre la cual no se pudo conocer la especie concreta empleada en el yacimiento arqueológico estudiado.

En el caso del análisis de las cerámicas de 2009, los autores del estudio identificaron: clorita, esmectita, illita, yeso, mirabilita, caolinita, glauberita, cuarzo, filosilicatos, calcita, dolomita, feldespato potásico y calcosódico. Además, también pudieron determinar que se habrían empleado desengrasantes de naturaleza vegetal en el momento de su fabricación (García y Valiente 2009; Ayarzagüena y Carnaval 2005).

En base a esta composición, se decidió preparar las probetas de cerámica usando una mezcla arcillosa procedente de la localidad de Jun (Granada), con presencia de carbonatos al igual que la cerámica de uso del yacimiento (García y

Valiente 2009). Esta mezcla fue utilizada en la tesis doctoral de Dña. Laura Crespo-López López (2024) y, a partir de la caracterización mediante difracción de rayos X (DRX) recogida en la misma, se pudo constatar la similitud entre ambas.

La forma de las probetas se obtuvo mediante dos moldes de madera de 15x20x4 cm, los cuales dieron lugar a ladrillos, posteriormente cortados en cubos de 4x4 cm. Se contó con 3 kg de mezcla preparada, a los que se añadieron aproximadamente 350 mL de agua/kg de mezcla, amasándolos en cuencos y presionándolos con fuerza contra las paredes de los moldes, colocados previamente sobre acetatos que facilitasen su manipulación. Esta presión ayudaría a expulsar el aire de la masa y favorecer su homogeneidad. Después de una hora de secado, se desmoldaron y cortaron con un cuchillo los cubos, dejándolos secar en una estufa posteriormente durante 30 días a 32°C (simulando un ambiente veraniego, para acelerar el secado). A continuación, se seleccionó una temperatura de cocción de 700°C con una rampa de 2°C/minuto, en base a la presencia de clorita y esmectita documentada en las cerámicas arqueológicas y según el diagrama de la Figura 2.2, que indica que no puede haberse superado esta temperatura al estar presentes estas fases minerales, así como carbonatos. Se mantuvieron los 700°C durante 3 horas y se apagó la estufa. Para enfriarlas, se mantuvieron en su interior durante 24h y después se sumergieron 1h en agua.

Se describen a continuación los ensayos realizados y técnicas analíticas de caracterización utilizadas, de las 24 probetas cúbicas de 4 cm de lado, tanto de cerámica como de madera [Figura 2], incluyendo los valores iniciales y finales de cada uno. Cabe mencionar que no se presentarán en este artículo los resultados de todos los ensayos y técnicas, sino únicamente aquellos considerados más relevantes por la información que revelan sobre el aditivo estudiado.



Figura 2.1.- De izquierda a derecha: Probetas de cerámica preparadas a partir de la mezcla procedente de Jun (Granada) empleada en la tesis doctoral de la Dra. Laura Crespo-López López (2024, UGR), ya que su composición era la más afín a la de la cerámica de uso del yacimiento, caracterizada en 2009 por García y Valiente; y probetas de madera de pino, la especie de madera más comúnmente empleada en España y a la que se recurrió ante la falta de información acerca de la conservada *in situ*.

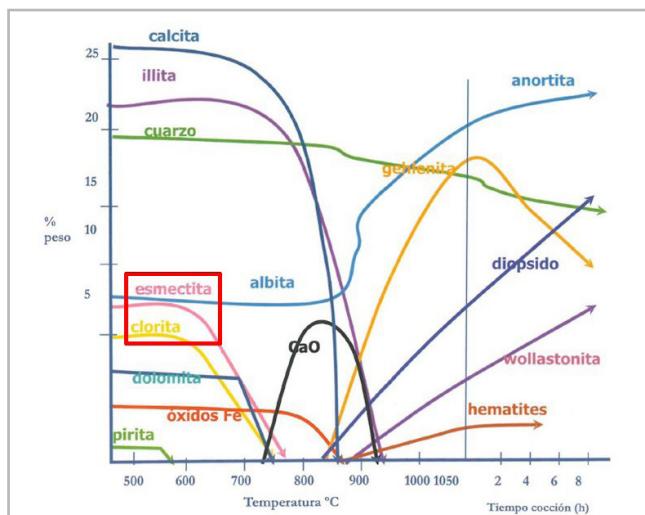


Figura 2.2.- Diagrama de evolución de fases minerales en función de la temperatura de cocción (Peter e Iberg, 1978) editado. Destacadas en rojo las arcillas de la mezcla condicionantes de la cocción.

— Análisis mineralógico

Se caracterizaron la sal y la greda (arcilla verde) procedentes del terreno del yacimiento, además de las probetas cerámicas preparadas, con difracción de rayos X (DRX). Para ello, se empleó un difractómetro de rayos X PANalytical X'Pert Pro (radiación Cu K α , $\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$, rango de 3 a 50° 2 θ , velocidad de barrido de 0.11° 2 θ s $^{-1}$) del Departamento de Mineralogía y Petrología de la Universidad de Granada. Para la completa caracterización de las arcillas de las muestras de greda, se prepararon agregados orientados tratados con etilenglicol (EG), dimetilsulfóxido (DMSO) y calor (<550°C). Por otro lado, se analizó el material filtrado de la solución salina que se utilizó en los ensayos de alteración. La probeta de cerámica también se caracterizó a partir de la absorción de la radiación infrarroja (IR) en los espectrómetros JASCO 6600 y JASCO 6200 en el rango de frecuencia de 400-4000 cm $^{-1}$, resolución 2 cm $^{-1}$ y 32 acumulaciones, también del departamento anteriormente citado.

Adicionalmente, se caracterizó la sal mediante termogravimetría y calorimetría diferencial de barrido (TGA/DSC) con un equipo TGA/DSC de Mettler-Toledo, en el rango de temperatura de 25-950°C, velocidad de calentamiento de 20 K/min, flujo de aire de 120 mL/min, del mismo departamento. Finalmente, se recurrió a la espectroscopía Raman con HORIBA XPloré Plus, del Departamento de Mineralogía y Petrología de la UGR, para observar el proceso de cristalización del sulfato sódico (sal mayoritaria del yacimiento), gracias al microscopio óptico acoplado en el equipo. Se depositaron dos gotas de 20 µm de dos soluciones salinas al 12% en agua, con y sin aditivo, sobre un portamuestras de vidrio. En el caso de la solución aditivada, el ATMP se preparó con una concentración de 0.001 M. Se depositaron gotas esféricas, de tamaños notoriamente distintos entre sí, para determinar la influencia del tamaño de gota en la velocidad de cristalización.

— Ensayos de caracterización hídrica

Para los ensayos de caracterización hídrica se siguió la norma para la ejecución de los ensayos de humedad-sequedad (UNE EN 16322:2016) y se realizaron 15 ciclos a lo largo de 3 semanas. Las probetas secas, tres de madera y tres de cerámica, se pesaron y a continuación se introdujeron en la estufa a 105°C durante 20 horas, tras las cuales se volvieron a pesar y se mantuvieron durante 2 horas a temperatura ambiente (22°C). Se sumergieron en agua durante 2 horas y a continuación se secaron en la estufa a la temperatura y durante el tiempo previamente indicados, reiniciándose el ciclo. Posteriormente se continuó con el ensayo de absorción-desorción, atendiendo a la norma UNE EN 13755:2008. Si bien esta norma se refiere a piedra natural, el ensayo que plantea tiene en cuenta los sulfatos que también se emplearon en este estudio. Una vez pesadas las probetas secas (de nuevo, tres de cada material) se introdujeron en agua y se tomaron nuevas medidas de peso cada 5 minutos durante 2 horas. A continuación, se mantuvieron las probetas en una cámara de vacío por un periodo de 17 horas, de manera que se saturase el sistema poroso de las probetas, incluyendo el aislado. Por último, se midió el peso para ver el proceso de secado siguiendo la norma UNE EN 16322:2016.

— Ensayos de envejecimiento artificial acelerado

En cuanto a la duración de los ensayos de alteración acelerada, se consideraron suficientes 15 ciclos por ensayo de cristalización, 5 por semana durante 3 semanas. Se estableció este número de ciclos ya que, tanto en normativa UNE como en la RILEM, se observan resultados a partir de la segunda semana. También fue debido a las limitaciones temporales con las que se contaba en el momento de ejecución. Todos los ensayos descritos a continuación se realizaron con probetas cerámicas y de madera.

• Ensayos de hielo-deshielo

De acuerdo con la norma UNE EN 14617-5:2012, si bien esta tiene por objeto de estudio la piedra aglomerada, las probetas secas (tres de cada material) se mantuvieron inmersas durante 48 horas en agua desmineralizada, para garantizar su saturación y después de haber sido pesadas. A continuación, se introdujeron en el congelador a -20°C por un periodo de 10 horas, para volver a sumergirlas en agua a temperatura ambiente de 22°C durante 14 horas hasta la descongelación. Se repitió durante 15 ciclos, como en todos los casos anteriores.

• Ensayo de cristalización de sales

Se tomó como referencia la norma UNE-EN 16455:2016, la cual, aunque se refiere específicamente a los materiales pétreos, incluye el sulfato sódico, que coincide con la

composición mayoritaria de la muestra de sal analizada. Además, y teniendo en cuenta que no existen normas específicas para la degradación de madera, se decantó por recurrir a la ya mencionada como referencia y poder comparar la respuesta de los materiales ante un mismo proceso. Este ensayo normalizado se nombrará como SALES 1 de ahora en adelante y se realizó sobre seis probetas de cada material, tres sin aditivo y tres con aditivo. Adicionalmente, se diseñó un ensayo por saturación combinado con ciclos de humedad, buscando reproducir específicamente las condiciones observadas en el yacimiento de Salinas Espartinas y analizar el efecto de transiciones de fases (de mirabilita a thenardita, en el caso del sistema de sulfato sódico) [Figura 3], inducidas por exposición a distintas humedades relativas (HR) controladas mediante gel de sílice e higrómetros, a una temperatura constante [Tabla 1]. De esta forma, se imitan los posibles procesos de cristalización en el yacimiento. Este ensayo diseñado se denominará SALES 2, nuevamente sobre seis probetas de cada material, distinguiendo tres con aditivo de las tres restantes sin aditivo.

Para ambos ensayos, se prepararon dos tipos de soluciones salinas, a partir de la sal del yacimiento disuelta en agua,

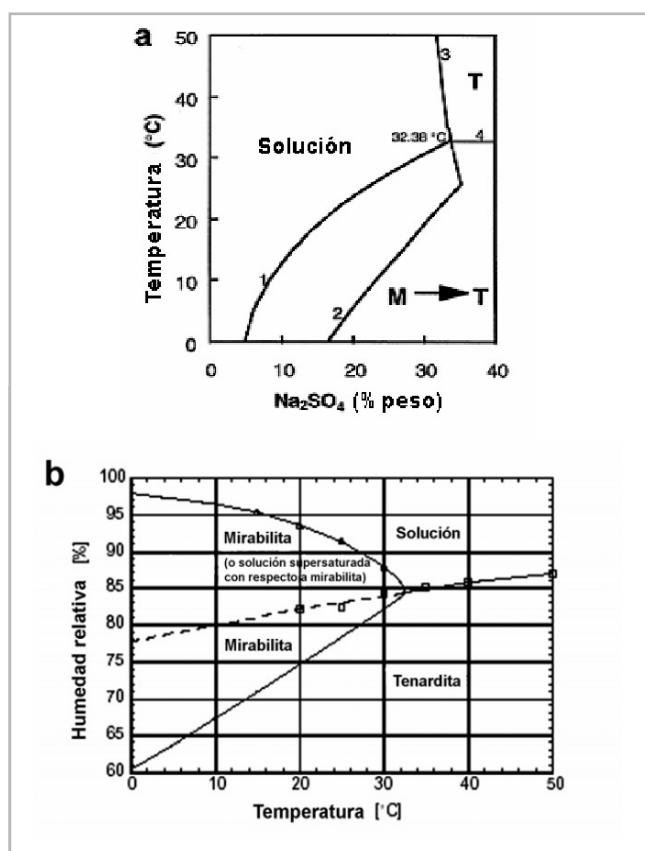


Figura 3.- De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: Diagrama de solubilidad del sistema sulfato sódico-agua: a) T-peso-mirabilita y b) HR-T. La primera curva en a) es de equilibrio de la fase heptahidratada o metaestable; mientras que la segunda curva es la de transición entre esta fase a la mirabilita. La tercera curva es la de equilibrio de thenardita y la cuarta la de transición de mirabilita a thenardita. Fuente: Rodríguez Navarro et al. 2000a

	SALES 1	SALES 2
Secado de probetas	17 horas, en estufa a 105°C	
Temperatura ambiente	2 horas	-
Inmersión en solución salina	4h	48 horas para garantizar saturación de probetas. La mitad se sumergieron en solución salina con aditivo.
Secado de probetas	17 horas, en estufa a 105°C	-
Exposición a 60% HR	-	10 horas
Exposición a 90% HR	-	14 horas

Tabla 1.- Pasos de ambos ensayos de cristalización realizados. Fuente: elaboración propia.

en las que se sumergieron las probetas: una de control -sin aditivo- y otra con la sal y el aditivo ATMP. En total, se prepararon 4 L de solución, destinando 2 L a cada tipo y manteniendo una proporción de 120 g de sal en 880 mL de agua desmineralizada (soluciones de 1 L con sal al 12%), todas ellas filtradas para eliminar las arcillas y otras impurezas que habían precipitado. En el caso de las soluciones con ATMP, se añadieron 0.448g (0.001M) del aditivo en el 1.5L de agua necesario para la inmersión de las probetas

— Porosimetría por intrusión de mercurio (PIM)

Tras los ensayos de sales, se determinó el tamaño y distribución de la porosidad abierta de las probetas cerámicas mediante PIM. Para ello, se analizaron cinco fragmentos: uno inalterado, como control; dos procedentes de una probeta sin aditivo, de los cuales uno fue desalado; y dos procedentes de una probeta con aditivo, de los cuales uno fue desalado. Este análisis se realizó con el equipo Romero FLOWtronic y el software MicroActive AutoPore V del Departamento de Mineralogía y Petrología de la UGR.

2.1.5. Microscopía óptica con luz polarizada (MOP) y microscopía electrónica de barrido con análisis composicional mediante dispersión de energía de rayos X (SEM-EDX).

Para la caracterización mediante MOP y SEM-EDX, se prepararon tres láminas delgadas de probetas cerámicas, una de ellas inalterada, tomada como control, y dos tomadas de material cerámico después de los ensayos, tanto sin como con aditivo. El equipo utilizado para el análisis de SEM-EDX ha sido el microscopio modelo Auriga, Carl Zeiss SMT del Centro de Instrumentación Científica (CIC) de la UGR y Thermo Scientific Phenom XL del Departamento de Mineralogía y Petrología de la misma universidad.

Resultados y discusión

A continuación, se destacan únicamente los resultados que se consideraron más relevantes en relación con el comportamiento del aditivo en los materiales y de su degradación a causa de la cristalización de la sal. Estos son: espectroscopía Raman, ensayos de cristalización y porosimetría por intrusión de mercurio (PIM).

— Espectroscopía Raman

Atendiendo a la descripción realizada de este análisis (apartado 2.1.1. Análisis mineralógico), los tiempos de cristalización y dimensiones de las gotas se presentan en la Tabla 2.

Este análisis puso de manifiesto que los cristales formados presentaban una estructura acicular y morfologías congruentes con el rápido crecimiento observado, especialmente acelerado en presencia del aditivo. Tal y como se refleja en la Tabla 2, la cristalización de las gotas con ATMP no sólo comenzó tres veces más tarde que en el caso de la solución control, sino que además duró menos tiempo (17 minutos sin ATMP frente a 14 minutos con ATMP). Consecuentemente, las dimensiones de anchura y longitud del cristal final formado son menores [Figura 4], lo cual podría implicar una disminución del daño asociado a la cristalización de la sal.

A raíz de estas observaciones, se dedujo que el ATMP efectivamente había actuado como inhibidor de la nucleación, retrasando el inicio de la cristalización, aunque acelerando la velocidad de crecimiento. Este efecto inhibidor posibilita que la cristalización tenga lugar en la superficie del material en forma de eflorescencias, como se pudo observar durante los ensayos, lo cual también reduce el daño que las sales ocasionan en el interior (Ruiz Agudo 2007:63).

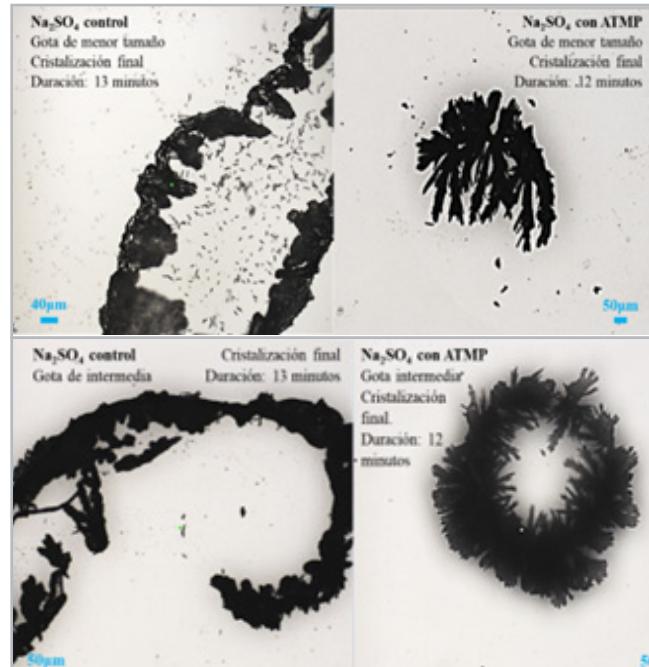


Figura 4.- Comparación de gotas de disolución con y sin aditivo, de diferente tamaño. Fuente: elaboración propia.

— Ensayos de cristalización

En el caso del ensayo de SALES 1, el comportamiento de cada material fue notoriamente distinto entre sí, con y sin aditivo [Figura 5].

El mejor resultado, en términos de cambios de peso registrados al final del último ciclo de ensayos, fue observado en las probetas cerámicas con aditivo, seguido por las probetas cerámicas sin aditivo, las probetas de madera sin aditivo y, por último, las probetas de madera con aditivo.

Las probetas cerámicas con aditivo no llegaron a perder peso por debajo de los valores iniciales, mientras que las

GOTA		DIÁMETRO INICIAL (cm)	DIMENSIÓN CRISTALIZAC. (a x L, cm)	INICIO CRISTALIZAC. (minutos)	FIN CRISTALIZAC. (minutos)
Con ATMP	PEQUEÑA	0.155	0.0525 x 0.055	9.36	12
	MEDIANA	0.225	0.1025 x 0.1	23.14	26
Sin ATMP	PEQUEÑA	0.156	0.075 x 0.106	3.40	13
	MEDIANA	0.175	0.215 x 0.125	20.37	28

Tabla 1.- Datos de las medidas en Raman de la cristalización de sales. La columna “Dimensión” se refiere a las dos dimensiones del espacio, una vez finalizada la cristalización, que pudieron medirse en la pantalla del monitor y convertir a cm de acuerdo a una escala conocida, aportada por el programa (siendo 2^a el ancho máximo y “L” la longitud máxima). La columna “Inicio cristalización” se refiere a los minutos transcurridos desde que se inició la prueba e incremento térmico hasta el momento en el que comenzó la cristalización. La columna “Fin cristalización” se refiere a los minutos transcurridos desde que se inició la prueba hasta que finalizó la cristalización. Fuente: elaboración propia.

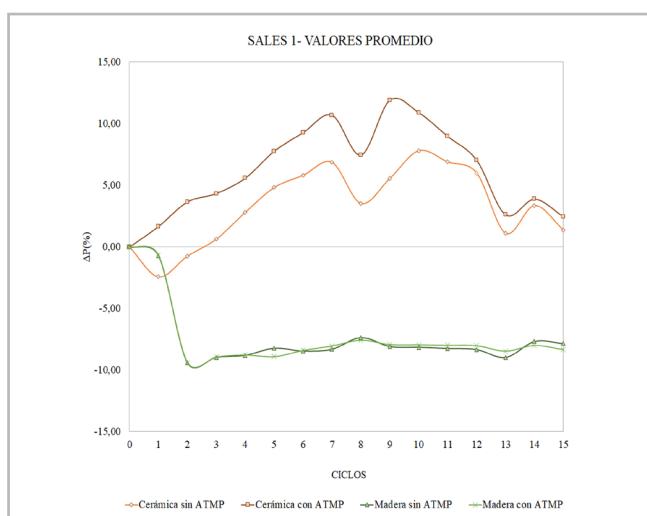


Figura 5.- Resultados de los ensayos de cristalización de sales (Sales 1): comparación de valores promedio de cambio de peso de ambos materiales a lo largo del ensayo, con y sin aditivo ATMP. Fuente: elaboración propia.

probetas cerámicas sin aditivo sí, si bien a lo largo del ensayo volvieron a presentar valores positivos. El comportamiento de ambos grupos de probetas cerámicas fue bastante similar a lo largo del ensayo, aproximándose más en los últimos ciclos, si bien se puede apreciar que las probetas cerámicas con aditivo continuaron presentando valores de peso superiores a los de las probetas cerámicas sin aditivo.

Los mayores valores de peso obtenidos en las probetas cerámicas con aditivo se atribuyeron a una menor pérdida de material [Figura 6]. Sin embargo, también se tuvo en cuenta que probablemente las sales cristalizadas en el interior de las probetas habrían aportado al peso de las mismas, lo cual explicaría, a su vez, el aumento de peso de las probetas cerámicas sin aditivo a lo largo del ensayo. En cuanto a la madera, tal y como se puede observar en la gráfica [Figura 5], el comportamiento de ambos grupos (con y sin aditivo) fue prácticamente idéntico desde el inicio, con una pérdida de peso drástica a partir del segundo ciclo. Esto se entendió como que el modificador ATMP no había sido efectivo en estas probetas, probablemente debido a la naturaleza orgánica de la madera. Los bajos valores de peso reflejados en la gráfica se asociaron también a la naturaleza higroscópica del material: debido a esta, la madera tiende a contraerse y dilatarse ante grandes aportaciones de humedad y cambios de temperatura, lo cual a su vez fractura el material, en este caso de manera simultánea a la cristalización de sales. En la Figura 5 se puede observar que, en los últimos ensayos, las probetas de madera sin aditivo superan en términos de peso a las probetas con aditivo. Si bien a priori podría parecer como un resultado radicalmente opuesto al esperado, cabe también la posibilidad de que el aumento de peso en las probetas lígneas sin aditivo se deba casi mayoritariamente al aporte por la cristalización de sales en su interior.

Apenas existen estudios acerca de la degradación por cristalización de sales y el uso de modificadores de la

misma en madera, por lo que sería conveniente continuar el estudio sobre este material para comprender mejor las radicales diferencias de comportamiento observadas.

Al término de SALES 1, se filtraron las soluciones salinas en las que habían estado sumergidas las probetas cerámicas, para recuperar el material liberado o desprendido durante el ensayo. Una vez seco, se pesó y comparó con el peso inicial de las probetas. De la solución salina control, se pesaron 16.854g de fragmentos cerámicos desprendidos y 1.494g totales retenidos en los filtros (en total 18.348g).

En el caso de la solución con ATMP, el peso de los fragmentos desprendidos fue de 12.333g, mientras que el del material retenido en los filtros alcanzó los 0.579g (en total 12.912g).



Figura 6.1.- Estado de conservación de las probetas durante y después del ensayo SALES 1: A) De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: erosión superficial de probeta cerámica con aditivo; disgragación de arista de probeta cerámica con aditivo; fracturación y disgragación de esquinas de probeta cerámica sin aditivo; y oscurecimiento heterogéneo de probeta de madera con aditivo; y B) De izquierda a derecha: fragmentos desprendidos de las probetas cerámicas durante el ensayo de SALES 1, de aquellas sumergidas en la solución salina con y sin ATMP, tras 24 horas de secado al aire libre y la cristalización de sales sobre ellos. Fotografías propias.



Figura 6.1.- Estado de conservación de las probetas durante y después del ensayo SALES 2: A) De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo: oscurecimiento de probeta de madera sin aditivo; oscurecimiento e inicio de fracturación de probeta de madera sin aditivo; oscurecimiento de probeta de madera sin aditivo; y formación de eflorescencia salina en los anillos de crecimiento de la probeta de madera sin aditivo; y B) De arriba hacia abajo: probetas de madera con aditivo y en las que se produjo colonización biológica (no se estableció relación entre ambos hechos); y aspecto final de las seis probetas cerámicas empleadas en este ensayo, correspondiéndose las tres más alejadas con el grupo con aditivo y las tres más cercanas con el grupo sin aditivo. Fotografías propias.

todos ellos valores considerablemente menores a los registrados en el caso de las probetas sin ATMP.

El peso medio inicial de las probetas en ambos grupos cerámicos, con y sin ATMP, era de $\pm 32\text{g}$. Por lo tanto, en el grupo de las probetas sumergidas en solución control, el peso total del material disgregado se correspondería aproximadamente con el 57.34% de su peso inicial. En el grupo de las probetas con ATMP, en torno al 40.35%.

Esta cuantificación aproximada de la pérdida del material de las probetas permitió establecer una relación entre la presencia del aditivo y el estado de conservación de los materiales: el aditivo parecía minimizar la cantidad de sales cristalizadas y la pérdida de material que éstas provocan. Estas conclusiones se confirmaron al observar el mismo material disgregado tras 24 horas de secado a temperatura ambiente [Figura 6.1].

En el ensayo de SALES 2, la pérdida de peso [Figura 7] pareció mayor tras la exposición a menor HR (60%), en la que podría haber aparecido thenardita, de acuerdo con el diagrama de solubilidad del sistema sulfato sódico en agua anteriormente presentado [Figura 3]. A falta de confirmar la fase salina presente, esto se atribuyó al descenso de la humedad, tanto en el ambiente como la absorbida por los materiales, y no a una fase de sulfato más dañina. Cabe mencionar que, en cualquier caso, no parece existir consenso acerca de qué fase resulta más perjudicial: según Steiger y Asmussen (2008:4303), sería la mirabilita; mientras que Granneman et al. (2019:187) sostienen que es la thenardita.

Por otra parte, en las probetas cerámicas, la pérdida de peso fue paulatina y constante, sin pérdidas súbitas, en todos los casos. Apenas hubo diferencias atribuibles al ATMP, excepto, quizás, al término del ensayo: las probetas que habían estado sumergidas con el modificador mantuvieron pesos más elevados en ambas HR en los últimos 5 ciclos, en comparación con sus análogos sin aditivo [Figura 7.C.]. Esta diferencia se asoció a que se habría conservado una mayor cantidad de material como consecuencia de la presencia de ATMP. En el caso de las probetas de madera, no fue posible identificar ninguna mejora derivada del ATMP, de nuevo demostrando un comportamiento opuesto a las probetas cerámicas [Figura 7.A.-7.B.].

— Porosimetría por intrusión de mercurio

Se realizó un análisis de PIM sobre una probeta cerámica inalterada, tal y como se encuentra descrito en el apartado 2.1.4 Porosimetría por intrusión de mercurio (PIM), con el objetivo de comprobar el efecto de la cristalización de sales en el sistema poroso del material por comparación de la muestra, con y sin sales, así como determinar el impacto del aditivo en el daño que las sales causan al sistema poroso del material [Figura 8, Tabla 3].

La primera medida se llevó a cabo sobre una probeta cerámica inalterada, tomada como referencia. En este caso, la porosidad de la cerámica se encontraba en torno al 18,93%, con un diámetro medio de poro de 893 nm y una densidad aparente de 1.923 g/mL [Figura 8].

Los resultados obtenidos indicaron que los fragmentos de probetas con sal presentaron diámetros medios de poro inferiores al de la probeta control, probablemente por la presencia de sales cristalizadas que obstruían los poros. Cabe mencionar que los valores de la probeta con ATMP se

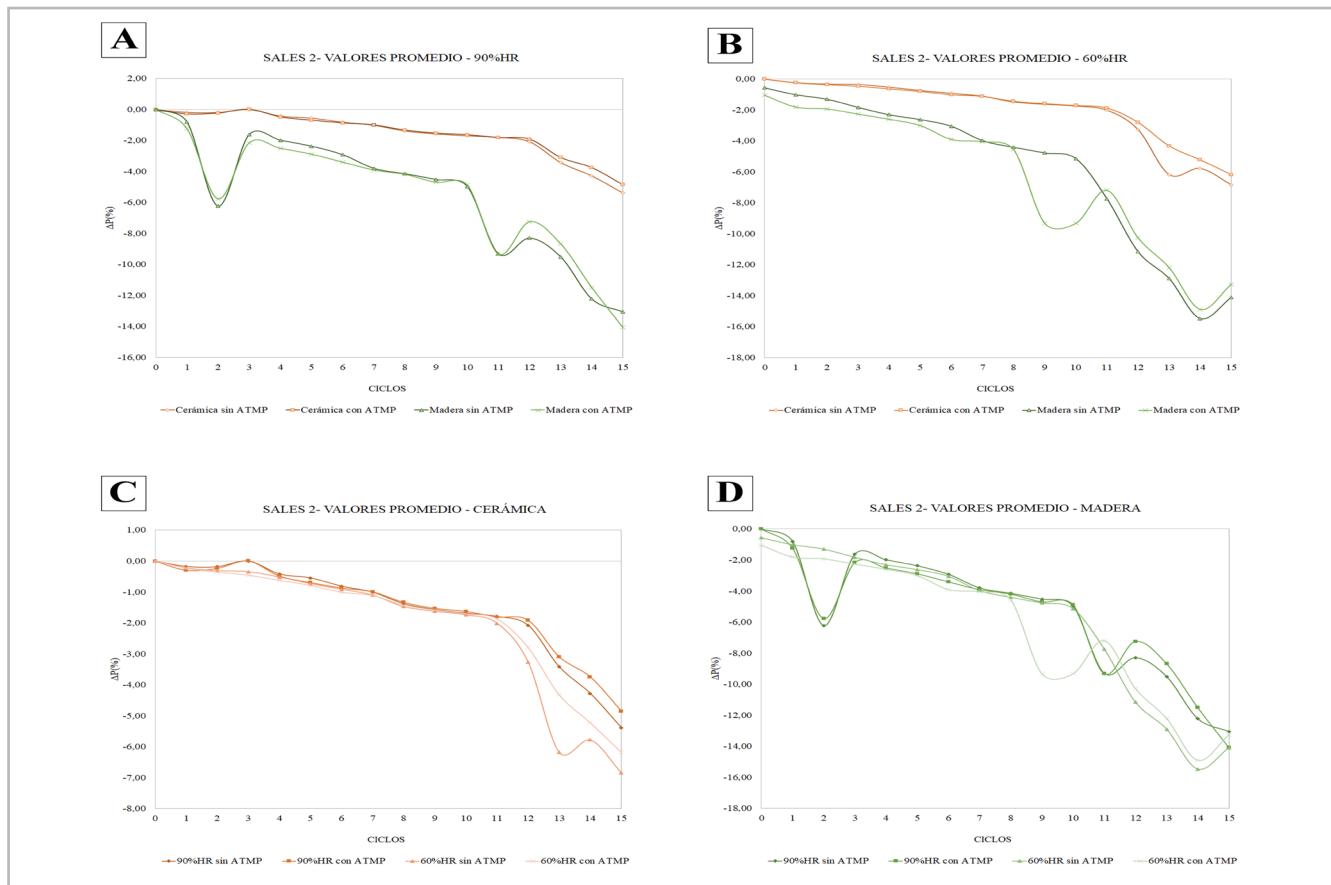


Figura 7.- Valores promedio de pérdida de peso durante el ensayo de cristalización SALES 2 de: A) cerámica y madera en ambiente de 90% HR, con y sin ATMP; B) cerámica y madera en ambiente de 60% HR, con y sin ATMP; C) cerámica en ambientes al 60% y 90% HR, con y sin ATMP; y D) madera en ambientes al 60% y 90% HR, con y sin ATMP. Fuente: elaboración propia.

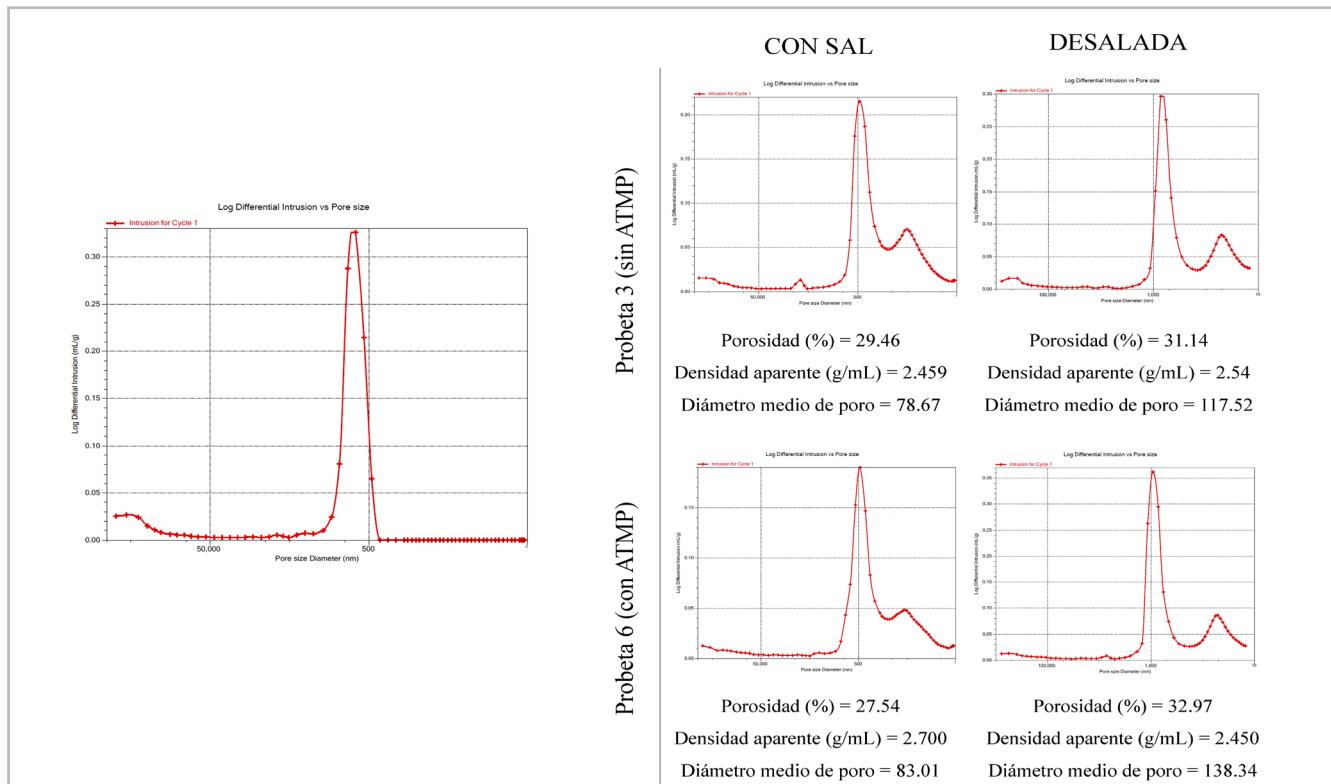


Figura 8.-Arriba, la distribución de tamaño de poro de la probeta inalterada. A la derecha, los datos relativos a las probetas cerámicas alteradas, sin y con aditivo, tanto antes como después de ser desaladas. Fuente: elaboración propia.

mantuvieron más próximos a los de la probeta control, si bien la diferencia fue irrisoria. En el resto de valores contemplados (porosidad y densidad aparente), las probetas alteradas se alejan bastante de los correspondientes a la probeta control, independientemente de la presencia del aditivo y sobre todo después de desaladas [Figura 8]. Por lo tanto, sólo se podría considerar los valores de diámetro medio de poro como indicativo de la efectividad del aditivo para reducir el daño por sales en el sistema poroso, pero sería necesario profundizar en esta línea de investigación ya que los resultados obtenidos no son concluyentes.

Conclusiones

Esta investigación ha recurrido a ensayos normalizados y reproducibles. Por lo tanto, se considera que los resultados obtenidos son precisos, además de que aportan información que abren nuevas preguntas en relación con ámbitos de estudio ya abordados.

Se comprueba que el aditivo ATMP fue efectivo en la reducción de los efectos de las sales en la cerámica debido a su efecto inhibidor en la nucleación de la mezcla de sales estudiadas, pues retrasó el inicio de la cristalización, posibilitando, que se minimizasen o directamente no ocurriesen otras formas de daño, como podría ser la fracturación. Por ello, se plantea como una solución eficaz en el tratamiento para la conservación de materiales arqueológicos expuestos a ambientes salinos, especialmente aquellos inorgánicos, a juzgar por las diferencias observadas entre cerámica y madera. Existe una falta de investigación en relación con este último material y los modificadores de la cristalización de la sal, en la que sería interesante profundizar para definir las diferencias que parecen existir entre soportes orgánicos e inorgánicos frente a estos aditivos.

Agradecimientos

Al Departamento de Mineralogía y Petrología de la Universidad de Granada, por permitir el uso de sus equipos y sus espacios, en el marco del máster en Ciencia y tecnología en patrimonio arquitectónico. De igual manera, al grupo de investigación RNM179 y a la Unidad Científica de Excelencia "Carbonatos" UCE-PP2016-05 por el apoyo prestado.

Referencias

ABU ALHASSAN, Y. (2024). Laboratory investigation of sodium ferrocyanide as a crystallization inhibitor to prevent the destruction of rock-cut monuments in Petra-Jordan due to the attack of salt mixtures. *Egyptian Journal of Archaeological and Restoration Studies*, 14(1): 11-12. <https://doi.org/10.21608/ejars.2024.361168>

AENOR, (2008). Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de humedad a presión atmosférica. UNE EN 13755:2008. Madrid.

AENOR, (2010). Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua (dp). UNE EN 15803:2010. Madrid.

AENOR, (2012). Piedra aglomerada. Métodos de ensayo. Parte 5: Determinación de la resistencia al hielo y al deshielo. UNE EN 14617-5:2012. Madrid.

AENOR, (2016). Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Determinación de las propiedades de secado. UNE EN 16322:2016. Madrid.

AENOR, (2016). Conservación del patrimonio cultural. Extracción y determinación de sales solubles en la piedra natural y materiales afines utilizados en el patrimonio cultural. UNE-EN 16455:2016. Madrid.

AYARZAGÜENA SANZ, M. Y CARNAVAL GARCÍA, D., (2005) Sistemas de explotación de la sal en las Salinas Espartinas en Ayarzagüena, M. y Puche, O. (editores), *Minería y metalurgia históricas en el sudoeste europeo*, Madrid: Sociedad Española de Historia de la Arqueología, 71-79.

AYARZAGÜENA SANZ, M. (2024a, 20 de febrero) Comunicación personal durante la visita al yacimiento arqueológico de Salinas Espartinas (Ciempozuelos, Madrid).

AYARZAGÜENA SANZ, M. (2024b, 13 de junio) Comunicación personal.

BOLETÍN OFICIAL DE LA COMUNIDAD DE MADRID, (2006). *Decreto 45/2006 de 18 de mayo por el que se declara bien de interés cultural, en la categoría de zona arqueológica "Las Salinas Espartinas" en el término municipal de Ciempozuelos N° 122, 2* http://w3.bocm.es/boletin/CM_Boletin_BOQM/20060524_B/12200.PDF [consulta: 20/2/2024]

CARDINALI, F., BRACCIALE, M. P., SANTARELLI, M. L., Y MARROCCHI, A. (2021). Principal Component Analysis (PCA) Combined with Naturally Occurring Crystallization Inhibitors: An Integrated Strategy for a more Sustainable Control of Salt Decay in Built Heritage. *Heritage*, 4(1): 220-229. <https://doi.org/10.3390/heritage4010013>

CASSAR, J., MARROCCHI, A., Y SANTARELLI, M. L. (2008). Control de los daños por cristalización en la caliza de Malta mediante inhibidores de sales. *Materiales de Construcción*, 58: 2-13. <https://doi.org/10.3989/MC.2008.V58.I289-290.83> [consulta: 13/11/2024]

CRESPO-LÓPEZ LÓPEZ, L. (2024) *Wastebrick. Improvement in bricks production by the addition of conventional waste as a breakthrough in the construction industry*. [Tesis Doctoral, Universidad de Granada]. <https://hdl.handle.net/10481/92351> [consulta: 9/4/2024]

CULTRONE, G., SEBASTIÁN, E., ELERT, K., DE LA TORRE, M. J., CAZALLA, O., Y RODRIGUEZ-NAVARRO, C. (2004). Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. *Journal of the European Ceramic Society*, 24(3): 547-564. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00249-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00249-8) [consulta: 9/4/2024]

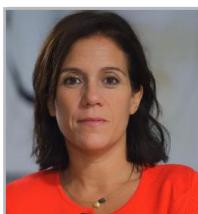
GARCÍA, R. Y VALIENTE, S. (2009) Estudio de las muestras cerámicas documentadas en Salinas Espartinas y de las tierras de su entorno en *La Explotación histórica de la Sal: Investigación y puesta en valor*.

- Memorias de la Sociedad Española de la Arqueología II, Madrid: Sociedad Española de la Historia de la Arqueología, 193-206.
- GODTS, S., ORR, S. A., STEIGER, M., STAHLBUHK, A., DE KOCK, T., DESARNAUD, J., DE CLERCQ, H., Y CNUDDE, V. (2023). Salt mixtures in stone weathering. *Scientific Reports*, 13(1): 13306. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40590-y>
- GODTS, S., STEIGER, M., STAHLBUHK, A., ORR, S. A., DESARNAUD, J., DE CLERCQ, H., CNUDDE, V., Y DE KOCK, T. (2024). Modeled versus Experimental Salt Mixture Behavior under Variable Humidity. *ACSOmega*, 9(18): 20454-20466. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01486>
- GRANNEMAN, S. J. C., LUBELLI, B., Y VAN HEES, R. P. J. (2019). Mitigating salt damage in building materials by the use of crystallization modifiers – a review and outlook. *Journal of Cultural Heritage*, 40: 183-194. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.05.004> [consulta: 13/11/2024]
- GROSSI, C. M., YESBERT, R. M. (1994). Las sales solubles en el deterioro de rocas monumentales. Revisión bibliográfica. *Materiales de Construcción*, 44(235): 15-30. <https://doi.org/10.3989/mc.1994.v44.i235.579> [consulta: 13/12/2024]
- INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA, (2021). Salinas Espartinas. <http://info.igme.es/ielig/LIGInfo.aspx?codigo=TM038#situaciongeologica>
- INSTITUTO DE PATRIMONIO CULTURAL DE ESPAÑA, (IPCE). (2013). Proyecto Coremans: Criterios de intervención en materiales pétreos. Secretaría General Técnica. Subdirección General de Documentación y Publicaciones. <https://doi.org/10.4438/030-13-278-9>
- LINNOW, K., STEIGER, M., LEMSTER, C., DE CLERCQ, H., Y JOVANOVIĆ, M. (2013). In situ Raman observation of the crystallization in $\text{NaNO}_3\text{-Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ solution droplets. *Environmental Earth Sciences*, 69(5): 1609-1620. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1997-0>
- LÓPEZ-ARCE, P. (2012) Daños por cristalización de sales en La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio, Madrid: Universidad Complutense de Madrid, 97-107. <http://hdl.handle.net/10261/46797> [consulta: 20/5/2024]
- LUBELLI, B., Y VAN HEES, R. P. J. (2007). Effectiveness of crystallization inhibitors in preventing salt damage in building materials. *Journal of Cultural Heritage*, 8(3): 223-234. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.06.001> [consulta: 3/12/2024]
- MAPCARTA (2021) Salinas Espartinas. <https://mapcarta.com/es/N1482406168/Mapa>
- MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, J., TORRERO, E., SANZ, D., Y NAVARRO, V. (2021). Salt crystallization dynamics in indoor environments: Stone weathering in the Muñoz Chapel of the Cathedral of Santa María (Cuenca, central Spain). *Journal of Cultural Heritage*, 47: 123-132. <https://doi.org/10.1016/j.jculher.2020.09.011> [consulta: 3/12/2024]
- MENÉNDEZ, B. (2017) Estimation of salt mixture damage on built cultural heritage from environmental conditions using ECOS-RUNSALT model. *Journal of Cultural Heritage* 24: 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.11.006> [consulta: 22/1/2025]
- OGUCHI, C.T., Y YU, S. (2021) A review of theoretical salt weathering studies for stone heritage. *Progress in Earth and Planetary Science* 8: 32. <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00414-x> [consulta: 22/1/2025]
- PETERS, T.; IBERG, R. (1978). Mineralogical changes during firing of calcium-rich brick clays. *Ceramic Bulletin*, 57 (5): 503-509
- RODRÍGUEZ-NAVARRO, C., Y DOEHNE, E. (1999). Salt weathering: Influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(3):191-209. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199903\)24:3%3C191::AID-ESP942%3E3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199903)24:3%3C191::AID-ESP942%3E3.0.CO;2-G) [consulta: 3/12/2024]
- RODRÍGUEZ-NAVARRO, C., DOEHNE, E., Y SEBASTIAN, E. (2000). Influencing Crystallization Damage in Porous Materials through the Use of Surfactants: Experimental Results Using Sodium Dodecyl Sulfate and Cetyltrimethylbenzylammonium Chloride. *Langmuir*, 16(3): 947-954. <https://doi.org/10.1021/la990580h>
- RUIZ-AGUDO, E. M. (2007). Prevención del daño debido a la cristalización de sales en el patrimonio histórico construido mediante el uso de inhibidores de la cristalización. [Tesis Doctoral, Universidad de Granada]. <http://hdl.handle.net/10481/1710> [consulta: 26/2/2024]
- RUIZ AGUDO, E., IBÁÑEZ-VELASCO, A., RUIZ AGUDO, C., BONILLA-CORREA, S., ELERT, K., Y RODRÍGUEZ-NAVARRO, C. (2024). Damage of porous building stone by sodium carbonate crystallization and the effect of crystallization modifiers. *Construction and Building Materials*, 411: 134591. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134591>
- SCHIRO, M., RUIZ-AGUDO, E., Y RODRÍGUEZ-NAVARRO, C. (2012). Damage Mechanisms of Porous Materials due to In-Pore Salt Crystallization. *Physical Review Letters*, 109(26): 265-503. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.265503> [consulta: 18/6/2025]
- STEIGER, M., Y ASMUSSEN, S. (2008). Crystallization of sodium sulfate phases in porous materials: The phase diagram $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ and the generation of stress. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(17):4291-4306. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.05.053> [consulta: 1/5/2025]
- VALIENTE, S.; GEA, A.; LÓPEZ, J. F. Y AYARZAGÜENA, M., (2003) Algunos datos sobre cestería y fibras vegetales aplicadas a vasijas en barro de la Edad de Bronce en las Salinas Espartinas (Ciempozuelos, Madrid), en Revista Pátna Dic. 2003 época II, 12: 101–105.
- VAVOURAKI, A. I., Y KOUTSOUKOS, P. G. (2015). The inhibition of crystal growth of mirabilite in aqueous solutions in the presence of phosphonates. *Journal of Crystal Growth*, 436: 92-98. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2015.11.044>
- WANG, Y., Y ZHANG, H. (2023). The synergic impacts of salt mixture and frost damage on rock decay: Implications for the deterioration of rock-hewn heritages. *Heritage Science*, 11(1): 209. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-01054-8>
- WEATHERSPARK (2024) Ciempozuelos <https://weatherspark.com/y/36904/Average-Weather-in-Ciempozuelos-Spain-Year-Round>

Autor/es

Blanca Zarzalejos Vicens
blanca.zarzalejos@estudiante.uam.es
 Universidad Autónoma de Madrid
<https://orcid.org/0009-0008-4063-1460>

Graduada en Conservación y Restauración de Bienes Culturales en la Escuela Superior de Conservación y Restauración de Bienes Culturales de Madrid, se especializó en Bienes Arqueológicos, iniciándose en la conservación del patrimonio inmueble. Continuó su formación en el máster en Ciencia y Tecnología en Patrimonio Arquitectónico de la Universidad de Granada, en el que se centró específicamente, a través del Trabajo de Fin de Máster, en la cristalización de sales en materiales porosos y los problemas de conservación que de ella derivan. Con el afán de continuar esa investigación, por considerarla verdaderamente útil, está actualmente matriculada en el programa de doctorado de Química Aplicada de la Universidad Autónoma de Madrid, en el departamento de Geología y Geoquímica de la Facultad de Ciencias bajo la co-dirección de los Drs. Miguel Gómez-Heras y Encarnación Ruiz-Agudo. Ha participado, además, en intervenciones de conservación y restauración sobre bienes inmuebles, históricos y arqueológicos, con la empresa ARTYCO, S.L., en el Patronato de la Alhambra y Generalife y en equipos interdisciplinares como, por ejemplo, el que constituye el Proyecto Djehuty en Luxor (Egipto), dirigido por Dr. José Manuel Galán (CSIC). Ha realizado una estancia en el Centro per la Conservazione e Restauro La Venaria Reale y en el Museo Egizio, ambos en Turín (Italia) con la beca de movilidad Erasmus+.



Encarnación María Ruiz Agudo
encaruiz@ugr.es
 Universidad de Granada
<https://orcid.org/0000-0003-1292-4000>

Encarnación Ruiz Agudo es Ingeniera Química por la Universidad de Granada (2003) e Ingeniera Técnica Industrial por la Universidad de Jaén (2006). Obtuvo su doctorado en el programa de Ciencias de la Tierra de la UGR (2007) y realizó una estancia posdoctoral Marie Curie (2009-2011) en el grupo del Prof. Andrew Putnis. Ha sido investigadora Ramón y Cajal (2012-2016), profesora titular (2016-2023) y, desde julio de 2023, catedrática de Cristalografía y Mineralogía en el Departamento de Mineralogía y Petrología de la UGR. Su investigación se centra en procesos de disolución, crecimiento y reemplazo mineral, así como en la influencia de compuestos orgánicos, utilizando técnicas *in situ* como microscopía de fuerza atómica (AFM). Estas investigaciones tienen aplicaciones en conservación del patrimonio, industria del cemento, biominerización y captura de CO₂ mediante mineralización carbonatada, línea en la que posee dos patentes. Ha liderado 10 de los 23 proyectos en los que ha participado (financiación total como IP: 1.617.409 €), con resultados publicados en 99 artículos científicos (índice H: 43, más de 5600 citas). Su trabajo ha sido reconocido con premios como la Medalla a la Excelencia Investigadora de la Unión Mineralógica Europea (2014) y el Arne Richter Award de la EGU (2012). Ha dirigido 4 tesis doctorales (y 4 más en curso), 16 trabajos de fin de máster, y ha contratado investigadores y técnicos en el marco de proyectos competitivos. Colabora con empresas nacionales e internacionales y es

coautora de 4 patentes. Ha desempeñado tareas de gestión académica y coordinación de movilidad internacional, además de enseñar más de 1400 horas en todos los niveles universitarios. También participa activamente en actividades de divulgación científica como Geolodía y la Semana de la Ciencia.



Sarah Bonilla Correa
sbonila@ugr.es
 Universidad de Granada
<https://orcid.org/0000-0001-9010-5831>

Geocientífica con formación en la Universidad de los Andes (Colombia), donde comenzó su carrera investigadora en geología ígnea y geocronología, participando en la creación de la Colombian Geochronological Database. Amplió su experiencia en la Johannes Gutenberg-Universität de Mainz (Alemania), donde se especializó en técnicas como SEM y microsonda electrónica. Posteriormente, trabajó como asistente de investigación en Colombia, colaborando en estudios geológicos en Galápagos y Gorgona. Obtuvo un Máster en Geología Aplicada (GEOREC) y otro en Ciencia y Tecnología del Patrimonio Arquitectónico (CITPA), ambos por la Universidad de Granada (UGR). Desde entonces, ha trabajado como técnica en el Departamento de Mineralogía y Petrología, integrando cinco proyectos sobre mineralogía ambiental, biominerización y conservación del patrimonio. Ha desarrollado competencias en una amplia gama de técnicas analíticas avanzadas (DRX, FTIR, Raman, SEM, TEM, AFM, entre otras). Actualmente realiza su doctorado en la UGR, centrado en la transformación del carbonato de calcio amorfo y su impacto en la transferencia isotópica, bajo la dirección de las Ruiz-Agudo y María P. Asta. Ha realizado estancias en las universidades de Utrecht y Konstanz, así como análisis avanzados gracias al acceso competitivo a infraestructuras del proyecto europeo EXCITE, en Potsdam y Cambridge. Además, gestiona equipamiento y forma usuarios en el Laboratorio de Geoquímica de Baja Temperatura (UGR), y ha co-mentorizado cinco trabajos de fin de máster. Participa activamente en la divulgación científica y ha sido ponente invitada en eventos internacionales. En 2021 lideró un proyecto sobre microplásticos en los arrecifes coralinos del Caribe colombiano como investigadora principal.



<https://doi.org/10.37558/gec.v28i1.1451>