

METODOLOGÍA PARA DESARROLLAR EFLORESCENCIA

SOBRE MUROS DE MAMPOSTERÍAS EN LABORATORIO

Isaías Edén Vizcaíno Hernández,¹ Alejandro Acosta Collazo²

RESUMEN

Se sabe que uno de los principales agentes degenerativos del patrimonio arquitectónico son las eflorescencias, desarrolladas desde el interior de los materiales porosos. Esta patología se puede reproducir en laboratorio de manera controlada y acelerada, mediante ciclos de cristalización de sulfato de sodio (ccss), que permite experimentar con pequeñas probetas para evaluar la resistencia del material, o estudiar el fenómeno en sí. Con el fin de expandir las posibilidades de estudio acerca de esta patología, se ha indagado respecto a las técnicas que actualmente permiten caracterizarla, con lo cual se ha propuesto crear y evaluar una metodología que permita desarrollar ccss en probetas escala real (muros de mampostería) en condiciones de laboratorio. Lo anterior mediante un estudio experimental, en el que se espera poder registrar periódicamente la degradación producida por la eflorescencia.

Palabras clave: eflorescencia, mampostería, metodología, patrimonio arquitectónico.

-
- 1 Mtro. en Ing. C., Universidad Autónoma de Aguascalientes, Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción (ccdc).
 - 2 Dr. en Arq., Universidad Autónoma de Aguascalientes, Departamento de Arquitectura, Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción (ccdc).

INTRODUCCIÓN

Se sabe que uno de los principales agentes degenerativos del patrimonio arquitectónico son las eflorescencias (Angeli *et al.*, 2010), una patología derivada de las salmueras formadas por humedad y la presencia de algunos minerales solubles que tienen la capacidad de cristalizarse al secarse. Dicha patología afecta a los materiales porosos desde su interior, pues la salmuera, al invadir la red porosa, permite la formación de los cristales, generando erosiones microscópicas, que, en conjunto y a lo largo del tiempo, llegan a ser representativas y evidentes a simple vista. Para dimensionar la relevancia de esta patología y sus afectaciones en el patrimonio arquitectónico, Berengel (2014) se dio a la tarea de identificar el porcentaje de incidencia de distintas patologías que afectan las edificaciones patrimoniales en el centro histórico en Lima, Perú, identificando que las afectaciones por eflorescencia son representativas en un 42% de los casos estudiados; sólo equiparable con factores físicos estructurales, que llegan a sumar el 36% (grietas, deformaciones y desprendimientos), dejando como último factor aquellas afectaciones relacionadas con agentes biológicos.

Como se ha indicado, las eflorescencias han sido motivo de investigación en distintas partes del globo, con la finalidad de identificar los factores que favorecen su desarrollo y así comprender cómo son afectadas las edificaciones, para prever posibles soluciones. De tal manera que algunos investigadores se han centrado en identificar los minerales que se encuentran presentes en las edificaciones afectadas, en diversas regiones de Italia; encontrando que “los sulfatos de sodio y magnesio a pesar de su baja incidencia, resultan ser los más degenerativos). (Dondi *et al.*, 1997)

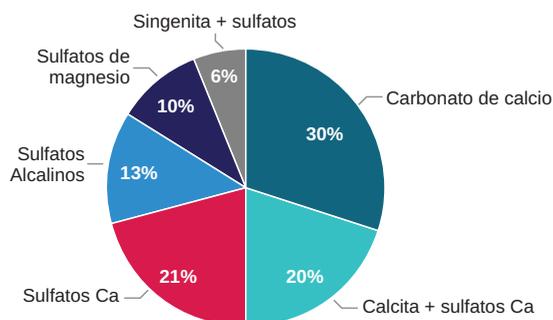


Figura 1. Abundancia relativa de distintas formaciones de eflorescencias CITATION As97 \l 2058 (Dondi, et al., 1997).



Figura 2. Valoración relativa, porcentaje de patologías presentes en el patrimonio arquitectónico (Berengel, 2014).

Algunos otros autores dirigen sus esfuerzos en prever los orígenes de los elementos que se requieren para que la formación de eflorescencias tenga lugar, identificando las posibles fuentes de los minerales y la humedad presente en las edificaciones (López *et al.*, 2018; Taguchi y Santos, 2008; Rincón y Romero, 2000):

Tabla 1. Concentrado: origen de los agentes causantes de la eflorescencia en el patrimonio.

Origen del agente	Agua o humedad	Minerales solubles
Origen litológico		X
Cuerpos de agua	X	X
Precipitación	X	
Agente ambiental	X	X
Origen biológico	X	X
Procesos constructivos	X	X
Uso o propósito	X	X
Origen antrópico	X	X

ENVEJECIMIENTO ACELERADO

El desarrollo de los conocimientos previos, en su momento, dio origen a una metodología para desarrollar ciclos de cristalización de sulfatos en probetas a pequeña escala (< 10 cm), una técnica de laboratorio que se considera básica en la investigación dentro del campo de estudio de los materiales

rocosos y sus alteraciones. Se trata de pruebas relativamente sencillas, estandarizadas por algunos organismos: ASTM, DIN, NORMAL, RILEM, UNE (Brea *et al.*, 2008). Con ello se puede simular de manera controlada el envejecimiento o intemperización de las piedras, y evaluar su durabilidad o resistencia ante los efectos degenerativos de la cristalización por eflorescencias (Morales *et al.*, 2020).



Figura 3. Pasos para desarrollar ciclos de cristalización de sulfato (elaboración propia).

Esto ha permitido a los investigadores no sólo estudiar la resistencia de los materiales pétreos, también les permite evaluar distintos materiales destinados a combatir la eflorescencia, tal es el caso de Speri *et al.* (2017) y Cultrone y Pardo (2008), quienes evalúan la utilización de aplanados o revocos de sacrificio, demostrando que los cristales se forman principalmente en los recubrimientos, protegiendo así al sustrato; mientras que Cañola *et al.* (2021) pretenden crear un mortero altamente impermeable, resistente a la cristalización, con la idea de sustituir el material que se emplea en las juntas de las edificaciones.

De igual manera, esta técnica ha permitido desarrollar investigación referente a la eflorescencia en sí, permitiendo valorar desde el laboratorio aquellas condiciones climáticas que favorecen al desarrollo de la eflorescencia (Angeli *et al.*, 2010), identificando comportamientos extraños en las rocas, como la expansión (Wedekind *et al.*, 2013). Incluso se ha demostrado que para propiciar el secado de las muestras puede ser suficiente sólo inducir corrientes de aire (Mayo y Lasheras, 2012).

EVALUACIONES DESARROLLADAS

Las evaluaciones relacionadas con las afectaciones ocasionadas por eflorescencias sobre el patrimonio arquitectónico se desarrollan describiendo alguno o ambos de los siguientes aspectos: (1) valoraciones superficiales y/o (2) identificando a profundidad las alteraciones que se presentan en los elementos estudiados.

Las valoraciones superficiales de las afectaciones se llevan a cabo mediante alguno de los siguientes métodos o técnicas:

- Mapeo: esta técnica permite a los investigadores evaluar de manera cuantitativa las regiones dañadas, pero la escala establecida es totalmente subjetiva y contextual (Andaluz *et al.*, 1994).
- Levantamientos volumétricos: este proceso requiere de sistemas digitales basados en la estructuración por movimiento, como pueden ser la fotogrametría o el escáner láser; permiten digitalizar los elementos en estudio con una precisión considerable (Almac *et al.*, 2018).

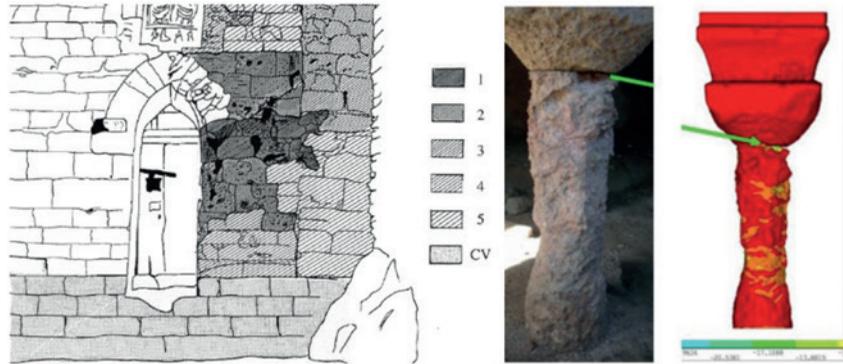


Figura 4. (A) Representación de zonas afectadas mediante mapeo (Andaluz *et al.*, 1994); (B) digitalización de elementos deteriorados mediante estructuración por movimiento (Almac *et al.*, 2018).

Mientras que la identificación a profundidad de las alteraciones consiste en evaluar más allá de la superficie; para ello se recurre a equipos más sofisticados:

- El análisis por espectroscopia micro-raman permite caracterizar en sitio las eflorescencias, determinando la composición química de las sales (Arce, 2012).
- Mediante microscopio de barrido es posible apreciar las formaciones de cristales y determinar el tipo de mineral presente (Arce *et al.*, 2008).
- La difracción de rayos X no permite caracterizar las eflorescencias, su objetivo es determinar los estados de hidratación debajo de la superficie (Pérez *et al.*, 2001).
- El higrómetro para sólidos se puede implementar para identificar el porcentaje de humedad en algunos materiales, como la madera y el concreto (Cañola *et al.*, 2021).
- La termografía es utilizada para identificar la presencia de agua, asociando las regiones de menor temperatura con la presencia de humedad (Serna *et al.*, 2016).

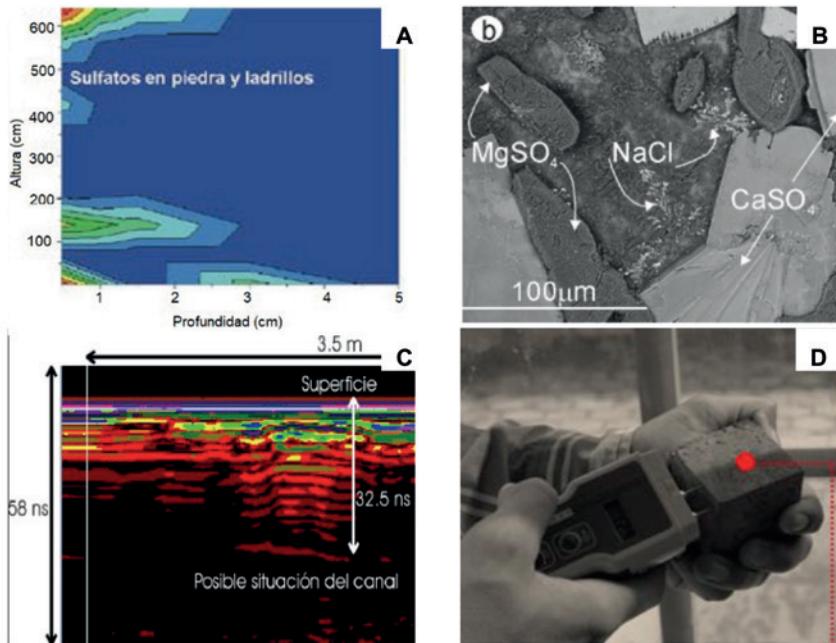


Figura 5. (A) Sección desarrollada por micro-raman, graficando una profundidad de 5 cm (Arce, 2012); (B) ampliación por microscopio de barrido para identificar minerales (Arce, 2012); (C) Sección desarrollada por difracción de rayos X (Pérez et al., 2001); (D) Registro de humedad utilizando higrómetro (Cañola et al., 2021).

METODOLOGÍA PROPUESTA

Con la finalidad de conseguir desarrollar eflorescencia en especímenes de muros de mampostería a escala real en laboratorio, se plantea: (1) utilizar la cristalización de sulfatos para propiciar el desarrollo de eflorescencia en muros, (2) implementar el secado por ventilación forzada y (3) evaluar las afectaciones generadas utilizando algunas técnicas que actualmente se utilizan para análisis y caracterización.

ADAPTACIÓN DE LOS CICLOS DE CRISTALIZACIÓN

Como primer obstáculo para desarrollar los ccss se tiene que considerar la diferencia de escala para la cual está diseñada la metodología. Como ya se ha mencionado, desarrollar los ciclos de cristalización en laboratorio es una técnica que permite realizar estudios referentes a la eflorescencia en probetas a pequeña escala; la problemática de adaptar este proceso a probetas de escala real radica en la saturación de los elementos y el secado de estos. Para ello se plantea:

- Desplantar ocho probetas de muro (B:100 cm, A:30 cm, H:75 cm) sobre una membrana impermeable, en la cual se instala un sistema de irrigación para suministrar 15 litros de salmuera de sulfato de sodio al 10%, dejando absorber por un día.
- Para sustituir el horno que se utilizaría en una experimentación convencional, se plantea implementar el secado por ventilación inducida. Para ello se requiere construir un deshidratador solar, con la finalidad de propiciar la ventilación por convección durante seis días; de no funcionar este método, se puede recurrir a una unidad de ventilación mecánica.

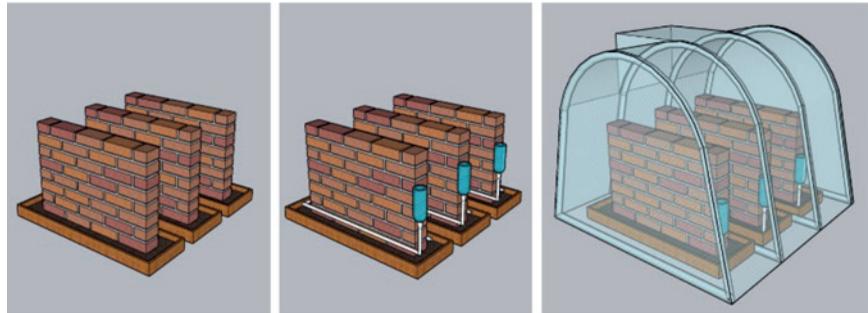


Figura 6. (A) Construcción y reposo de muros; (B) sistema de irrigación para la salmuera; (C) conceptualización del invernadero para generar flujo de viento (elaboración propia).

RECOPIACIÓN DE DATOS

La recopilación de datos será utilizada tanto para registrar el progreso de la degradación ocasionada por eflorescencia en laboratorio como para identificar la situación de las probetas, permitiendo identificar las distintas etapas que requieren los ccss, por ejemplo:

- Para identificar la saturación y el secado de las muestras se pretende implementar el higrómetro para sólidos (A) y la termografía (B), con ambas tecnologías será posible identificar el porcentaje de humedad y las zonas que se han saturado con salmuera.
- Por otro lado, se pretende utilizar la fotogrametría (C) para generar un registro cronológico del comportamiento volumétrico y de aspecto, permitiendo desarrollar una valoración periódica del decaimiento de los muros en relación al volumen y aspecto.

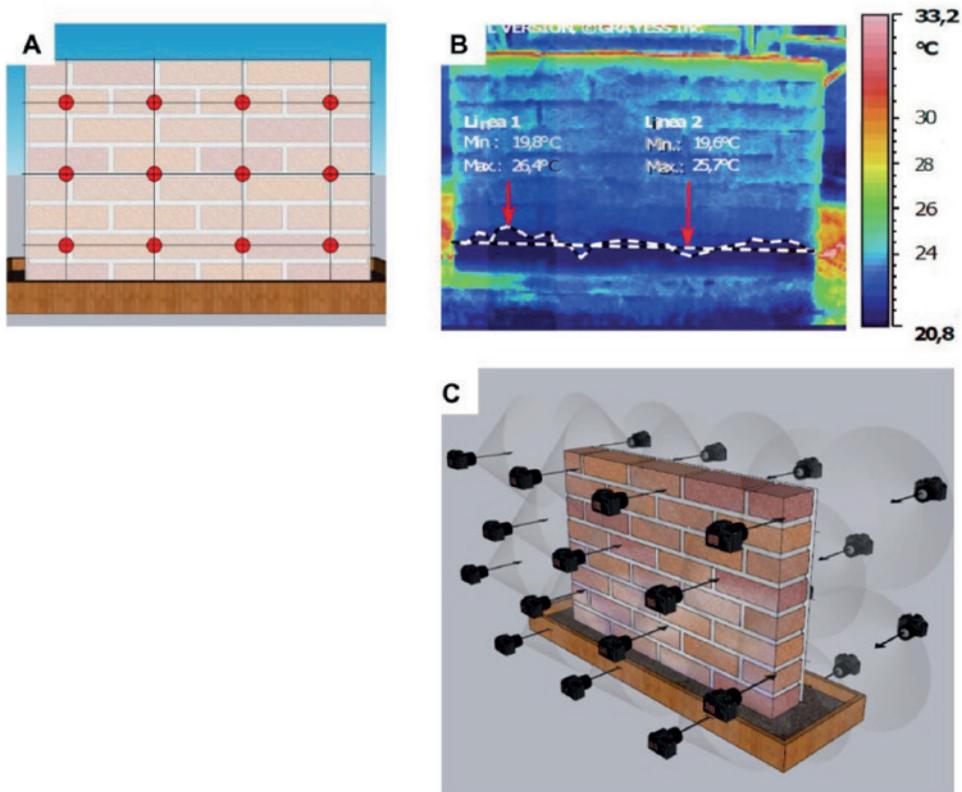


Figura 7. (A) registros de humedad mediante higrometro; (B) imagen termografica de un elemento afectado por humedad (Serna et al., 2016); (C) levantamiento por fotogrametría para digitalización y mapeo (elaboración propia).

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Las eflorescencias que se perciben en el patrimonio arquitectónico edificado son el resultado acumulativo de un proceso físico-químico de carácter cíclico, que involucra minerales, humedad y un medio poroso. Para que se desarrolle esta patología se requiere que existan diferencias de hidratación entre los materiales; esto quiere decir que la humedad se transfiere de donde hay más hacia donde hay menos, viéndose favorecida por la capacidad capilar del agua para transportarse dentro de los poros, con el fin último de evaporarse hacia el exterior del material. En el transcurso del recorrido de la humedad, desde su origen hasta la evaporación, transporta y disuelve minerales convirtiéndose en una salmuera; algunos de estos minerales cuentan con características eflorescentes, esto es, la capacidad de cristalizarse al momento de perder agua o secarse. Dicha reacción química sucede desde

el interior de los poros de manera violenta, ocasionando el desprendimiento de pequeñas partículas de material. De tal manera que las eflorescencias que se llegan a percibir visualmente son el resultado de la acumulación de este evento.

Para caracterizar las eflorescencias y las regiones en donde se concentran, los investigadores recurren a diversas técnicas y tecnologías que les permiten visualizar aspectos más allá de la percepción y capacidades humanas, esto con la finalidad de conocer los minerales y la forma en que se propagan las humedades, para comprender los factores que las originan, diagnosticar y plantear soluciones ante la problemática, adaptándose a sus capacidades técnicas.

Estos conocimientos han llevado a comprender de tal manera el desarrollo de las eflorescencias, que actualmente existe una metodología que permite reproducirlas en laboratorio de manera controlada, limitándose a especímenes de pequeña escala. Con ello es posible valorar la resistencia de algunos materiales porosos frente a la cristalización y simular el envejecimiento de los materiales.

CONCLUSIONES

El estado actual del conocimiento, relacionado con la caracterización de las eflorescencias, está ampliamente desarrollado, se encuentran diversas metodologías que permiten evaluar las afectaciones, que van desde aspectos generalizados de carácter superficial, consistentes en actividades fáciles de desarrollar y comprender, hasta técnicas especializadas que requieren de mayor conocimiento para delimitar las afectaciones y los agentes que se ven involucrados en las eflorescencias.

La reproducción de ccss en laboratorio ha permitido evaluar distintas afectaciones desarrolladas a causa de dicha patología, identificar factores que le favorecen y, con ello, plantear soluciones para combatirla, limitándose a pequeñas probetas que, por lo general, rondan entre los cinco y diez centímetros. No obstante, actualmente no se encuentran métodos que permitan a los investigadores desarrollar eflorescencias en elementos a escala 1:1, con lo que se permita experimentar y evaluar las metodologías o técnicas propuestas destinadas a la conservación que, por sus características de funcionamiento o dimensiones, requieren ser aplicadas en elementos constructivos de tamaño real.

Es por ello que se considera pertinente el desarrollo de esta metodología experimental para desarrollar la afectación de manera controlada en laboratorio sobre especímenes a escala real, pues el conocimiento actual permite extrapolar los ciclos de cristalización de sulfato para aplicarse en objetos de mayor tamaño. Además, las tecnologías ahora disponibles y accesibles permiten cuantificar el avance de la patología, con la capacidad de digitalizar elementos mediante técnicas indirectas, representando el relieve y cuantificando el volumen de manera virtual, así como de contar con la

posibilidad de visualizar la propagación de la humedad superficial y/o en el interior de los materiales.

REFERENCIAS

- Almac, U., Pekmezci, P. y Ahunbay, M. (2018). Numerical Analysis of Historic Structural Elements Using 3D Point Cloud Data. *The Open Construction & Building Technology Journal*.
- Andaluz, N., Marín, C., Gisbert, J. y Remón, A., (1994). Diagnóstico del deterioro de edificios del Patrimonio Histórico-Artístico del sureste de la provincia de Huesca. *Lucas Mallada revista de ciencias*, 6, 143-170.
- Angeli, M., Hébert, R., Menéndez, B., David, C. y Bigas, J. P. (2010). Influence of temperature and salt concentration on the salt weathering of a sedimentary stone with sodium sulphate. *Engineering Geology*, 115(3-4), 193-199.
- Arce, L. P. (2012). Daños por cristalización de sales. En *La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio* (p.p. 97-105), Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Arce, L. P., Doehne, E. y Pinchin, S. (2008). Magnesium sulfate salts and historic building materials: Experimental simulation of limestone flaking by relative humidity cycling and crystallization of salts. *Materiales de construcción*, 58(289-290), 125-142.
- Berengel, P. A. E. (2014). Patología de la edificación patrimonial en el centro histórico de lima. Humedades, causas y consecuencias. *DeVenir*, 1(1), 93-108.
- Brea, R., Lamas, P., y Hermo, S. (2008). Ensayos de alteración artificial aplicados a rocas graníticas. *Materiales de construcción*, 58(289), 179-189.
- Cañola, H., Granda, F., y Arroyave, J. (2021). Emulsión asfáltica como alternativa de reducción de la presencia de eflorescencias en morteros de pega. *Revista UIS Ingenierías*, 20(1), 103-114.
- Cultrone, G., y Pardo, S. (2008). Deterioro en muros de edificios ocasionado por eflorescencias salinas. *Revista de la sociedad española de mineralogía*, (9), 75-76.
- Dondi, M., Fabbri, B., Guarini, G., y Marsigli, M. (1997). Sales solubles y eflorescencias en materiales de construcción cerámicos: Un esquema para la predicción del riesgo de eflorescencias. *Cerámica y Vidrio*, 36(6), 619-629.
- López, R., Wedekind, W., Aguillón, A. y Siegesmund, S. (2018). Thermal expansion on volcanic tuff rocks used as building stones: examples from Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 77(338), 77-89.
- Mayo, C. y Lasheras, F. (2012). *Movilidad de las eflorescencias en función del caudal de aire de secado*. Recuperado de <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4194324>>.
- Morales, M., Velasco, E., y Ramírez, J. (2020). Estudio comparativo de alteración del peso en el mármol tipo café tabaco mediante ensayo de

- cristalización de sales por sulfato de sodio. *Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 24, 69-80.
- Pérez, G. V., Canas, T. J. y Pujades, B. L. (2001). *Radar de subsuelo: Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Rincón, M. y Romero, M. (2000). Fundamentos y clasificación de las eflorescencias en ladrillos de construcción. *Materiales de Construcción*, 50(260), 63-69.
- Serna, S., Araiza, G. y Soto, M. (2016). *Evaluación de sistemas correctivos para la inhibición capilar en desplante de muros de adobe*. Aguascalientes: Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Speri, L., Falchi, L., Ballana, E., Zuená, M. y Elisabetta, Z. (2017). Comportamiento de los sistemas de revoque de ladrillo-NHL en presencia de solución de NaCl. *GE-Conservacion*, 11, 157-164.
- Taguchi, M. K. y Santos, M. (2008). *Evaluación y calificación de las patologías de vallados de mampostería en edificaciones*, Curitiba: Universidad Federal de Paraná.
- Wedekind, W., López-Doncel, R., Dohrmann, R., Kocher, M. y Siegesmund, S. (2013). Weathering of volcanic tuff rocks caused by moisture expansion. *Environmental earth sciences*, 69, 1203-1224.

