



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diagnóstico mediante técnicas no destructivas para la
evaluación patológica de un paramento pétreo exterior del Centro
Universitario de la Defensa (CUD) de Marín*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Álvaro Fernández Valverde
DIRECTORES: Iván Garrido González
Jesús Balado Frías

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diagnóstico mediante técnicas no destructivas para la
evaluación patológica de un paramento pétreo exterior del Centro
Universitario de la Defensa (CUD) de Marín*

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo la evaluación del estado de conservación de un paramento pétreo situado en la Escuela Naval Militar, mediante la aplicación combinada de diferentes técnicas no destructivas. En particular, se integran escaneo LiDAR terrestre, mapeo de humedad, extracción y análisis de sales solubles y termografía infrarroja.

La metodología desarrollada se basa en la adquisición sistemática de datos mediante estas técnicas, seguida de su tratamiento y análisis conjunto con el fin de identificar patrones de deterioro, zonas con acumulación de humedad y presencia de sales, así como alteraciones geométricas superficiales.

Los resultados muestran la existencia de una clara correlación entre la presencia de humedad, la acumulación de sales y los procesos de degradación superficial del material. Asimismo, el análisis LiDAR y la termografía permiten detectar deterioros en fase avanzada con la acción patológica finalizada, mientras que el mapeo de humedad y las sales contribuyen a la identificación de focos de futuros procesos de degradación material.

Como conclusión, se demuestra que la combinación de técnicas no destructivas proporciona una herramienta eficaz para el diagnóstico integral del estado de conservación del paramento, permitiendo obtener una visión completa. Este enfoque facilita tanto la identificación de patologías como la prevención de su evolución futura.

PALABRAS CLAVE

diagnóstico estado de conservación, LiDAR, humedad, sales, termografía infrarroja

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mis tutores, los doctores, D. Iván Garrido González y D. Jesús Balado Frías, por su apoyo constante, su dedicación y su implicación a lo largo de todo el desarrollo de este trabajo. Su orientación, cercanía y compromiso han sido fundamentales, no solo como directores del proyecto, sino también como referentes y mentores durante este proceso.

A mis padres, José y Vera, por haberme dado siempre las oportunidades necesarias para alcanzar mis objetivos y por su apoyo incondicional en cada etapa. Gracias a ellos he podido llegar hasta aquí.

A mis hermanas, por ser siempre una fuente de alegría y por acompañarme, aunque sea en la distancia, a lo largo de mi formación como Oficial de la Armada.

A mis compañeros de las promociones 426 del Cuerpo General y 156 de Infantería de Marina, por haber pasado de ser completos desconocidos a convertirse en una auténtica familia, compartiendo juntos tanto los buenos momentos como los más exigentes.

En especial, a Santiago Cervera, Rafael Liaño y Manuel Luaces, con quienes he compartido estos dos últimos años de formación y vivencias.

Por último, a mis amigos Luis, Sell, Javi, Lucía, Laura e Ismael, por hacer que cada regreso a casa sea un respiro, por su apoyo constante y por estar siempre ahí, orgullosos de cada paso que doy.

CONTENIDO

RESUMEN.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	iii
Contenido	1
Índice de Figuras	5
Índice de Tablas.....	8
1 Introducción y objetivos.....	11
1.1 Contexto y motivación	11
1.2 Objetivos	12
1.3 Metodología	13
1.4 Estructura de la memoria	14
2 Estado del arte.....	15
2.1 Patologías y deterioro en edificios	15
2.1.1 Envejecimiento y degradación de los edificios.....	15
2.1.2 Patologías constructivas más frecuentes en edificios	16
2.1.3 Consecuencias del deterioro no detectado	18
2.1.4 Importancia del diagnóstico temprano	18
2.2 Técnicas de inspección y evaluación del estado estructural	19
2.2.1 Métodos tradicionales de inspección	19
2.2.2 Técnicas no invasivas/ no destructivas	20
2.2.2.1 LiDAR.....	21
2.2.2.2 Medición y mapeo de humedad en edificios	22
2.2.2.3 Extracción de sales	25
2.2.2.4 Termografía infrarroja	27
2.3 Integración de diferentes técnicas no destructivas en el diagnóstico de edificaciones	32

3	Desarrollo del TFG	33
3.1	Descripción del caso de estudio	33
3.2	Diseño de la campaña experimental y estrategia en cada técnica	35
3.3	Adquisición geométrica mediante escaneado láser terrestre (TLS).....	36
3.3.1	Instrumentación y configuración de la captura	36
3.3.2	Conversión de formatos y preparación del banco de datos.....	38
3.3.3	Análisis geométrico en CloudCompare: formulación matemática y significado físico 38	
3.3.3.1	Vecindad local y escala de cálculo	39
3.3.3.2	Intensity	40
3.3.3.3	Roughness	40
3.3.3.4	Planarity.....	40
3.3.3.5	Verticality	41
3.3.3.6	Surface variation.....	42
3.3.3.7	Mean curvature.....	42
3.3.3.8	1 st order moment	43
3.4	Evaluación de la distribución de la humedad.....	44
3.4.1	Registro de las condiciones ambientales durante las mediciones	44
3.4.2	Equipamiento utilizado y fundamento físico de la medición.....	45
3.4.3	Protocolo de medición y distribución de los puntos de muestreo.....	46
3.4.4	Organización y tratamiento de los datos de entrada	48
3.4.5	Generación del mapeo de humedad mediante interpolación espacial.....	48
3.5	Extracción de sales solubles y modelización espacial	50
3.5.1	Extracción de sales mediante papetas de celulosa	51
3.5.2	Distribución espacial del muestreo	52
3.5.3	Preparación de las muestras en laboratorio	52

3.5.4	Organización de los datos y generación de mapas de distribución de sales	55
3.6	Evaluación mediante termografía infrarroja	56
3.6.1	Inspección termográfica de zonas de interés (termografía activa)	57
3.6.1	Captura termográfica global del paramento (termografía pasiva)	58
4	Resultados y discusión	60
4.1	Resultados de las técnicas de inspección aplicadas	60
4.1.1	Análisis geométrico de la nube de puntos (LiDAR)	60
4.1.1.1	Estación 1 (ST001)	60
4.1.1.2	Estación 2 (ST002)	63
4.1.1.3	Estación 3 (ST003)	65
4.1.1.4	Estacion 4 (ST004)	67
4.1.1.5	Estación 5 (ST005)	69
4.1.2	Mapeo de humedad	71
4.1.3	Extracción y análisis de sales solubles	76
4.1.3.1	Cloruro	77
4.1.3.2	Fosfato	79
4.1.3.3	Nitrato	81
4.1.3.4	Sulfato	83
4.1.4	Análisis termográfico mediante cámara infrarroja	84
4.1.4.1	Termografía pasiva	84
4.1.4.2	Termografía activa	88
4.2	Análisis cruzado de técnicas de inspección	96
4.2.1	Estación 1	96
4.2.2	Estación 2	99
4.2.3	Estación 3	101

4.2.4	Estación 4	103
4.2.5	Estación 5	105
5	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	108
5.1	Conclusiones	108
5.2	Lecciones aprendidas	109
5.3	Líneas futuras	109
6	Bibliografía	110
	Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	114
	Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	115
	Anexo III: Declaración sobre el uso de herramientas de Inteligencia Artificial	116
	Anexo IV: Especificaciones FLIR E85	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Viviendas residenciales pertenecientes al Ministerio de Defensa, ubicadas en la Ciudad del Aire de San Javier (Murcia), construidas en entorno marítimo y que presentan procesos de envejecimiento y degradación superficial asociados a la exposición prolongada (Elaboración propia)	16
Figura 2-2 Patologías en los edificios: a) Humedad, b) Grieta (Extraído de: a) [13], b) [14])	17
Figura 2-3 Comparación entre métodos tradicionales de inspección y técnicas no invasivas: (a) inspección convencional mediante medios auxiliares y acceso directo a la fachada, (b) inspección mediante termografía infrarroja realizada a distancia sin contacto con el edificio (Extraído de: a) [18], b) [19])	20
Figura 2-4 Esquema del principio de medición LiDAR por tiempo de vuelo (ToF) (Extraído de [20])	21
Figura 2-5 Nube de puntos obtenida mediante escáner LiDAR en la Escuela Naval Militar (Elaboración propia)	22
Figura 2-6 Esquema del fenómeno de ascenso capilar en un medio poroso, mostrando las fuerzas de cohesión y adhesión que gobiernan el movimiento del agua en los materiales constructivos (Extraído de [21])	23
Figura 2-7 Esquema del proceso de condensación en un cerramiento de edificio provocado por diferencias térmicas entre el ambiente interior y exterior, así como por la presencia de filtraciones de aire a través de juntas y grietas (Extraído de [23])	24
Figura 2-8 Ejemplo de mapeo de mediciones sobre un paramento mediante dispositivos portátiles de inspección (Extraído de [25])	25
Figura 2-9 Imágenes del paramento pétreo correspondientes a distintas fases del proceso de desalación, mostrando el estado inicial con presencia de eflorescencias salinas (imagen superior) y el estado final tras la aplicación del tratamiento (imagen inferior), documentadas en la Capilla de la Catedral de Lugo. (Extraído de [24])	26
Figura 2-10 Esquema conceptual del proceso de desalación electrocinética aplicado a materiales porosos, mostrando la migración iónica bajo la acción de un campo eléctrico y las reacciones electroquímicas asociadas en ánodo y cátodo. (Extraído de [24])	27
Figura 2-11 Espectro electromagnético (λ en micrómetros) (Extraído de [26])	28
Figura 2-12 Distribución espectral de la radiación de un cuerpo negro según la ley de Planck para diferentes temperaturas (3500–5500 K) (Extraído de [28])	29
Figura 2-13 Ley de Stefan-Boltzmann (Extraído de [22])	30
Figura 2-14 Componentes de la radiación infrarroja detectada por una cámara termográfica: energía emitida, reflejada y transmitida (Extraído de [30])	31

Figura 2-15 Termografía infrarroja de una fachada, con escala de temperaturas (°C) (Extraído de [31]).....	31
Figura 3-1 Situación geográfica de la Plaza Álvaro de Bazán en: a) Ría de Pontevedra (círculo amarillo), y en b) Escuela Naval Militar (rectángulo amarillo) (Elaboración propia usando Google Earth)	34
Figura 3-2 Vista del paramento pétreo analizado en el presente estudio (Elaboración propia)	34
Figura 3-3 Esquema a escala de la sectorización del paramento (43,1 m × 0,80 m) en cinco estaciones de análisis (ST001–ST005) y numeración de los sillares en cada estación.	36
Figura 3-4 Escáner láser terrestre Leica ScanStation P16 empleado durante la campaña de adquisición de datos: a) Vista general del equipo en posición de escaneo; b) Detalle del sistema de trípode y apoyo sobre el pavimento. (Elaboración propia)	37
Figura 3-5 . Proceso de segmentación del paramento en CloudCompare: a) Nube de puntos original incluyendo el entorno inmediato; b) Recorte final restringido exclusivamente al paramento objeto de estudio (Elaboración propia).....	38
Figura 3-6 Termohigrómetro digital Laserliner ClimaPilot utilizado para la medición de temperatura ambiente y humedad relativa durante la campaña de inspección (Extraído de [34])	44
Figura 3-7 Protimeter Surveymaster empleado para la medición de humedad en el paramento estudiado (Extraído de [35])	45
Figura 3-8 Esquema de la ubicación de los datos extraídos de cada sillar (Elaboración propia).....	47
Figura 3-9 Medición de humedad superficial en el paramento mediante higrómetro portátil durante la campaña de adquisición de datos (Elaboración propia)	48
Figura 3-10 Interfaz de selección del método de interpolación Kriging en Surfer para la generación de superficies a partir de datos XYZ (Elaboración propia)	49
Figura 3-11 Generación del mapa de contornos de humedad mediante interpolación de los datos en el software Surfer (Elaboración propia).....	50
Figura 3-12 Proceso de aplicación de papetas de celulosa para la extracción de sales solubles: a) detalle del molde empleado para delimitar el área de contacto; b) vista general del paramento con las papetas colocadas durante el proceso de extracción (Elaboración propia).....	51
Figura 3-13 Muestras en la estufa de laboratorio a 50°C para la eliminación de humedad residual (Elaboración propia)	53
Figura 3-14 Procedimiento de preparación de muestras para el análisis de sales solubles: a) pesada de la muestra con balanza de precisión; b) preparación de la disolución para su posterior análisis (Elaboración propia)	53
Figura 3-15 Dispositivo de filtración al vacío utilizado para la separación de las partículas sólidas y la obtención de la disolución que contiene las sales extraídas de la muestra (Elaboración propia)	54

Figura 3-16 Esquema de la distribución de las muestras extraídas y analizadas en las distintas estaciones (Elaboración propia)	55
Figura 3-17 Cámara FLIR E85 (Extraído de [38])	56
Figura 3-18 Foco halógeno 500W utilizado en termografía activa (Extraído de [39])	57
Figura 3-19 Captura de imágenes termográficas del paramento mediante termografía pasiva (Elaboración propia)	58
Figura 3-20 Composición termográfica de la Estación 1 (ST001) obtenida mediante la reconstrucción de capturas individuales en termografía pasiva, junto con la imagen visible correspondiente (Elaboración propia)	59
Figura 4-1 Distribución espacial de la humedad relativa medida en %WME de la Estación 1 (ST001) (Escala 1:36) (Elaboración propia)	71
Figura 4-2 Distribución espacial de la humedad relativa medida en %WME de la Estación 2 (ST002) (Escala 1:65) (Elaboración propia)	72
Figura 4-3 Distribución espacial de la humedad relativa medida en %WME de la Estación 3 (ST003) (Escala 1:82) (Elaboración propia)	73
Figura 4-4 Distribución espacial de la humedad relativa medida en %WME de la Estación 4 (ST004) (Escala 1:63) (Elaboración propia)	74
Figura 4-5 Distribución espacial de la humedad relativa medida en %WME de la Estación 5 (ST005) (Escala 1:50) (Elaboración propia)	75
Figura Anexo III-1 Especificaciones FLIR Serie EXX	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Subdivisión de la banda espectral infrarroja (Extraído de [22])	28
Tabla 3-1 Especificaciones técnicas del escáner láser terrestre Leica ScanStation P16 (Extraído de [32]).....	37
Tabla 4-1 Parámetros visualizados de la nube de puntos LiDAR (RGB, intensidad, rugosidad, planaridad, verticalidad, curvatura media y momento de primer orden) correspondientes a la Estación 1 (ST001) y radio de vecindad de 1cm (Elaboración propia)	61
Tabla 4-2 Escalas cromáticas de los parámetros geométricos obtenidos a partir del análisis de la nube de puntos LiDAR de la Estación 1 (ST001) (Elaboración propia)	62
Tabla 4-3 Parámetros visualizados de la nube de puntos LiDAR (RGB, intensidad, rugosidad, planaridad, verticalidad, curvatura media, variación de superficie y momento de primer orden) correspondientes a la Estación 2 (ST002) y radio de vecindad de 1cm (Elaboración propia)	63
Tabla 4-4 Escalas cromáticas de los parámetros geométricos obtenidos a partir del análisis de la nube de puntos LiDAR de la Estación 2 (ST002) (Elaboración propia)	64
Tabla 4-5 Parámetros visualizados de la nube de puntos LiDAR (RGB, intensidad, rugosidad, planaridad, verticalidad, curvatura media, variación de superficie y momento de primer orden) correspondientes a la Estación 3 (ST003) y radio de vecindad de 1cm (Elaboración propia)	65
Tabla 4-6 Escalas cromáticas de los parámetros geométricos obtenidos a partir del análisis de la nube de puntos LiDAR de la Estación 3 (ST003) (Elaboración propia)	66
Tabla 4-7 Parámetros visualizados de la nube de puntos LiDAR (RGB, intensidad, rugosidad, planaridad, verticalidad, curvatura media, variación de superficie y momento de primer orden) correspondientes a la Estación 4 (ST004) y radio de vecindad de 1cm (Elaboración propia)	67
Tabla 4-8 Escalas cromáticas de los parámetros geométricos obtenidos a partir del análisis de la nube de puntos LiDAR de la Estación 4 (ST004) (Elaboración propia)	68
Tabla 4-9 Parámetros visualizados de la nube de puntos LiDAR (RGB, intensidad, rugosidad, planaridad, verticalidad, curvatura media, variación de superficie y momento de primer orden) correspondientes a la Estación 5 (ST005) y radio de vecindad de 1cm (Elaboración propia)	69
Tabla 4-10 Escalas cromáticas de los parámetros geométricos obtenidos a partir del análisis de la nube de puntos LiDAR de la Estación 5 (ST005) (Elaboración propia)	70
Tabla 4-11 Mapas de distribución espacial de la concentración de cloruros en las estaciones ST001–ST005 (Elaboración propia).....	77
Tabla 4-12 Mapas de distribución espacial de la concentración de fosfatos en las estaciones ST001–ST005 (Elaboración propia).....	79

Tabla 4-13 Mapas de distribución espacial de la concentración de nitrato en las estaciones ST001–ST005 (Elaboración propia).....	81
Tabla 4-14 Mapas de distribución espacial de la concentración de sulfato en las estaciones ST001–ST005 (Elaboración propia).....	83
Tabla 4-15 Mapa térmico e imagen visible obtenidos mediante termografía infrarroja pasiva en el paramento correspondiente a la Estación 1 (ST001) (Elaboración propia)	85
Tabla 4-16 Mapa térmico e imagen visible obtenidos mediante termografía infrarroja pasiva en el paramento correspondiente a la Estación 2 (ST002) (Elaboración propia)	86
Tabla 4-17 Mapa térmico e imagen visible obtenidos mediante termografía infrarroja pasiva en el paramento correspondiente a la Estación 3 (ST003) (Elaboración propia)	87
Tabla 4-18 Mapa térmico e imagen visible obtenidos mediante termografía infrarroja pasiva en el paramento correspondiente a la Estación 4 (ST004) (Elaboración propia)	87
Tabla 4-19 Mapa térmico e imagen visible obtenidos mediante termografía infrarroja pasiva en el paramento correspondiente a la Estación 5 (ST005) (Elaboración propia)	88
Tabla 4-20 Registro termográfico infrarrojo y visible de la zona 1 identificada en la Estación 2, sillar 10 (Elaboración propia)	89
Tabla 4-21 Registro termográfico infrarrojo y visible de la zona 2 identificada en la Estación 2, sillar 14 (Elaboración propia)	90
Tabla 4-22 Registro termográfico infrarrojo y visible de la zona 3 identificada en la Estación 3, sillar 1 (Elaboración propia)	91
Tabla 4-23 Registro termográfico infrarrojo y visible de la zona 4 identificada en la Estación 3, sillar 2 (Elaboración propia)	92
Tabla 4-24 Registro termográfico infrarrojo y visible de la zona 5 identificada en la Estación 3, sillar 3 (Elaboración propia)	93
Tabla 4-25 Registro termográfico infrarrojo y visible de la zona 6 identificada en la Estación 4, sillar 9 (Elaboración propia)	94
Tabla 4-26 Registro termográfico infrarrojo y visible de la zona 7 identificada en la Estación 5, sillar 2 (Elaboración propia)	95
Tabla 4-27 Registro termográfico infrarrojo y visible de la zona 8 identificada en la Estación 5, sillar 4 (Elaboración propia)	96
Tabla 4-28 Síntesis de los resultados obtenidos mediante las distintas técnicas de inspección aplicadas en la Estación 1 (Elaboración propia)	97
Tabla 4-29 Escalas cromáticas utilizadas para la representación de los resultados de la Estación 1	98

Tabla 4-30 Síntesis de los resultados obtenidos mediante las distintas técnicas de inspección aplicadas en la Estación 2 (Elaboración propia)	99
Tabla 4-31 Escalas cromáticas utilizadas para la representación de los resultados de la Estación 2 (Elaboración propia)	100
Tabla 4-32 Síntesis de los resultados obtenidos mediante las distintas técnicas de inspección aplicadas en la Estación 3 (Elaboración propia)	101
Tabla 4-33 Escalas cromáticas utilizadas para la representación de los resultados de la Estación 3 (Elaboración propia)	102
Tabla 4-34 Síntesis de los resultados obtenidos mediante las distintas técnicas de inspección aplicadas en la Estación 4 (Elaboración propia)	103
Tabla 4-35 Escalas cromáticas utilizadas para la representación de los resultados de la Estación 4 (Elaboración propia)	104
Tabla 4-36 Síntesis de los resultados obtenidos mediante las distintas técnicas de inspección aplicadas en la Estación 5 (Elaboración propia)	105
Tabla 4-37 Escalas cromáticas utilizadas para la representación de los resultados de la Estación 5 (Elaboración propia)	106

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto y motivación

El mantenimiento y la conservación de edificaciones constituyen un aspecto fundamental dentro del ámbito de la ingeniería civil y de la gestión de infraestructuras. A lo largo de su vida útil, los edificios están sometidos a la acción de numerosos factores que pueden provocar procesos de deterioro progresivo en sus materiales y elementos constructivos [1]. La acción combinada del paso del tiempo, las condiciones ambientales, los esfuerzos estructurales o la propia actividad humana puede dar lugar a la aparición de diversas patologías constructivas, como fisuras, pérdidas de material, alteraciones superficiales o deformaciones en los elementos estructurales [2].

La identificación temprana de estos procesos resulta clave para garantizar la seguridad, la funcionalidad y la durabilidad de las construcciones. La detección precoz de posibles anomalías permite planificar intervenciones de mantenimiento adecuadas y evitar la evolución de daños que, con el tiempo, podrían derivar en reparaciones más complejas o costosas [3]. En este sentido, las tareas de inspección y diagnóstico del estado constructivo de los edificios se han convertido en una herramienta esencial para la gestión del patrimonio edificado y para la planificación de estrategias de conservación a largo plazo [4].

En particular, los edificios situados en entornos marítimos presentan unas condiciones de exposición especialmente exigentes. La proximidad al mar implica la presencia constante de humedad, aerosoles salinos y variaciones térmicas que pueden acelerar los procesos de degradación de los materiales de construcción. Las sales transportadas por el ambiente marino pueden penetrar en los materiales porosos, favoreciendo procesos de alteración física y química que afectan a su integridad y estabilidad con el paso del tiempo [2], [5]. Este tipo de condiciones ambientales exige, por tanto, una atención especial en las labores de inspección y mantenimiento de las edificaciones situadas en zonas costeras.

La Escuela Naval Militar, situada en la localidad de Marín (Pontevedra), constituye un ejemplo representativo de este tipo de entorno. El conjunto de edificaciones que forman parte de sus instalaciones se encuentra expuesto de forma continua a las condiciones propias del ambiente marítimo, lo que hace especialmente relevante el seguimiento del estado de conservación de sus elementos constructivos. La detección de posibles alteraciones o anomalías en estos elementos resulta fundamental para garantizar su correcta conservación y asegurar el mantenimiento adecuado de las infraestructuras.

Tradicionalmente, la evaluación del estado de los edificios se ha llevado a cabo mediante inspecciones visuales directas realizadas por técnicos especializados. Este tipo de inspección permite

identificar de manera preliminar la presencia de daños o irregularidades en los materiales, aunque en muchos casos presenta ciertas limitaciones. La inspección visual depende en gran medida de la experiencia del técnico que la realiza y puede resultar insuficiente para detectar alteraciones incipientes o irregularidades geométricas de pequeña magnitud. Además, en determinadas situaciones el acceso a ciertos elementos constructivos puede resultar complicado, lo que dificulta la realización de una evaluación detallada [1], [4].

En el ámbito de la inspección de edificaciones, el empleo de técnicas no destructivas ha adquirido una gran relevancia en las últimas décadas como herramienta de apoyo al diagnóstico del estado constructivo. Este tipo de metodologías permiten obtener información sobre el comportamiento y las características de los materiales sin necesidad de intervenir directamente sobre el elemento analizado, lo que resulta especialmente útil en edificaciones en servicio o en construcciones con valor patrimonial [4]. Su aplicación facilita la identificación de anomalías, alteraciones superficiales o procesos de deterioro que podrían pasar desapercibidos mediante una inspección visual convencional [3].

Entre las diferentes técnicas empleadas en este campo, algunas herramientas permiten además obtener información geométrica detallada de las superficies analizadas. Mediante sistemas de adquisición tridimensional es posible registrar con gran precisión la geometría de un elemento constructivo y generar representaciones digitales del mismo que pueden ser posteriormente analizadas [4]. Este tipo de información geométrica constituye una base de gran interés para estudiar el estado superficial de los materiales, detectar irregularidades y analizar posibles alteraciones asociadas a procesos de degradación o deterioro [6].

El análisis conjunto de la información obtenida mediante este tipo de técnicas permite abordar el estudio del estado constructivo desde una perspectiva más objetiva y cuantitativa, complementando las inspecciones tradicionales realizadas por los técnicos. De esta manera, las metodologías basadas en técnicas no destructivas se han consolidado como una herramienta de gran utilidad para el diagnóstico de patologías en edificaciones y para el desarrollo de estrategias de mantenimiento y conservación más eficaces [3].

1.2 Objetivos

El desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado se plantea a partir del estudio de un elemento constructivo de la Escuela Naval Militar que, debido a su ubicación y condiciones de exposición, resulta de interés desde el punto de vista del análisis de su estado de conservación. La proximidad al ambiente marino, la acción de los agentes atmosféricos y el paso del tiempo pueden favorecer la aparición de distintos procesos de alteración en los materiales de construcción, lo que hace recomendable la aplicación de metodologías de inspección que permitan evaluar su comportamiento superficial y detectar posibles indicios de deterioro.

En este contexto, el trabajo se orienta a la aplicación conjunta de diferentes técnicas de inspección no destructivas con el objetivo de obtener información complementaria sobre el estado del elemento analizado. La combinación de estas metodologías permite abordar el estudio desde diferentes perspectivas, integrando datos de naturaleza geométrica, higrotérmica y fisicoquímica que facilitan una interpretación más completa del comportamiento del material.

A partir de este planteamiento, el objetivo general del trabajo consiste en evaluar el estado superficial del paramento exterior situado en la parte inferior de la planta base de los despachos docentes del Centro Universitario de la Defensa (CUD) en la Escuela Naval Militar (ENM), concretamente el paramento que da hacia la Plaza Álvaro de Bazán y corresponde al cerramiento granítico. Para ello, como técnicas de inspección no destructivas (*Non-Destructive Testings*, NDTs) se emplearán adquisición de nubes de

puntos mediante LiDAR, mapeo de humedad, extracción y análisis de sales solubles y termografía infrarroja, con el fin de obtener una caracterización lo más completa posible del estado del paramento estudiado. Para alcanzar este objetivo general se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- Seleccionar un elemento constructivo de interés dentro de las instalaciones de la Escuela Naval Militar atendiendo a criterios como su exposición ambiental o su posible susceptibilidad a procesos de deterioro.
- Llevar a cabo un análisis geométrico de la superficie mediante la adquisición de datos tridimensionales y el tratamiento de la nube de puntos obtenida mediante tecnología LiDAR.
- Analizar el comportamiento higrotérmico del elemento constructivo mediante mediciones de humedad en la superficie estudiada mediante un termohigrómetro.
- Realizar un estudio de la presencia y distribución de sales solubles en la superficie del material mediante la toma de muestras y su posterior análisis.
- Obtener información termográfica del elemento analizado mediante el uso de una cámara infrarroja que permita identificar posibles diferencias térmicas en la superficie.
- Integrar y comparar la información obtenida a partir de las diferentes técnicas empleadas con el fin de interpretar los resultados y evaluar su relación con posibles procesos de alteración o deterioro del material.

De este modo, el trabajo pretende analizar la utilidad de la combinación de distintas técnicas de inspección no destructivas como herramienta de apoyo para el estudio y diagnóstico del estado de elementos constructivos expuestos a condiciones ambientales exigentes.

1.3 Metodología

La descripción metodológica seguida en secuencia cronológica se describe a continuación.

- Obtención de nubes de punto mediante un escáner LiDAR de la fachada objeto de análisis, para su posterior análisis en software informático CloudCompare, en busca de posibles patologías en el paramento.
- Evaluación del contenido de humedad superficial mediante el termohigrómetro Protimeter Surveymaster, empleando el modo de medición por picas metálicas (*Pin Mode*). Se registraron las medidas de porcentaje equivalente de humedad de madera (*Wood Moisture Equivalent*, WME), que posteriormente se utilizaron para realizar un mapeo de humedad mediante interpolación espacial utilizando el método *Kriging* con el software Surfer.
- Extracción de sales del paramento mediante papetas de celulosa (mezcla de pulpa de papel y agua ultrapura). Para ello, se colocaron de manera equitativa tres papetas por cada sillar del paramento, dejándolas reposar durante una hora para permitir la disolución y migración de las sales solubles desde la piedra hacia la papeta.
Posteriormente, las muestras se dejaron secar durante 48 horas a 50 °C en las estufas del laboratorio de mecánica del Centro de Investigación del CUD-ENM. Tras el secado en estufa, las papetas se trituraron hasta obtener un material homogéneo.
A continuación, se pesaron 2 g de papeta molida, que se mezclaron con 50 mL de agua ultrapura, obteniéndose una suspensión para su posterior análisis. Tras realizar la mezcla, las muestras se introdujeron en un agitador orbital durante dos horas y, finalmente, se filtraron con el fin de eliminar todo el material sólido para su posterior envío al laboratorio.
Una vez analizadas las muestras en el Centro de Apoyo Científico-Tecnológico a la Investigación (C.A.C.T.I) Universidad de Vigo mediante cromatografía iónica de alta resolución, se determinaron las cantidades de sales presentes y se realizó un mapeo de sales utilizando el mismo método y software empleados para el mapeo de humedad.

- Toma de capturas con cámara termográfica de alta gama. En esta fase de la investigación se realizaron diferentes capturas en zonas del objeto de estudio especialmente susceptibles de presentar alguna patología. Las imágenes fueron adquiridas de manera activa, mediante la utilización de un foco lumínico halógeno de 500W como aporte de calor a las zonas de estudio. Por otro lado, se realizó una captura general del paramento completo al alba, con el fin de evitar la influencia de la radiación solar y obtener así un plano general del paramento estudiado en este TFG.
- Análisis y estudio de los datos obtenidos mediante análisis cruzado, con el objetivo de localizar posibles patologías y zonas afectadas del elemento estudiado, así como establecer conclusiones y proponer posibles líneas de investigación futuras.

1.4 Estructura de la memoria

La presente memoria se organiza en cinco capítulos principales que recogen de forma estructurada el desarrollo del trabajo realizado, desde la contextualización inicial hasta la exposición de los resultados y conclusiones.

El capítulo 1 introduce el contexto en el que se enmarca el estudio, así como la motivación que justifica su realización. En este apartado se presentan además los objetivos planteados y una descripción general del enfoque metodológico seguido para llevar a cabo el análisis del elemento constructivo seleccionado.

A continuación, el capítulo 2 aborda el estado del arte relacionado con el diagnóstico de patologías en edificaciones y el empleo de técnicas de inspección no destructivas aplicadas al análisis de materiales y estructuras. En él se revisan los principales métodos utilizados actualmente para la detección de alteraciones en elementos constructivos, prestando especial atención a aquellas técnicas que se emplean posteriormente en el desarrollo del trabajo.

Una vez establecido el marco teórico, el capítulo 3 describe de forma detallada la metodología empleada en el estudio. En este apartado se presentan los equipos utilizados, el procedimiento seguido para la adquisición de datos y el proceso de tratamiento y análisis de la información obtenida mediante las distintas técnicas de inspección no destructiva aplicadas.

Posteriormente, el capítulo 4 recoge los resultados obtenidos a partir del análisis realizado sobre el elemento constructivo estudiado. En él se presentan los diferentes mapas y parámetros derivados de las técnicas aplicadas, así como la interpretación de dichos resultados en relación con el estado de conservación del paramento.

Por último, el capítulo 5 reúne las conclusiones del trabajo, donde se sintetizan los principales hallazgos obtenidos y se valora la utilidad de las metodologías empleadas para el estudio y diagnóstico de patologías. Asimismo, se detallan lecciones aprendidas tras desarrollar el presente trabajo y se plantean posibles líneas futuras de investigación que podrían desarrollarse a partir de los resultados alcanzados.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Patologías y deterioro en edificios

Los edificios, como sistemas constructivos complejos, están sometidos a un proceso continuo de interacción entre los materiales que los componen, el entorno en el que se ubican y las condiciones de uso a lo largo de su vida útil. Esta interacción da lugar, de forma progresiva, a fenómenos de deterioro que pueden afectar tanto a elementos estructurales como a componentes no estructurales [7]. El estudio de estos procesos constituye el ámbito de la patología de la edificación, disciplina que analiza las causas, manifestaciones y evolución de los daños con el objetivo de comprender el comportamiento real de los edificios existentes.

El deterioro constructivo no responde, en la mayoría de los casos, a una única causa aislada, sino a la acción combinada de diversos factores como el envejecimiento natural de los materiales, las condiciones ambientales, los errores de diseño o ejecución y la ausencia de un mantenimiento adecuado [1]. La acumulación de estos factores puede dar lugar a la aparición de patologías constructivas cuya evolución, si no se controla, puede comprometer la durabilidad, la funcionalidad y la seguridad del edificio. En entornos especialmente agresivos, como los de carácter marítimo, los procesos de degradación pueden verse acelerados debido a la presencia de humedad elevada, sales y contaminantes atmosféricos. Estos agentes favorecen la aparición de fenómenos de deterioro fisicoquímico en materiales porosos y metálicos, incrementando la probabilidad de daños prematuros. Por este motivo, el análisis sistemático de las patologías y de los mecanismos de deterioro resulta esencial como etapa previa a cualquier proceso de inspección o evaluación del estado estructural de edificios existentes [7], [8].

2.1.1 Envejecimiento y degradación de los edificios

El envejecimiento de los edificios es un proceso inevitable que se desarrolla a lo largo del tiempo como consecuencia de la exposición continuada a agentes externos y de las condiciones de uso a las que se ven sometidos [9]. Aunque los edificios se proyectan para cumplir unos requisitos mínimos de seguridad estructural, funcionalidad y durabilidad durante un periodo de servicio determinado, en la práctica estas prestaciones pueden verse progresivamente reducidas. La diferencia entre las condiciones reales de exposición y las hipótesis consideradas en fase de proyecto constituye uno de los factores clave en el inicio de los procesos de degradación [8].

Entre los principales agentes responsables del envejecimiento de los edificios destacan los factores ambientales, tales como la humedad, las variaciones de temperatura, la radiación solar y la acción del viento. Estos agentes actúan de forma cíclica sobre los materiales, provocando fenómenos de dilatación

y contracción, pérdida de cohesión y alteraciones físicas y químicas. En materiales porosos, estos efectos pueden favorecer la aparición de microfisuras y procesos de disgregación superficial que, con el tiempo, evolucionan hacia daños de mayor entidad [8].

Como ejemplo de este tipo de degradación en entornos marítimos, en la **FIGURA 2-1** se muestran varias viviendas situadas en la Ciudad del Aire (San Javier, Murcia), donde pueden observarse procesos de envejecimiento y deterioro superficial asociados a la exposición prolongada al ambiente marino.



Figura 2-1 Viviendas residenciales pertenecientes al Ministerio de Defensa, ubicadas en la Ciudad del Aire de San Javier (Murcia), construidas en entorno marítimo y que presentan procesos de envejecimiento y degradación superficial asociados a la exposición prolongada (Elaboración propia)

En edificios situados en entornos marítimos o cercanos a la costa, los procesos de degradación suelen verse intensificados por la presencia de sales disueltas y por una elevada humedad relativa. La acción combinada de estos factores favorece mecanismos de deterioro fisicoquímico, como la cristalización de sales en el interior de los poros, que generan tensiones internas en los materiales. Estos procesos pueden acelerar notablemente el envejecimiento de elementos constructivos como revestimientos y componentes pétreos [8].

Además de los factores ambientales, el uso y la explotación del edificio desempeñan un papel determinante en su proceso de envejecimiento. Sobrecargas no previstas, vibraciones, modificaciones funcionales o intervenciones puntuales mal ejecutadas pueden introducir solicitaciones adicionales que no fueron consideradas en el diseño original. Estas acciones pueden contribuir a la aparición prematura de daños, especialmente en edificios con una larga vida en servicio o sometidos a un uso intensivo.

2.1.2 Patologías constructivas más frecuentes en edificios

Las patologías constructivas pueden definirse como las alteraciones que afectan al comportamiento previsto de los edificios durante su vida útil, manifestándose mediante daños visibles o pérdidas de prestaciones. Estas patologías suelen ser consecuencia de una combinación de factores relacionados con el diseño, la ejecución, los materiales empleados y las condiciones ambientales de exposición. [9] Su estudio sistemático permite identificar patrones recurrentes y establecer relaciones entre causas y efectos, lo que resulta fundamental para el diagnóstico riguroso y la toma de decisiones en procesos de intervención y rehabilitación.

Entre las patologías más habituales en la edificación pueden distinguirse las siguientes:

- **Fisuras y grietas:** Se manifiestan como discontinuidades en los elementos constructivos y pueden tener un origen estructural o no estructural. Su aparición suele estar asociada a

movimientos diferenciales del terreno, retracciones de los materiales, deformaciones excesivas o variaciones térmicas [2]. En elementos de cimentación, estas patologías están frecuentemente relacionadas con asentamientos diferenciales o con deficiencias en el diseño y la ejecución, constituyendo uno de los daños más recurrentes detectados durante la fase de servicio del edificio.

- **Procesos de humedad:** La humedad constituye uno de los principales agentes de deterioro en los edificios y puede manifestarse en forma de filtraciones, condensaciones o humedad ascendente por capilaridad. Estos procesos favorecen la aparición de eflorescencias salinas, pérdidas de adherencia en revestimientos y aceleran la degradación de los materiales por cristalización de sales [2]. En entornos costeros o con elevada exposición ambiental, la presencia de sales y agentes agresivos incrementa notablemente la velocidad de deterioro, afectando tanto a elementos estructurales como a cerramientos y acabados.
- **Degradación de materiales estructurales:** Los materiales estructurales presentan patologías específicas en función de su naturaleza y de las condiciones de exposición a las que se encuentran sometidos. En estructuras de hormigón armado destacan los procesos de corrosión de las armaduras, habitualmente vinculados a la penetración de cloruros o a la carbonatación del hormigón [10].
- **Puentes térmicos:** Son zonas localizadas de la envolvente del edificio donde se produce una interrupción o reducción del aislamiento térmico [11]. Estas discontinuidades favorecen pérdidas de calor en invierno y ganancias térmicas en verano, incrementando el consumo energético y reduciendo el confort térmico interior. Asimismo, los puentes térmicos pueden dar lugar a condensaciones superficiales, contribuyendo indirectamente a la aparición de patologías asociadas a la humedad.
- **Filtraciones de aire:** Corresponden a entradas o salidas no controladas de aire a través de grietas, juntas, encuentros constructivos o aberturas en la envolvente del edificio [12]. Estas fugas afectan negativamente al comportamiento térmico y energético del edificio, pudiendo generar corrientes indeseadas, pérdidas de confort y un aumento del consumo energético. Al igual que los puentes térmicos, las filtraciones de aire pueden agravar problemas de condensación en los cerramientos.

En la **FIGURA 2-2** se pueden observar patologías, previamente comentadas, en edificios.



Figura 2-2 Patologías en los edificios: a) Humedad, b) Grieta (Extraído de: a) [13], b) [14])

2.1.3 Consecuencias del deterioro no detectado

La falta de detección temprana de las patologías constructivas puede dar lugar a una evolución progresiva del daño, incrementando su alcance y complejidad con el paso del tiempo. Alteraciones inicialmente localizadas pueden extenderse a otros elementos del edificio, afectando a su comportamiento global y reduciendo de forma significativa su vida útil. En muchos casos, la ausencia de síntomas visibles en fases iniciales provoca que estos procesos pasen desapercibidos hasta que el deterioro alcanza un estado avanzado.

Desde el punto de vista estructural, el deterioro no identificado puede comprometer la seguridad del edificio, especialmente cuando afecta a elementos portantes o a materiales cuya capacidad resistente disminuye de forma progresiva [12]. Procesos como la corrosión de armaduras, la pérdida de sección en elementos metálicos o la degradación de fábricas pueden desarrollarse durante largos periodos sin manifestaciones evidentes, aumentando el riesgo de fallos estructurales si no se actúa a tiempo [15].

Además de las implicaciones estructurales, el deterioro no detectado suele conllevar una pérdida de prestaciones funcionales y de habitabilidad. La presencia prolongada de humedades, puentes térmicos o degradación de la envolvente puede afectar al confort térmico, a la eficiencia energética y a las condiciones de salubridad del edificio [8]. Estas consecuencias, aunque no siempre suponen un riesgo inmediato para la seguridad, repercuten directamente en el uso cotidiano del inmueble y en el incremento de los costes de explotación.

Finalmente, debe destacarse que muchas de las patologías con mayor impacto presentan un desarrollo lento y poco perceptible mediante inspecciones visuales convencionales. La acumulación progresiva de daños en zonas no accesibles o no visibles refuerza la necesidad de aplicar metodologías de evaluación que permitan identificar alteraciones incipientes y reducir la incertidumbre asociada al estado real del edificio.

2.1.4 Importancia del diagnóstico temprano

El diagnóstico temprano de las patologías constructivas constituye un aspecto clave en la gestión y mantenimiento de los edificios, ya que permite identificar los procesos de deterioro en fases iniciales, cuando sus efectos aún son limitados. La detección precoz de anomalías facilita la adopción de medidas preventivas que evitan la evolución del daño y reducen el riesgo de que este afecte a elementos estructurales o a zonas de mayor relevancia funcional.

La identificación temprana de las patologías no solo tiene implicaciones desde el punto de vista de la seguridad y la durabilidad, sino también desde una perspectiva económica. Las intervenciones realizadas en fases iniciales suelen ser menos complejas y costosas que aquellas que se acometen una vez el deterioro se encuentra avanzado. En este sentido, el diagnóstico precoz permite optimizar los recursos destinados al mantenimiento y prolongar la vida útil del edificio [15], [16].

Sin embargo, muchas de las patologías descritas presentan un desarrollo lento y pueden no manifestarse de forma evidente mediante inspecciones visuales convencionales. Procesos como la acumulación de humedad, la presencia de sales o la degradación interna de los materiales pueden pasar desapercibidos durante largos periodos [8]. Esta circunstancia pone de manifiesto la necesidad de emplear metodologías de diagnóstico capaces de detectar alteraciones incipientes sin afectar a la integridad del edificio.

En este contexto, el uso de técnicas de inspección adecuadas se presenta como una herramienta fundamental para mejorar el conocimiento del estado real de los edificios existentes. La correcta identificación de las patologías y de sus mecanismos de deterioro constituye, por tanto, la base sobre la que se apoyan las técnicas de evaluación del estado estructural desarrolladas en los apartados posteriores.

2.2 Técnicas de inspección y evaluación del estado estructural

La evaluación del estado estructural de los edificios requiere la aplicación de técnicas de inspección capaces de identificar daños, alteraciones y procesos de deterioro que afectan a su comportamiento y durabilidad. Tradicionalmente, este proceso se ha basado en métodos de inspección directa, apoyados en la observación visual y en la realización de ensayos puntuales sobre los elementos constructivos. Estas técnicas han constituido durante décadas la base del diagnóstico en edificación, permitiendo detectar patologías evidentes y evaluar el estado general de las estructuras existentes.

No obstante, los métodos tradicionales de inspección presentan una serie de limitaciones asociadas a la accesibilidad a los elementos, a la subjetividad del diagnóstico y a la posible afección al propio edificio cuando se requieren ensayos destructivos o semi-destructivos. Además, muchas patologías se desarrollan de forma interna, sin manifestaciones visibles claras, lo que dificulta su identificación mediante técnicas exclusivamente visuales [3]. Estas limitaciones han puesto de manifiesto la necesidad de complementar los métodos clásicos con herramientas de análisis más avanzadas.

En este contexto, el desarrollo de técnicas de inspección no invasivas o no destructivas ha supuesto un avance significativo en la evaluación del estado de los edificios. Estas metodologías permiten obtener información relevante sobre el comportamiento estructural y las condiciones de los materiales sin alterar la integridad de la construcción, ampliando el alcance del diagnóstico y reduciendo la incertidumbre asociada al estado real del edificio [3], [4]. En este apartado se revisan tanto los métodos tradicionales de inspección como las principales técnicas no invasivas empleadas actualmente en edificación, analizando sus ventajas, limitaciones y ámbitos de aplicación.

2.2.1 Métodos tradicionales de inspección

Los métodos tradicionales de inspección han constituido históricamente la base para la evaluación del estado de los edificios existentes. Estos métodos se apoyan principalmente en la observación directa de los elementos constructivos y en la experiencia del técnico encargado del diagnóstico [17]. A través de inspecciones visuales sistemáticas es posible identificar daños evidentes, alteraciones superficiales y manifestaciones externas de deterioro que afectan tanto a elementos estructurales como no estructurales.

Además de la inspección visual, los métodos tradicionales incluyen la realización de ensayos destructivos y semi-destructivos sobre materiales y elementos constructivos. Estos ensayos permiten obtener información directa sobre las propiedades mecánicas y el estado interno de los materiales, como resistencias, composición o grado de degradación. No obstante, su aplicación suele ser puntual y localizada, y puede implicar una alteración parcial del edificio, lo que limita su uso en determinadas situaciones [3].

En contraste con estos procedimientos, las técnicas no invasivas permiten obtener información del estado del edificio sin necesidad de intervenir físicamente sobre los materiales. La **FIGURA 2-3** muestra una comparación entre los métodos tradicionales de inspección, basados en el acceso directo al elemento constructivo, y técnicas no invasivas como la termografía infrarroja, que permiten analizar el comportamiento térmico de los paramentos a distancia.



Figura 2-3 Comparación entre métodos tradicionales de inspección y técnicas no invasivas: (a) inspección convencional mediante medios auxiliares y acceso directo a la fachada, (b) inspección mediante termografía infrarroja realizada a distancia sin contacto con el edificio (Extraído de: a) [18], b) [19])

Otro enfoque habitual dentro de los métodos clásicos es la instrumentación estructural mediante sensores y dispositivos de medida, utilizados para controlar deformaciones, movimientos o vibraciones en el tiempo. Estas técnicas permiten realizar un seguimiento del comportamiento estructural bajo determinadas condiciones de carga o uso [17]. Sin embargo, su implementación suele requerir una planificación previa, instalación específica y periodos prolongados de monitorización, lo que restringe su aplicación a casos concretos.

A pesar de su utilidad, los métodos tradicionales presentan limitaciones significativas relacionadas con la accesibilidad a los elementos, la dependencia de la experiencia del inspector y la dificultad para detectar patologías incipientes o no visibles. Estas restricciones pueden dar lugar a diagnósticos incompletos o con un elevado grado de incertidumbre, especialmente en edificios complejos o de gran extensión, lo que ha impulsado la búsqueda de técnicas complementarias que amplíen el alcance del proceso de inspección [4].

2.2.2 Técnicas no invasivas/ no destructivas

Las técnicas de inspección no invasivas o no destructivas agrupan un conjunto de metodologías que permiten evaluar el estado de los edificios sin causar daños ni alteraciones significativas en los elementos constructivos. Estas técnicas se basan en la medición indirecta de diferentes magnitudes físicas, como respuestas térmicas, geométricas o electromagnéticas, proporcionando información relevante sobre el estado de los materiales y de la estructura sin necesidad de realizar intervenciones intrusivas.

El uso de técnicas no destructivas resulta especialmente adecuado en edificios existentes y de uso continuado, donde la accesibilidad, la conservación del patrimonio y la reducción de afecciones durante la inspección son factores clave. Estas metodologías permiten ampliar el alcance del diagnóstico tradicional y sirven como herramienta complementaria a los métodos clásicos, facilitando una evaluación más global del estado del edificio.

2.2.2.1 LiDAR

La tecnología LiDAR (*Light Detection and Ranging*) es una técnica de adquisición de información espacial basada en la emisión de pulsos láser y el análisis de la señal reflejada tras interactuar con un objeto o superficie [6]. Este método permite obtener información geométrica tridimensional de alta precisión, lo que lo convierte en una herramienta especialmente adecuada para la documentación, análisis y evaluación del estado de edificios existentes sin necesidad de contacto físico con los elementos inspeccionados. Desde el punto de vista de los ensayos no destructivos, el LiDAR se encuadra dentro de las técnicas ópticas de inspección, aportando información objetiva y cuantificable sobre la geometría y el estado superficial de los elementos constructivos.

El principio físico del LiDAR se basa en la emisión de un pulso de radiación láser hacia un objetivo y la medición del tiempo que tarda dicha señal en regresar al sensor tras ser reflejada. Este principio, conocido como tiempo de vuelo (*Time of Flight*), permite calcular la distancia entre el sensor y el punto impactado a partir de la velocidad de propagación de la luz [6].

La distancia d (m) se obtiene mediante la Ecuación (1):

$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde c (m/s) es la velocidad de la luz en el vacío y Δt (s) es el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción del pulso láser, representado gráficamente en la **FIGURA 2-4**.

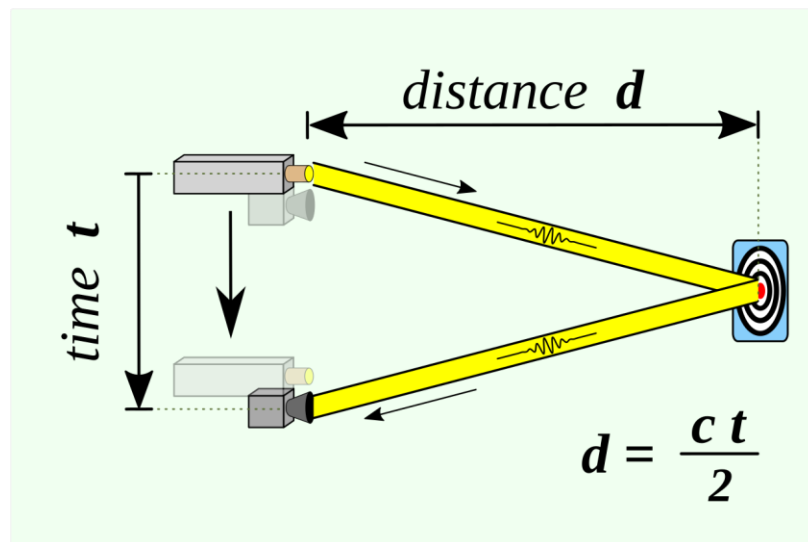


Figura 2-4 Esquema del principio de medición LiDAR por tiempo de vuelo (ToF) (Extraído de [20])

La repetición de este proceso miles o millones de veces por segundo permite obtener un conjunto de puntos tridimensionales, conocido como nube de puntos, que representa de forma detallada la geometría de la superficie escaneada. Cada punto de la nube de puntos queda definido por sus coordenadas espaciales (x, y, z) y, en muchos casos, por información adicional como la intensidad de la señal reflejada. En la **FIGURA 2-5** se puede observar una nube de puntos de una fachada obtenida con un escáner LiDAR Leica P16 en la Escuela Naval Militar.

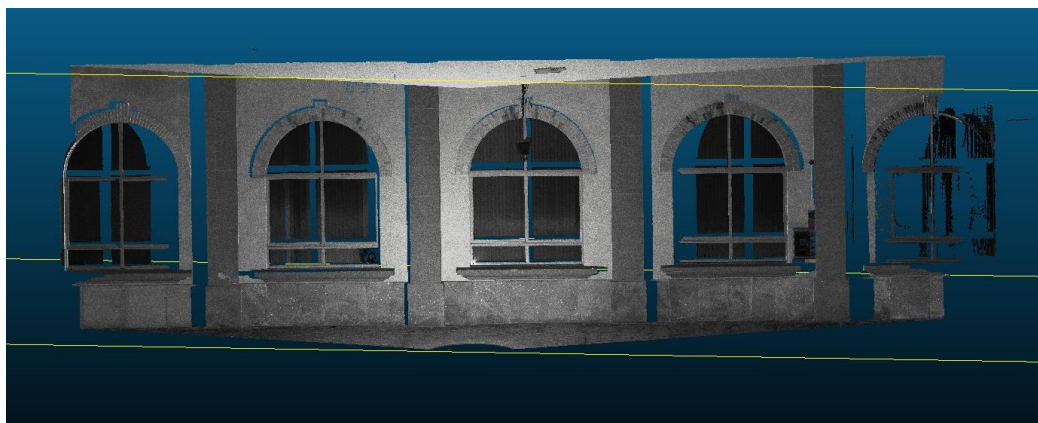


Figura 2-5 Nube de puntos obtenida mediante escáner LiDAR en la Escuela Naval Militar (Elaboración propia)

La información geométrica obtenida mediante LiDAR permite identificar y analizar deformaciones, irregularidades superficiales y pérdidas de material en elementos constructivos, aspectos frecuentemente asociados a procesos patológicos. En particular, esta técnica ha demostrado su utilidad en la detección de fisuras superficiales, desconchados, socavaciones y deformaciones en fachadas, forjados y pavimentos, mediante el análisis de la geometría y la continuidad de las superficies escaneadas [6].

La posibilidad de generar modelos tridimensionales detallados del edificio facilita además la identificación de zonas con comportamientos anómalos y la documentación precisa del estado de conservación, constituyendo una base sólida para la planificación de intervenciones de mantenimiento y rehabilitación [4]. No obstante, el LiDAR presenta limitaciones relacionadas con su incapacidad para detectar patologías internas no asociadas a cambios geométricos apreciables, así como con la presencia de oclusiones o superficies altamente reflectantes [6]. Por este motivo, su aplicación resulta especialmente eficaz cuando se integra dentro de una estrategia de diagnóstico multimétodo, complementándose con otras técnicas no destructivas orientadas al análisis térmico o higrotérmico del edificio.

En conjunto, la tecnología LiDAR se configura como una herramienta avanzada dentro del conjunto de técnicas de ensayo no destructivo aplicadas a la edificación, aportando información geométrica precisa y objetiva que resulta clave para el diagnóstico de patologías superficiales y la evaluación del estado estructural de los edificios. Su integración con otras técnicas NDT permite ampliar el alcance del diagnóstico y mejorar la fiabilidad de los resultados obtenidos en procesos de inspección y conservación del patrimonio construido.

2.2.2.2 Medición y mapeo de humedad en edificios

La medición y el mapeo de humedad en edificios consisten en la caracterización espacial de la distribución de la humedad en los elementos constructivos, con el objetivo de analizar su comportamiento frente a procesos de deterioro asociados a la presencia de agua [12]. A diferencia de las mediciones puntuales tradicionales, el mapeo de humedad permite obtener una visión global del estado del edificio, identificando zonas con comportamientos anómalos que no siempre son detectables mediante inspección visual directa.

Desde el punto de vista del diagnóstico, esta técnica resulta especialmente relevante debido a que la humedad constituye uno de los principales agentes desencadenantes de patologías constructivas, actuando como factor favorecedor de la degradación de materiales y de la aparición de daños

estructurales y superficiales. Los materiales de construcción habituales en edificación, como la piedra, los morteros o la fábrica cerámica, pueden considerarse medios porosos caracterizados por una red de poros interconectados. En este tipo de materiales, el agua puede desplazarse mediante distintos mecanismos físicos, entre los que destacan el ascenso capilar desde el terreno, la difusión del vapor de agua y los flujos inducidos por gradientes de humedad y temperatura [5]. En la **FIGURA 2-6** se puede observar lo anteriormente mencionado, como se distribuye el agua en materiales constructivos mediante ascenso capilar, así como las distintas fuerzas que actúan dentro del propio material a consecuencia de esto.

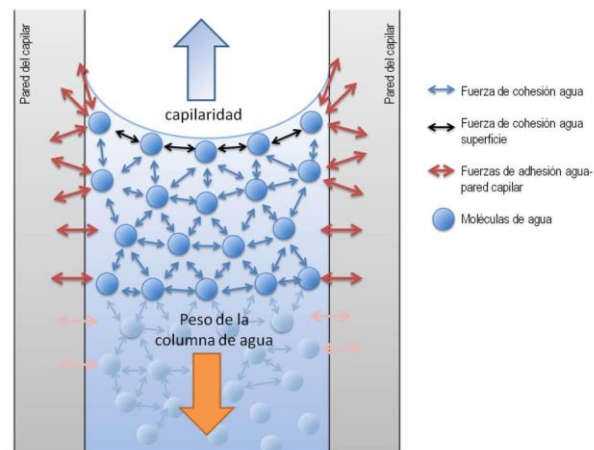


Figura 2-6 Esquema del fenómeno de ascenso capilar en un medio poroso, mostrando las fuerzas de cohesión y adhesión que gobiernan el movimiento del agua en los materiales constructivos (Extraído de [21])

Como consecuencia de estos mecanismos, la humedad no se distribuye de forma uniforme en los elementos constructivos, sino que presenta variaciones espaciales significativas en función del material, la altura, la orientación del paramento y las condiciones ambientales de exposición.

La presencia prolongada de humedad favorece procesos fisicoquímicos que aceleran el deterioro de los materiales, especialmente aquellos relacionados con la disolución y migración de sales solubles en el interior de la red porosa [5]. Cuando el agua se evapora, las sales disueltas pueden cristalizar en el interior de los poros o en la superficie del material, generando tensiones internas que provocan disgregación, fisuración y pérdida progresiva de material. Para la correcta interpretación del comportamiento higrotérmico resulta necesario introducir el concepto de humedad relativa, que expresa la relación entre la cantidad de vapor de agua presente en el aire y la cantidad máxima que este puede contener a una determinada temperatura.

La humedad relativa se define mediante la siguiente Ecuación (2):

$$HR = \frac{p_v}{p_{vs}} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde p_v (Pa) es la presión parcial del vapor de agua y p_{vs} (Pa) es la presión de saturación del vapor de agua a la misma temperatura.

Valores elevados y persistentes de humedad relativa, combinados con determinadas condiciones térmicas, pueden favorecer la aparición de fenómenos de condensación superficial o intersticial en los cerramientos de los edificios. Este proceso ocurre cuando el aire húmedo entra en contacto con

superficies cuya temperatura es inferior al punto de rocío, provocando la condensación del vapor de agua y el aumento del contenido de humedad en los materiales [22]. La presencia prolongada de humedad en los elementos constructivos puede generar diferentes patologías, como manchas, aparición de moho o deterioro progresivo de los materiales, comprometiendo el correcto funcionamiento de la envolvente del edificio.

Además, la acumulación de humedad constituye uno de los factores ambientales que con mayor frecuencia contribuyen al desarrollo de defectos constructivos y al deterioro de las estructuras, especialmente cuando se combina con otros agentes como variaciones térmicas, infiltraciones de agua o exposición a condiciones ambientales agresivas [2].

Como se muestra en la **FIGURA 2-7**, las diferencias de temperatura entre el ambiente interior y exterior, junto con la presencia de infiltraciones de aire a través de juntas o grietas en la envolvente del edificio, pueden favorecer la formación de condensaciones en las zonas más frías del cerramiento.

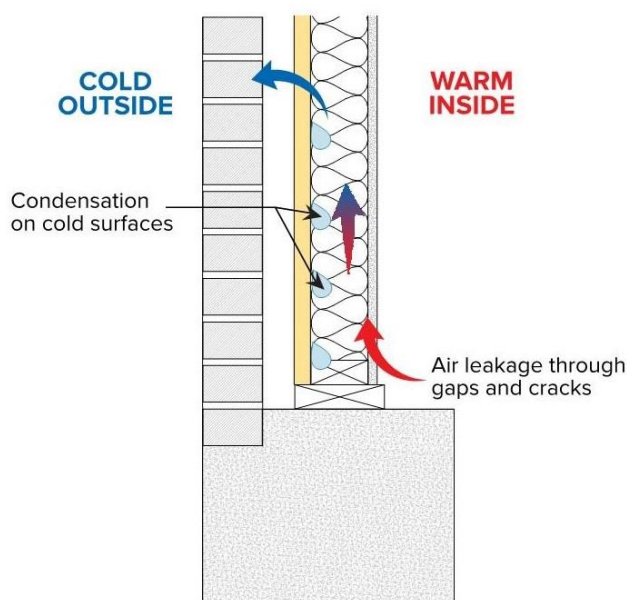


Figura 2-7 Esquema del proceso de condensación en un cerramiento de edificio provocado por diferencias térmicas entre el ambiente interior y exterior, así como por la presencia de filtraciones de aire a través de juntas y grietas (Extraído de [23])

El mapeo higrotérmico se apoya en la combinación de técnicas no invasivas, como la medición de parámetros ambientales y superficiales, permitiendo obtener información distribuida sin alterar la integridad del edificio. La información obtenida se representa habitualmente mediante mapas o gradientes de humedad [5], facilitando la identificación de focos activos de deterioro y su relación con otras patologías observadas durante la inspección.

En estudios aplicados, la cartografía de humedad ha demostrado ser una herramienta eficaz para evaluar la evolución de los procesos patológicos y para analizar la eficacia de tratamientos de intervención [24], como los métodos de desalación no invasiva. El mapeo higrotérmico (**FIGURA 2-8**) permite identificar zonas con elevado contenido de humedad que presentan un mayor riesgo de degradación por cristalización de sales [5], pérdida de adherencia en revestimientos y deterioro superficial de los materiales. Asimismo, esta técnica facilita la interpretación conjunta de los resultados obtenidos mediante otras técnicas NDT, como la termografía infrarroja o el LiDAR, contribuyendo a un diagnóstico más completo y fiable del estado del edificio. En este sentido, la medición y el mapeo

higrotérmico se configuran como una herramienta fundamental dentro de los procesos de evaluación no destructiva de edificios existentes, sirviendo como base para la toma de decisiones en actuaciones de mantenimiento, rehabilitación y conservación del patrimonio construido.

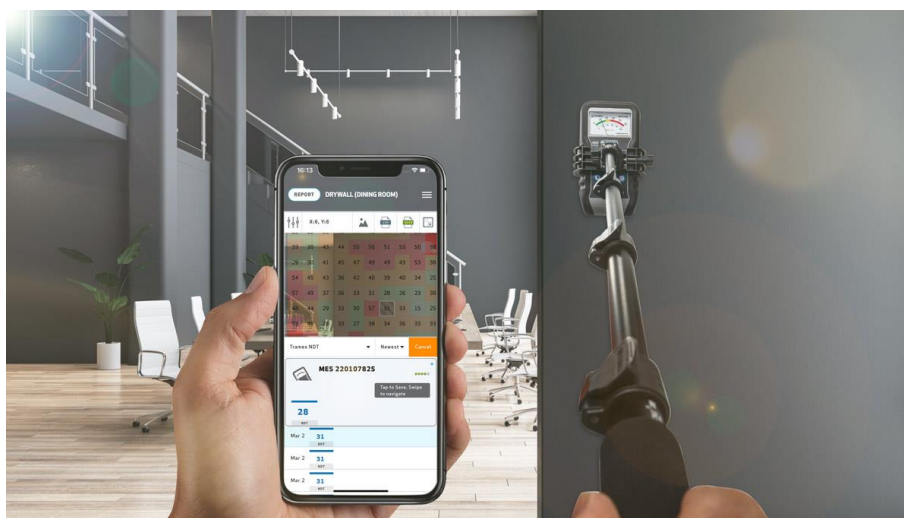


Figura 2-8 Ejemplo de mapeo de mediciones sobre un paramento mediante dispositivos portátiles de inspección (Extraído de [25])

2.2.2.3 Extracción de sales

La presencia de sales solubles en materiales de construcción constituye uno de los principales factores de deterioro en edificios históricos y contemporáneos, especialmente cuando se combina con procesos de humedad persistente. Estas sales, disueltas en el agua que circula por los materiales porosos, pueden migrar hacia la superficie o cristalizar en el interior de los poros, generando tensiones internas que provocan fisuración, disgregación superficial y pérdida progresiva de material [20].

Por este motivo, la extracción o reducción del contenido de sales en los materiales constituye una actuación clave dentro de las estrategias de conservación y rehabilitación de edificios afectados por patologías higrotérmicas. Los materiales porosos empleados en edificación presentan una red capilar que permite la absorción y transporte de soluciones salinas disueltas en el agua [5].

Cuando el agua se evapora, las sales disueltas pueden cristalizar, produciendo incrementos de volumen que generan presiones internas superiores a la resistencia mecánica del material, dando lugar a procesos de deterioro progresivo [24]. Este fenómeno puede manifestarse tanto en forma de eflorescencias, cuando la cristalización se produce en la superficie, como de subflorescencia, cuando tiene lugar en el interior del material siendo estas últimas especialmente dañinas [5]. En la **FIGURA 2-9** puede observarse un ejemplo de un paramento pétreo afectado por eflorescencias salinas y su estado previo y posterior a ser tratado.



Figura 2-9 Imágenes del paramento pétreo correspondientes a distintas fases del proceso de desalación, mostrando el estado inicial con presencia de eflorescencias salinas (imagen superior) y el estado final tras la aplicación del tratamiento (imagen inferior), documentadas en la Capilla de la Catedral de Lugo. (Extraído de [24]).

Las técnicas tradicionales de eliminación de sales suelen implicar actuaciones invasivas sobre los materiales, como sustituciones, limpiezas agresivas o tratamientos químicos intensivos, que pueden comprometer la integridad del edificio. En el ámbito de la conservación del patrimonio y de edificaciones en uso, resulta prioritario emplear métodos que permitan reducir el contenido de sales sin provocar daños adicionales ni alterar significativamente las características originales de los materiales.

En este contexto, los métodos no invasivos de extracción de sales se integran dentro del conjunto de técnicas de ensayo no destructivo, aportando soluciones compatibles con estrategias de diagnóstico y conservación a largo plazo. Entre los métodos no invasivos de extracción de sales, las técnicas electrocinéticas [25] observable en esquema representado en la **FIGURA 2-10** han demostrado una elevada eficacia en la reducción del contenido salino de materiales porosos afectados por humedad. Este tipo de técnicas se basa en la aplicación de un campo eléctrico de baja intensidad que induce el movimiento de los iones disueltos en el agua presente en los poros del material, favoreciendo su migración hacia electrodos dispuestos en la superficie [25].

El transporte iónico se produce principalmente por fenómenos de electromigración y electroósmosis [5], permitiendo la extracción progresiva de sales sin necesidad de intervenir de forma directa sobre el material.

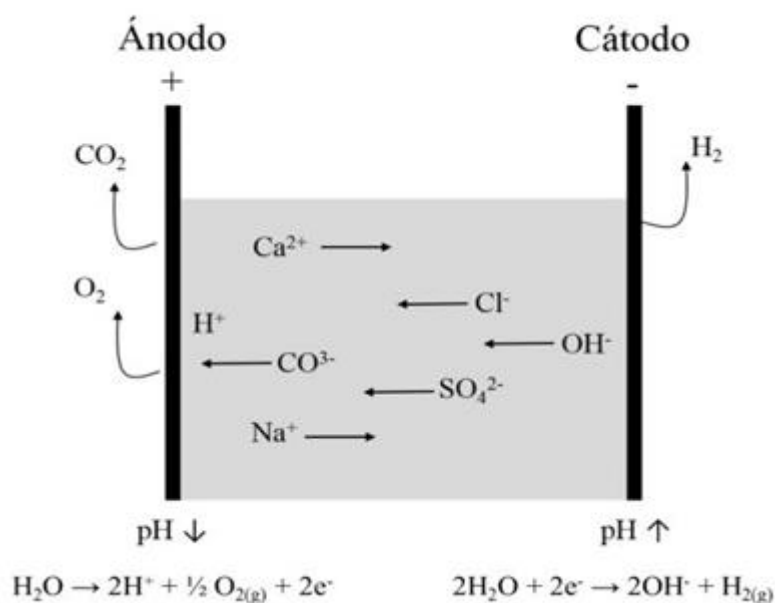


Figura 2-10 Esquema conceptual del proceso de desalación electrocinética aplicado a materiales porosos, mostrando la migración iónica bajo la acción de un campo eléctrico y las reacciones electroquímicas asociadas en ánodo y cátodo. (Extraído de [24]).

La aplicación de métodos no invasivos de extracción de sales, como la comentada de electrocinética, y otros que no extraen de forma sustancial pero que permite realizar mapeo de contenidos de sales como la extracción de sales mediante papetas de celulosa que luego se analiza en ellas aniones como el Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻.

Con el uso de cromatografía iónica de alta resolución, requiere un diagnóstico previo riguroso que permita identificar las zonas afectadas y evaluar la evolución del tratamiento. En este sentido, la combinación de técnicas como el mapeo higrotérmico y la termografía infrarroja resulta fundamental para el seguimiento de la eficacia de los procesos de desalación y para la detección de posibles focos residuales de humedad y sales [24].

La integración de estas técnicas dentro de una estrategia de diagnóstico multimétodo permite optimizar las actuaciones de conservación y reducir el riesgo de reaparición de las patologías asociadas. Los métodos no invasivos de extracción de sales, y en particular las técnicas electrocinéticas, constituyen una solución eficaz y compatible con la conservación de edificios afectados por patologías higrotérmicas. Su aplicación, apoyada en técnicas de diagnóstico no destructivo, permite abordar de forma integral los procesos de deterioro asociados a la presencia de sales, contribuyendo a la prolongación de la vida útil de los edificios y a la preservación de sus valores constructivos y patrimoniales.

2.2.2.4 Termografía infrarroja

La termografía infrarroja es una técnica de ensayo no destructivo basada en la detección y análisis de la radiación térmica emitida por los cuerpos, permitiendo la obtención de mapas de temperatura superficial sin contacto directo con el elemento analizado [27]. Esta técnica se apoya en principios fundamentales de la física de la radiación electromagnética y en el comportamiento térmico de los materiales, lo que la convierte en una herramienta especialmente útil para el diagnóstico de patologías en edificación.

Desde el punto de vista físico, la termografía infrarroja se basa en el hecho de que todo cuerpo real su temperatura es siempre superior al cero absoluto, emitiendo energía en forma de radiación electromagnética. Esta radiación se distribuye a lo largo del espectro electromagnético, concentrándose, en el caso de los cuerpos a temperatura ambiente, principalmente en la banda del infrarrojo térmico [27]. En la **FIGURA 2-11** se muestra de manera gráfica el espectro electromagnético.

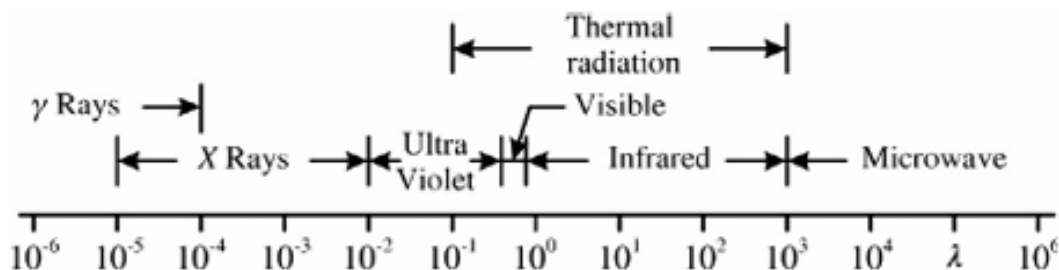


Figura 2-11 Espectro electromagnético (λ en micrómetros) (Extraído de [26])

Para contextualizar la banda de trabajo, es habitual subdividir el infrarrojo en regiones (NIR, SWIR, MWIR, LWIR, FIR) tal como se puede ver en la **TABLA 2-1**. Además, remarcar que, en inspección de edificios en condiciones ambientales, es común trabajar en la sub-banda térmica LWIR, ya que la relación intensidad de radiación emitida y las temperaturas habituales de los cerramientos de los edificios alcanzan su máximo en esa sub-banda, siendo más fácil la lectura de la radiación y por tanto su conversión posterior a temperatura.

Nombre de división	Abreviatura	Horquilla longitud de onda (μm)
<i>Near infrared</i>	NIR	0,7-1,4
<i>Short-wavelength infrared</i>	SWIR	1,4-3
<i>Mid-wavelength infrared</i>	MWIR	3-5
<i>Long-wavelength infrared</i>	LWIR	8-15
<i>Far-infrared</i>	FIR	15-1000

Tabla 2-1 Subdivisión de la banda espectral infrarroja (Extraído de [22])

La interacción de la radiación incidente con un material puede descomponerse en absorción, transmisión y reflexión, cuantificadas mediante absorptividad (α), transmisividad (τ) y reflectividad (ρ) [5]. Todos ellos son dependientes de la longitud de onda y su suma debe ser uno independientemente de ella, tal y como describe la Ecuación (3).

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad (\text{Ecuación 3})$$

La distribución espectral de la radiación emitida por un cuerpo negro se describe con la ley de Planck, que permite expresar la radiación espectral emitida W_b ($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$) en función de la longitud de onda γ (m) y la temperatura absoluta T (K) y donde $C1$ ($W \cdot m^2$) y $C2$ (m · K) representan constantes, queda así definido en la Ecuación (4) y además representada de manera gráfica en la **FIGURA 2-12**.

$$W_b = \frac{C_1}{\gamma^5} = \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\gamma T}} - 1} \quad (\text{Ecuación 4})$$

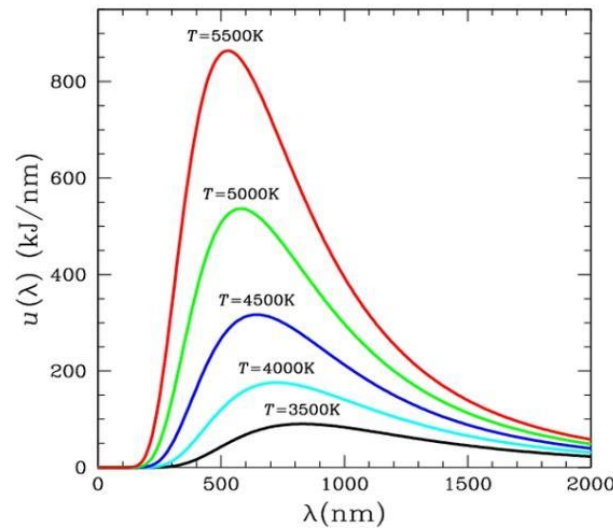


Figura 2-12 Distribución espectral de la radiación de un cuerpo negro según la ley de Planck para diferentes temperaturas (3500–5500 K) (Extraído de [28])

El máximo de emisión de radiación para un cuerpo a una temperatura determinada puede estimarse mediante la ley de desplazamiento de Wien, recogida en la Ecuación (5). Esta relación establece que la longitud de onda correspondiente al máximo de radiación emitida por un cuerpo negro es inversamente proporcional a su temperatura absoluta (T). Como consecuencia, para temperaturas cercanas a las habituales en el entorno construido, el máximo de emisión se sitúa dentro de la región infrarroja del espectro electromagnético, concretamente en la banda del infrarrojo térmico de onda larga (LWIR), indicada en la **TABLA 2-1**, y tal y como se mencionaba antes, por este motivo, muchas de las cámaras termográficas empleadas en inspección de edificios están diseñadas para operar con sensores sensibles en dicha sub-banda espectral.

$$\gamma_{pico}(m) = \frac{T(K)}{0,0029(m \cdot K)} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Integrando la ley de Planck se obtiene la ley de Stefan-Boltzmann (Ecuación 6), que da la potencia radiante total emitida W_b ($W \cdot m^{-2}$) por un cuerpo negro en función de T (K) la constante de Stefan-Boltzmann σ ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$).

$$W_b = \sigma T^4 \quad (\text{Ecuación 6})$$

En cuanto a la emisividad, se define para una determinada longitud de onda como la relación entre la energía radiante emitida por una superficie real W_γ ($W \cdot m^{-2}$) y la que emitiría un cuerpo ideal (es decir, cuerpo negro) $W_{\gamma b}$ ($W \cdot m^{-2}$) a la misma temperatura, tal como se recoge en la Ecuación (7). Sus valores suelen situarse entre 0,1 y 0,99, lo que indica que los materiales reales (denominados cuerpos grises) emiten siempre menos radiación que un cuerpo negro en las mismas condiciones. El cuerpo negro constituye un modelo teórico utilizado como referencia en el estudio de la radiación térmica.

$$\varepsilon_\gamma = \frac{W_\gamma}{W_{\gamma b}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Un cuerpo negro es un modelo ideal que emite toda la radiación que recibe en función de su temperatura. Dado que este comportamiento no se da en materiales reales, se utilizan simuladores de cuerpo negro para aproximarlos en condiciones experimentales. En la práctica, los materiales reales (denominados cuerpos grises) emiten una fracción de esa radiación, lo que se describe mediante el parámetro de emisividad (ϵ). Por ello, al aplicar la ley de Stefan-Boltzmann a cuerpos reales es necesario introducir este parámetro, como se muestra en la Ecuación (8). La **FIGURA 2-13** representa gráficamente esta relación, evidenciando que la radiación emitida aumenta con la temperatura del objeto.

$$W = \sigma T^4 \epsilon \quad (\text{Ecuación 8})$$

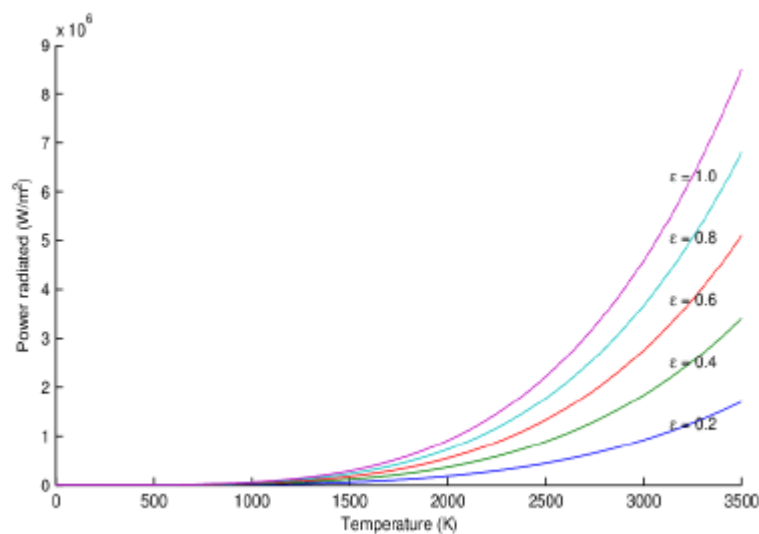


Figura 2-13 Ley de Stefan-Boltzmann (Extraído de [22])

Las mediciones obtenidas mediante cámaras termográficas están condicionadas por distintos factores que influyen en la radiación detectada. En general, la señal registrada puede descomponerse en tres contribuciones principales: la radiación emitida por el propio objeto (W_{obj}), descrita mediante la Ecuación (8); la radiación reflejada por el entorno (W_{ref}), que es la misma que la Ecuación (8) pero sustituyendo ϵ por $(1 - \epsilon)$ y temperatura del objeto por la temperatura reflejada en la superficie de dicho objeto; y la radiación procedente de la atmósfera (W_{atm}).

La combinación de estas tres contribuciones da lugar a la formulación recogida en la Ecuación (9), en la que se introduce además el factor de transmitancia atmosférica (T), que representa la fracción de radiación que alcanza el sensor tras atravesar la atmósfera. Este parámetro depende de variables como la temperatura y la humedad relativa del aire, así como de la distancia entre la cámara y el objeto. Por ello, estos valores suelen medirse en campo e introducirse en la configuración de la cámara para obtener estimaciones más precisas de la temperatura; de lo contrario, las mediciones corresponderían únicamente a temperaturas aparentes.[29] [5] En la **FIGURA 2-14** se puede observar el proceso anteriormente comentado de captación de la cámara sumado al registro de radiación infrarroja.

$$W_{tot} = \tau \cdot W_{obj} + T \cdot W_{ref} + (1 - T) \cdot W_{atm} \quad (\text{Ecuación 9})$$

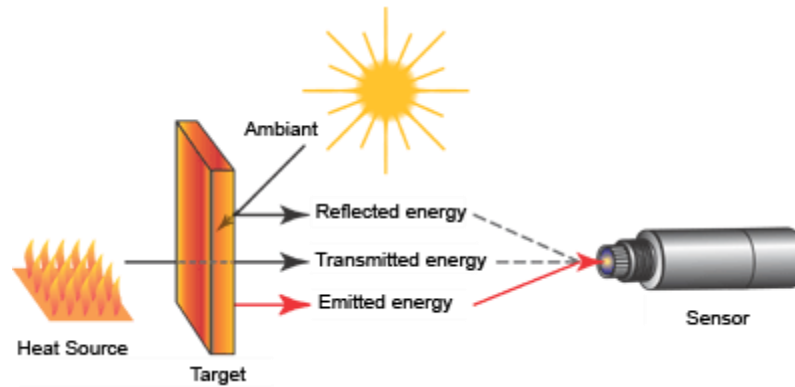


Figura 2-14 Componentes de la radiación infrarroja detectada por una cámara termográfica: energía emitida, reflejada y transmitida (Extraído de [30])

Si un objeto absorbe toda la radiación incidente, sin que exista transmisión ni reflexión, su absorptividad es igual a uno. En estas condiciones, y manteniendo la temperatura constante, la energía absorbida debe ser reemitida, lo que implica que su emisividad también sería igual a uno. De acuerdo con la ley de Kirchhoff, esto significa que la capacidad de un cuerpo para emitir radiación infrarroja es proporcional a su capacidad para absorberla a una temperatura determinada, [22] relación que se expresa en la Ecuación (10).

$$\varepsilon_{\gamma} = \alpha_{\gamma} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Dentro del conjunto de técnicas de ensayo no destructivo, la termografía infrarroja destaca por su carácter no invasivo, su rapidez de adquisición de datos y su capacidad para inspeccionar grandes superficies sin necesidad de contacto físico. Estas características la hacen especialmente adecuada para el análisis preliminar y el diagnóstico de edificios existentes.

En el contexto de la edificación, tal y como muestra la **FIGURA 2-15**, la termografía infrarroja permite detectar patologías relacionadas con humedades, puentes térmicos, infiltraciones de aire, pérdidas energéticas y defectos en la envolvente, entre otros. Estas patologías generan diferencias térmicas respecto a las zonas sanas del edificio, que se manifiestan como anomalías fácilmente identificables en las imágenes térmicas.



Figura 2-15 Termografía infrarroja de una fachada, con escala de temperaturas (°C) (Extraído de [31])

La presencia de humedad en materiales porosos modifica su capacidad térmica y su conductividad, produciendo patrones térmicos característicos que pueden ser identificados mediante termografía infrarroja. De manera similar, los puentes térmicos provocan concentraciones de flujo de calor que se traducen en contrastes térmicos claramente visibles en condiciones adecuadas de inspección. Asimismo, la técnica ha demostrado su utilidad en la detección de defectos constructivos ocultos, como discontinuidades en el aislamiento, fisuras o zonas con desprendimientos [3], especialmente cuando se combina con otras técnicas NDT para aumentar la fiabilidad del diagnóstico. En este sentido, la termografía infrarroja se configura como una herramienta fundamental dentro de los procesos de evaluación no destructiva del estado de conservación de los edificios, sirviendo tanto como método de diagnóstico inicial como apoyo a intervenciones de mantenimiento y rehabilitación.

2.3 Integración de diferentes técnicas no destructivas en el diagnóstico de edificaciones

Las técnicas de ensayo no destructivo (NDT) han adquirido un papel fundamental en la inspección y evaluación del estado de los edificios, ya que permiten obtener información relevante sobre los elementos constructivos sin necesidad de realizar intervenciones que alteren la integridad de la estructura.

Sin embargo, cada una de estas técnicas presenta capacidades de análisis diferentes, lo que implica que ninguna de ellas, por sí sola, permite obtener una caracterización completa del estado del edificio. Mientras que algunas técnicas permiten identificar anomalías geométricas o deformaciones superficiales, otras se centran en el análisis de propiedades térmicas, la detección de humedad o la identificación de defectos internos en los materiales.

Por este motivo, diversos estudios destacan la importancia de combinar distintas técnicas de inspección con el fin de complementar la información obtenida mediante cada una de ellas. La integración de diferentes métodos permite mejorar la capacidad de diagnóstico y reducir la incertidumbre en la interpretación de los resultados, facilitando la identificación de anomalías relacionadas con defectos constructivos, presencia de humedad, pérdidas energéticas o alteraciones geométricas en los elementos constructivos.

En esta línea, el presente trabajo adopta un enfoque basado en la utilización conjunta de varias técnicas no destructivas, con el objetivo de analizar el estado de determinados elementos constructivos de la Escuela Naval Militar a partir de información geométrica, térmica y material obtenida mediante diferentes métodos de inspección.

3 DESARROLLO DEL TFG

En el presente capítulo se expone de manera detallada el procedimiento seguido para la realización del estudio, describiendo tanto el contexto del caso analizado como la metodología aplicada para la obtención y tratamiento de los datos.

En primer lugar, se presenta el caso de estudio, contextualizando el entorno en el que se ubica el elemento constructivo objeto de análisis y justificando los criterios que han motivado su selección. A continuación, se describe la planificación del trabajo y la estrategia de diagnóstico adoptada, mediante la aplicación combinada de distintas técnicas no destructivas.

Seguidamente, se detallan los equipos y técnicas empleados, especificando sus fundamentos operativos y su utilidad dentro del estudio. Posteriormente, se expone la metodología de adquisición de datos, incluyendo las condiciones de medición, la secuencia de trabajo y los criterios seguidos para garantizar la coherencia y fiabilidad de la información obtenida.

Finalmente, se describe el proceso de tratamiento y análisis de los datos recopilados, así como los criterios adoptados para la interpretación de los resultados y la elaboración del diagnóstico técnico del estado del paramento analizado.

Este desarrollo estructurado permite comprender de forma ordenada el procedimiento seguido y la lógica técnica que sustenta las conclusiones alcanzadas en el presente trabajo.

3.1 Descripción del caso de estudio

El estudio se ha desarrollado en la Plaza Álvaro de Bazán, espacio exterior situado dentro del recinto de la Escuela Naval Militar (ENM), centro de formación de los futuros oficiales de la Armada Española. La ENM se ubica en la villa de Marín, en la provincia de Pontevedra, en un entorno costero con influencia directa del medio marino. La dársena de la Escuela Naval, donde se encuentran los medios de adiestramiento naval de los alumnos, se localiza a una distancia aproximada de 70–80 metros del edificio objeto de estudio, lo que implica una exposición constante a ambientes húmedos y a la posible acción de aerosoles marinos.

La ubicación del recinto y su proximidad inmediata al entorno marítimo pueden apreciarse en la **FIGURA 3-1**, donde se muestra la localización de la Escuela Naval Militar dentro del término municipal de Marín, así como su relación directa con la línea de costa.

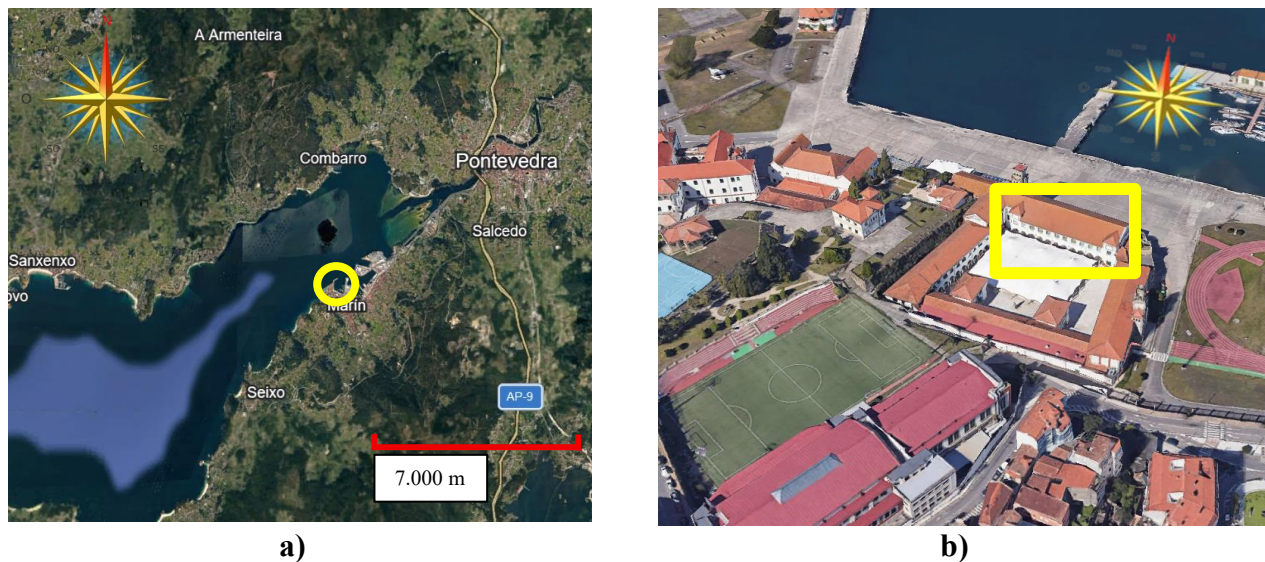


Figura 3-1 Situación geográfica de la Plaza Álvaro de Bazán en: a) Ría de Pontevedra (círculo amarillo), y en b) Escuela Naval Militar (rectángulo amarillo) (Elaboración propia usando Google Earth)

Tras una inspección preliminar in situ en distintas zonas del centro, se consideró oportuno centrar la investigación en la cara sur (orientación aproximada 200°) de la planta baja del edificio sede del Centro Universitario de la Defensa (CUD) en la ENM. Este edificio, inaugurado en el año 2010, alberga la actividad académica universitaria del centro, incluyendo despachos del personal docente y aulas en las que se desarrollan las clases de los alumnos.

Como se puede observar en la **FIGURA 3-2**, el muro analizado constituye el cerramiento exterior de dichos espacios docentes. El estudio se focaliza en el paramento inferior, ejecutado en piedra de naturaleza granítica, que se extiende hasta una altura aproximada de 80 cm sobre el nivel del pavimento y a lo largo de un tramo continuo de 43,1 metros. Por su configuración y disposición constructiva, el paramento presenta características compatibles con un sistema de aplacado pétreo, con juntas de espesor reducido y tonalidad similar a la piedra, ligeramente perceptibles visualmente. La base del paramento se encuentra al mismo nivel que el pavimento exterior, sin desnivel apreciable.



Figura 3-2 Vista del paramento pétreo analizado en el presente estudio (Elaboración propia)

Durante la inspección visual inicial se identificaron indicios claros de alteración superficial, entre los que destacan manchas de humedad, oscurecimientos irregulares, ligeras pérdidas de material y la

presencia de eflorescencias blanquecinas compatibles con depósitos de sales solubles. Estas manifestaciones se encuentran distribuidas de forma relativamente homogénea a lo largo del tramo analizado, si bien se observa que la parte más baja del paramento presenta, en términos generales, un mejor estado de conservación relativo.

La selección de esta ubicación responde a diversos criterios técnicos. En primer lugar, la presencia de indicios patológicos visibles justificaba la necesidad de un análisis detallado mediante técnicas no destructivas. En segundo lugar, se trata de un elemento representativo dentro del conjunto edificatorio, situado en una zona de tránsito habitual para los alumnos en la Plaza Álvaro de Bazán (conocida coloquialmente como “Patio de Aulas”) y que constituye el único revestimiento que separa directamente los despachos docentes y el aula del exterior.

Desde el punto de vista ambiental, la proximidad inmediata al mar y la frecuente pluviometría característica de la zona de Marín favorecen condiciones de elevada humedad relativa, susceptibles de influir en el comportamiento higrotérmico del cerramiento. La orientación sur del paramento y su disposición bajo un soportal hacen que reciba escasa radiación solar directa de forma habitual, aunque pueda estar expuesto puntualmente en determinadas épocas del año y franjas horarias. Esta configuración resulta particularmente interesante desde el punto de vista del diagnóstico, ya que permite analizar un muro exterior parcialmente protegido de la acción directa de la lluvia, lo que permite el uso de las técnicas NDTs incluso en condiciones meteorológicas adversas, pero sometido a condiciones ambientales reales de uso.

Las mediciones y ensayos se realizaron durante el mes de febrero y marzo de 2026, con el edificio en pleno funcionamiento, lo que permitió evaluar el comportamiento del paramento en condiciones normales de ocupación.

3.2 Diseño de la campaña experimental y estrategia en cada técnica

La investigación se planteó desde un enfoque de análisis mediante varios métodos no destructivos del paramento pétreo objeto de estudio. La estrategia adoptada no se limitó a la aplicación aislada de distintas técnicas, sino que se diseñó con el propósito de establecer una validación cruzada entre métodos geométricos, de humedad, térmicos y químicos.

El diseño de la campaña se estructuró en cuatro jornadas independientes de adquisición de datos, correspondientes a las siguientes fases: escaneado láser terrestre (*Terrestrial Laser Scanning*, TLS), mediciones higrométricas superficiales, termografía infrarroja y extracción de muestras para análisis de sales.

La lógica de trabajo parte de una hipótesis metodológica: las alteraciones superficiales detectables geométricamente mediante análisis de nubes de puntos pueden guardar correlación espacial con zonas de mayor humedad y, potencialmente, con acumulación de sales solubles. En consecuencia, la planificación experimental se orientó a generar productos intermedios cuantificables y espacialmente referenciados que permitan, en el capítulo siguiente, analizar dichas correspondencias.

Con el fin de garantizar coherencia entre técnicas, el paramento completo (43,1 m de longitud y 0,80 m de altura) se dividió en cinco estaciones de trabajo (ST001–ST005) tal y como se puede observar en la **FIGURA 3-3**. Esta división responde a criterios operativos (tiempo de escaneo, manejabilidad de los bancos de datos) y metodológicos (correspondencia directa entre nube de puntos, mediciones higrométricas, sales y capturas térmicas).

Se definió un sistema de referencia local para cada estación, donde el eje X corresponde al desarrollo longitudinal del tramo analizado y el eje Y a la altura del paramento (0 cm a ras de suelo y 80 cm en la coronación del paramento). Esta estructuración garantiza trazabilidad completa entre adquisición, procesado y representación gráfica posterior.

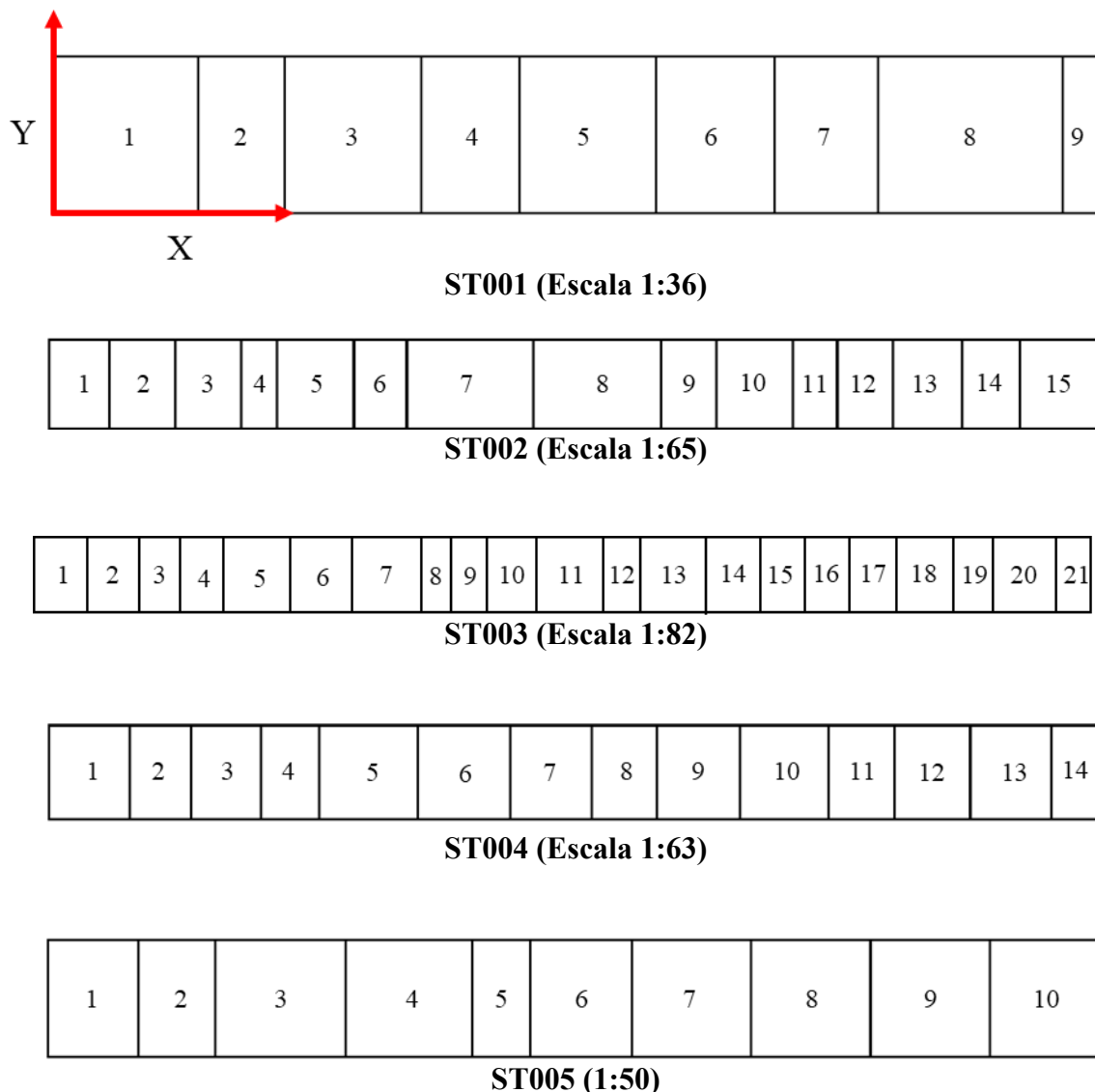


Figura 3-3 Esquema a escala de la sectorización del paramento (43,1 m × 0,80 m) en cinco estaciones de análisis (ST001–ST005) y numeración de los sillares en cada estación.

3.3 Adquisición geométrica mediante escaneado láser terrestre (TLS)

3.3.1 Instrumentación y configuración de la captura

La adquisición se realizó mediante un escáner láser terrestre (TLS) Leica ScanStation P16, cuyas especificaciones técnicas relevantes se recogen en la **TABLA 3-1**. El equipo fue instalado sobre trípode Leica GST20-9 y una base de apoyo Leica GST4, garantizando estabilidad durante la captura.

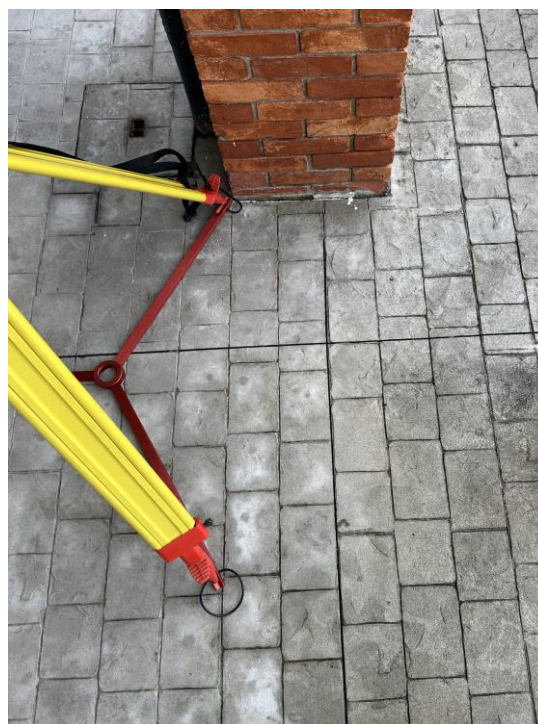
Como se aprecia en la **FIGURA 3-4**, el escáner se situó frente al paramento manteniendo una distancia aproximada constante de 1,5 m respecto al paramento, con el fin de asegurar una densidad homogénea de puntos.

Parámetro	Valor
<i>Tipo de tecnología</i>	Tiempo de vuelo (<i>time-of-flight</i>)
<i>Alcance máximo</i>	Hasta 270 m
<i>Alcance mínimo</i>	0,4 m
<i>Precisión de distancia</i>	$\pm 1,2 \text{ mm} + 10 \text{ ppm}$
<i>Precisión de posición 3D</i>	3 mm a 50 m
<i>Resolución angular</i>	0,0001°
<i>Velocidad de adquisición</i>	Hasta 1.000.000 puntos/ segundo
<i>Campo de visión horizontal</i>	360°
<i>Campo de visión vertical</i>	290°
<i>Campo de láser</i>	Clase 1 (IEC 60825-1)
<i>Protección ambiental</i>	IP54
<i>Rango térmico operativo</i>	-20 °C a 50 °C

Tabla 3-1 Especificaciones técnicas del escáner láser terrestre Leica ScanStation P16 (Extraído de [32])



a)



b)

Figura 3-4 Escáner láser terrestre Leica ScanStation P16 empleado durante la campaña de adquisición de datos: a) Vista general del equipo en posición de escaneo; b) Detalle del sistema de trípode y apoyo sobre el pavimento. (Elaboración propia)

La captura se configuró con una resolución de 3,1 mm a 10 m, seleccionada como compromiso entre densidad de puntos, nivel de detalle y tiempo de adquisición. En función de la longitud de cada estación, los escaneos tuvieron una duración aproximada comprendida entre 2 y 7 minutos, siendo la estación 3 la de mayor tiempo al corresponder al tramo más extenso.

3.3.2 Conversión de formatos y preparación del banco de datos

Los datos generados por el escáner fueron exportados en formato nativo (.bin) y convertidos mediante el software Leica Cyclone a formato .e57 (estándar abierto para nubes de puntos). Esta conversión es relevante porque permite conservar geometría e información asociada en un formato interoperable, facilitando el análisis posterior en software independiente.

Posteriormente, los archivos .e57 se importaron en el software CloudCompare (v2.13.2), donde se realizó la segmentación del paramento: eliminación de pavimento, pilares y elementos no pertenecientes al área de interés. Como se observa en la **FIGURA 3-5 (A)**, la nube original incluye el entorno inmediato, mientras que en la **FIGURA 3-5 (B)** se muestra el recorte final restringido al paramento objeto de análisis.

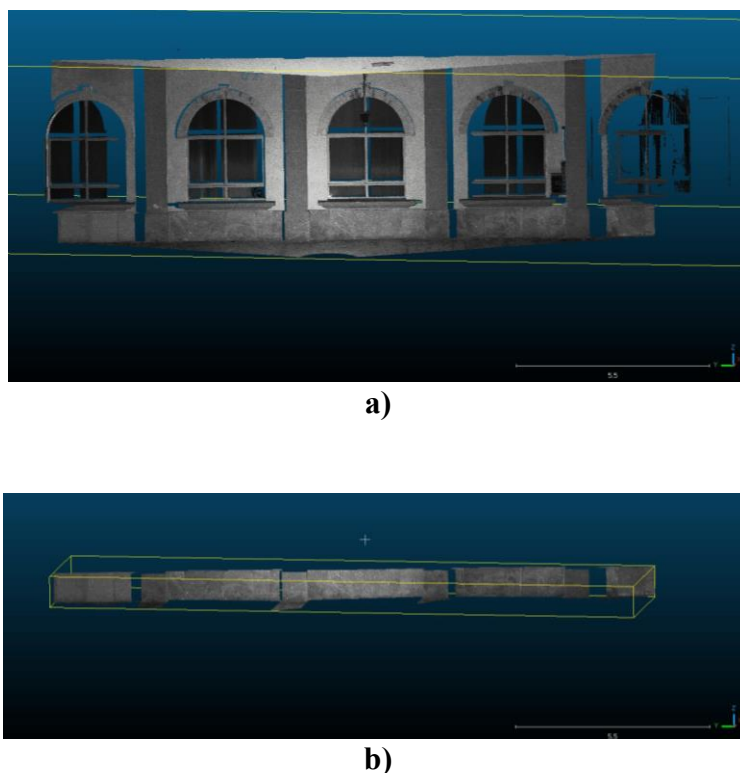


Figura 3-5 . Proceso de segmentación del paramento en CloudCompare: a) Nube de puntos original incluyendo el entorno inmediato; b) Recorte final restringido exclusivamente al paramento objeto de estudio (Elaboración propia)

La división en cinco estaciones se mantuvo durante todo el flujo de trabajo, de forma que cada estación constituyera un banco de datos manejable y coherente con el resto de los ensayos.

3.3.3 Análisis geométrico en CloudCompare: formulación matemática y significado físico

Una vez obtenida y registrada la nube de puntos procedente del escaneo LiDAR, es posible extraer de ella información geométrica relevante mediante técnicas de análisis espacial aplicadas directamente sobre el conjunto de puntos. Las nubes de puntos constituyen representaciones tridimensionales discretas de la superficie de los objetos escaneados, en las que cada punto contiene información de posición en el espacio que permite describir con elevada precisión la geometría del elemento analizado. Cuando estas

mediciones se realizan de forma repetida sobre todo el campo de visión del sensor, el resultado es un conjunto denso de puntos que permite reconstruir un modelo tridimensional de la superficie observada.

A partir de esta información tridimensional es posible calcular diferentes descriptores geométricos locales, que permiten caracterizar la forma y orientación de la superficie en el entorno de cada punto. Estos parámetros se obtienen mediante el análisis de la distribución espacial de los puntos vecinos dentro de un radio determinado, lo que permite aproximar localmente la geometría de la superficie mediante modelos matemáticos simplificados, como planos ajustados por mínimos cuadrados. Este tipo de análisis constituye la base de numerosos algoritmos de procesamiento de nubes de puntos y resulta especialmente útil para identificar irregularidades geométricas, discontinuidades o posibles anomalías en superficies constructivas.

En este contexto, herramientas especializadas de procesamiento de nubes de puntos como CloudCompare permiten calcular distintos indicadores geométricos derivados de la estructura local de la nube. Entre estos se encuentran parámetros como la rugosidad superficial (*Roughness*), la curvatura media (*Mean Curvature*) o la verticalidad (*Verticality*), los cuales proporcionan información cuantitativa sobre la variación geométrica de la superficie analizada. El estudio de estos parámetros permite caracterizar con mayor detalle el estado geométrico del elemento constructivo estudiado y facilita la detección de zonas que presentan alteraciones o deterioros respecto al comportamiento esperado de la superficie.

En los apartados siguientes se describen los fundamentos matemáticos de los descriptores geométricos empleados en este trabajo, así como su interpretación física en el contexto del análisis de elementos constructivos mediante nubes de puntos LiDAR.

3.3.3.1 Vecindad local y escala de cálculo

Sea un punto p de la nube. Se define su vecindad $\mathcal{N}(p)$ como el conjunto de puntos situados dentro de un radio r (Ecuación 11):

$$\mathcal{N}(p) = \{q \in \text{nube} \mid \|q - p\| \leq r\} \quad (\text{Ecuación 11})$$

En este trabajo se empleó $r = 0,01$ m (1 cm). Este valor fija la escala del análisis: a radios pequeños el descriptor es sensible a micro-irregularidades; a radios grandes se suaviza la geometría y se captan tendencias más globales [33].

Este cambio de parámetro responde a la necesidad de pasar de una fase inicial de detección a una etapa de caracterización más estable y representativa del defecto identificado. El incremento del radio permite suavizar el efecto del ruido inherente a la nube de puntos y reducir la influencia de la granularidad propia del granito, mejorando así la fiabilidad de los descriptores geométricos basados en vecindario, como es el caso de la curvatura obtenida mediante ajuste local.

Asimismo, un radio mayor facilita la captura de la geometría completa del defecto cuando su dimensión característica es del orden de varios centímetros, situación habitual en paramentos pétreos donde pueden aparecer pérdidas de material en aristas, desconchados o impactos puntuales.

Por otra parte, el hecho de trabajar sobre una zona previamente segmentada reduce el coste computacional del proceso y evita que el aumento del radio implique la mezcla de geometrías no relacionadas, como podrían ser sillares contiguos o bordes pertenecientes a elementos distintos.

3.3.3.2 Intensity

En el contexto del análisis de superficies pétreas mediante escaneo láser terrestre, el atributo de intensidad, registrado por el sensor en la sub-banda del infrarrojo cercano (NIR), puede proporcionar información complementaria relevante sobre el estado superficial del material. En superficies de granito, las variaciones en la intensidad registrada pueden estar relacionadas con cambios en las propiedades de reflexión del material, que a su vez pueden deberse a diferencias en la textura superficial, presencia de alteraciones, humedad o pérdidas de material. Por ejemplo, zonas afectadas por desconchados, erosión o impactos pueden presentar modificaciones en la rugosidad y en la orientación local de la superficie, lo que altera la forma en que el pulso láser es reflejado hacia el sensor.

Como consecuencia, estas áreas pueden mostrar valores de intensidad distintos respecto a las zonas circundantes más homogéneas. Por este motivo, el análisis conjunto de la intensidad junto con parámetros geométricos derivados de la nube de puntos (como la rugosidad, la curvatura o la planaridad) permite mejorar la identificación de irregularidades y anomalías superficiales en el elemento estudiado.

3.3.3.3 Roughness

La rugosidad (*Roughness*) es un descriptor geométrico utilizado para cuantificar el grado de irregularidad de una superficie a partir de la dispersión de los puntos de la nube respecto a una superficie de referencia local. Este parámetro permite evaluar cómo se distribuyen los puntos en torno a una superficie idealmente plana dentro de un vecindario determinado.

En CloudCompare, la rugosidad se calcula definiendo para cada punto un vecindario local mediante un radio de búsqueda establecido por el usuario, en este caso lo comentado en el **APARTADO 3.3.3.1**. A partir de los puntos contenidos en dicho vecindario se ajusta un plano local mediante un método de mínimos cuadrados, que representa la superficie de referencia. Posteriormente se calculan las distancias ortogonales de todos los puntos del vecindario respecto a este plano.

Si el plano local se define por una normal n (normalizada) y pasa por el centroide $\bar{p}$, la distancia firmada de un punto vecino p_i al plano se rige por la Ecuación (12)

$$d_i = n \cdot (p_i - \bar{p}) \quad (\text{Ecuación 12})$$

Una medida habitual de rugosidad es la desviación cuadrática media (*Root Mean Square*, RMS) (Ecuación 13):

$$\text{Roughness} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Físicamente, este descriptor es sensible a micro-relieves, pérdida de material, erosión superficial o disgregación granular, siempre en la escala definida por el radio r [33].

3.3.3.4 Planarity

El parámetro de planaridad (*Planarity*) permite evaluar el grado en que un conjunto de puntos de la nube se ajusta a un plano local. Su cálculo se basa en el análisis del vecindario de cada punto mediante la matriz de covarianza (Ecuación 14):

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})(p_i - \bar{p})^T \quad (\text{Ecuación 14})$$

donde $\bar{p}$ es el centroide del conjunto de puntos. A partir de esta matriz se obtienen los valores propios $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$, que describen la dispersión espacial.

La planaridad se define por la Ecuación (15):

$$\text{Planarity} = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Valores elevados indican una distribución de puntos predominantemente plana, mientras que valores bajos reflejan geometrías más irregulares o volumétricas [33]. En superficies pétreas, este parámetro resulta útil para identificar zonas alteradas o con pérdida de material, donde la desviación respecto a un plano ideal es mayor.

3.3.3.5 Verticality

La verticalidad (*verticality*) es un descriptor geométrico que permite evaluar la orientación local de una superficie respecto al eje vertical del sistema de referencia. Este parámetro se utiliza para identificar desviaciones en la orientación de la superficie analizada, lo que resulta especialmente útil en el estudio de elementos constructivos cuya geometría ideal presenta una orientación predominantemente vertical, como muros o paramentos.

En CloudCompare, la verticalidad se calcula a partir del vector normal local de la superficie, el cual se obtiene mediante el análisis de la distribución espacial de los puntos dentro de un vecindario definido por un radio de búsqueda, en este caso el comentado en el **APARTADO 3.3.3.1**. Este proceso se realiza generalmente mediante un análisis de componentes principales (*Principal Component Analysis*, PCA), que permite estimar la dirección normal al plano local ajustado a los puntos del vecindario.

Una vez determinada la normal local n , la verticalidad se obtiene a partir de su relación con el vector vertical del sistema de referencia, normalmente definido como $z = (0,0,1)$. Matemáticamente, esta relación puede expresarse mediante el producto escalar entre ambos vectores (Ecuación 16):

$$\text{Verticality} = 1 - |n \cdot z| \quad (\text{Ecuación 16})$$

Cuando la superficie es perfectamente vertical, el vector normal es perpendicular al eje vertical, por lo que el producto escalar tiende a cero y el valor de verticalidad se aproxima a uno. Por el contrario, en superficies horizontales o con inclinaciones significativas, la normal presenta una mayor componente vertical y el valor del descriptor disminuye [33].

En el análisis de nubes de puntos obtenidas mediante escaneo láser terrestre, este parámetro permite detectar variaciones en la orientación local de la superficie, como deformaciones, abombamientos o deterioros en los bordes. En elementos constructivos como paramentos de granito, la verticalidad resulta útil para identificar zonas donde la geometría se desvía de la orientación esperada del muro, complementando la información proporcionada por otros descriptores geométricos como la rugosidad, la curvatura o la variación superficial.

3.3.3.6 Surface variation

La variación superficial (*Surface Variation*) es un descriptor geométrico utilizado para evaluar el grado de dispersión de los puntos dentro de un vecindario local de la nube de puntos. Este parámetro permite caracterizar la irregularidad geométrica de la superficie analizada a partir de la estructura espacial de los puntos contenidos dentro de un radio de búsqueda determinado, comentado en el **APARTADO 3.3.3.1**.

En CloudCompare, este descriptor se calcula a partir del análisis de componentes principales (PCA) aplicado al conjunto de puntos del vecindario. Para ello se construye la matriz de covarianza de las coordenadas de los puntos vecinos y se obtienen sus autovalores λ_1 , λ_2 y λ_3 , ordenados de mayor a menor ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$). Estos autovalores describen la distribución espacial de los puntos a lo largo de las direcciones principales del vecindario [33].

La variación superficial se define como la relación entre el menor autovalor y la suma de los tres autovalores (Ecuación 17):

$$\text{Surface Variation} = \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (\text{Ecuación 17})$$

En superficies aproximadamente planas, el valor de λ_3 (asociado a la dispersión de los puntos en la dirección normal al plano) es muy pequeño en comparación con los otros dos autovalores, por lo que la variación superficial toma valores próximos a cero. Por el contrario, en zonas donde la superficie presenta irregularidades, rugosidad elevada o cambios geométricos significativos, el valor de λ_3 aumenta, lo que se traduce en valores mayores de *Surface Variation* [33].

Por este motivo, este descriptor resulta especialmente útil para identificar zonas con irregularidades geométricas o alteraciones superficiales, ya que permite cuantificar la desviación de la distribución de puntos respecto a una superficie local idealmente plana. En el análisis de superficies pétreas escaneadas mediante tecnología LiDAR, como en el caso de los paramentos de granito analizados en este trabajo, *Surface Variation* permite localizar áreas donde la geometría presenta mayor complejidad o deterioro superficial.

3.3.3.7 Mean curvature

La curvatura media (*Mean Curvature*) es un descriptor geométrico que permite caracterizar la forma local de una superficie a partir de la nube de puntos. Este parámetro describe el grado de curvatura de la superficie en un punto determinado, considerando la curvatura en las diferentes direcciones de la superficie local.

En CloudCompare, la curvatura media se calcula a partir de la geometría de los puntos contenidos dentro de un vecindario definido por un radio de búsqueda, definidos en el **APARTADO 3.3.3.1**. A partir de este conjunto de puntos se ajusta localmente una superficie, lo que permite estimar las curvaturas principales de la superficie en ese punto. Estas curvaturas principales representan las curvaturas máxima y mínima que puede presentar la superficie en direcciones ortogonales entre sí.

Matemáticamente, la curvatura media H (m^{-1}) se define como el promedio de las dos curvaturas principales k_1 (m^{-1}) y k_2 (m^{-1}) (Ecuación 18):

$$H = \frac{k_1 + k_2}{2} \quad (\text{Ecuación 18})$$

donde k_1 y k_2 corresponden respectivamente a la curvatura máxima y mínima de la superficie en el punto considerado.

Este parámetro permite identificar cambios en la geometría local de la superficie. En regiones aproximadamente planas, los valores de curvatura media tienden a ser cercanos a cero, mientras que en zonas donde la superficie presenta deformaciones, bordes o cavidades, los valores aumentan debido a la mayor variación en la orientación de la superficie [33].

En el análisis de nubes de puntos obtenidas mediante escaneo láser terrestre, la curvatura media resulta especialmente útil para detectar irregularidades geométricas locales, como desconchados, pérdidas de material o bordes deteriorados. Por ello, este descriptor se emplea frecuentemente junto con otros parámetros geométricos (como la rugosidad o la planaridad) para caracterizar de forma más completa el estado superficial de elementos constructivos como los paramentos de granito analizados en este trabajo.

3.3.3.8 *1st order moment*

El momento de primer orden (*1st order moment*) es un descriptor geométrico local utilizado en CloudCompare para analizar la distribución espacial de los puntos dentro de un vecindario definido alrededor de cada punto de la nube. Este vecindario se establece mediante un radio de búsqueda determinado, y a partir de los puntos contenidos en él se evalúan sus propiedades geométricas.

Este parámetro mide el grado de asimetría en la distribución de los puntos respecto al centro del vecindario, evaluando el desplazamiento del centroide del conjunto de puntos respecto al punto analizado. En una superficie geoméricamente regular, la distribución de los puntos suele ser aproximadamente simétrica, por lo que el centroide del vecindario se encuentra próximo al punto central y el valor del momento de primer orden es reducido. Sin embargo, en presencia de discontinuidades geométricas, bordes o pérdidas de material, la distribución de puntos se vuelve asimétrica, lo que provoca un desplazamiento del centroide y un aumento del valor de este descriptor.

Desde un punto de vista matemático, el momento de primer orden se relaciona con el cálculo del centroide del vecindario. Si se consideran n puntos dentro del radio de búsqueda, con coordenadas (x_i, y_i, z_i) , el centroide C .

El momento de primer orden evalúa la relación entre este centroide y el punto central del vecindario, proporcionando una medida del desplazamiento o sesgo en la distribución espacial de los puntos [33]. Por ello, este descriptor resulta útil para identificar irregularidades locales en la geometría de la superficie, complementando la información proporcionada por otros parámetros geométricos como la rugosidad, la curvatura o la planaridad.

3.4 Evaluación de la distribución de la humedad

Con el objetivo de complementar el análisis geométrico realizado mediante tecnología LiDAR, se llevó a cabo una evaluación higrométrica del elemento constructivo objeto de estudio. La medición del contenido de humedad en materiales de construcción constituye una herramienta fundamental en el diagnóstico de patologías constructivas, ya que la presencia de agua en los materiales porosos puede favorecer procesos de degradación tales como cristalización de sales, alteraciones mineralógicas o pérdida de cohesión superficial.

En el contexto del presente trabajo, la evaluación higrométrica se plantea como una técnica de diagnóstico no destructiva destinada a identificar posibles variaciones espaciales en el contenido de humedad del paramento pétreo analizado. La caracterización de dichas variaciones permite detectar zonas potencialmente afectadas por procesos de deterioro y establecer posteriormente correlaciones con los resultados obtenidos mediante otras técnicas de análisis empleadas en este estudio.

3.4.1 Registro de las condiciones ambientales durante las mediciones

Durante la campaña de mediciones higrométricas se registraron también las condiciones ambientales existentes en el entorno del elemento constructivo analizado. Este registro resulta relevante, ya que la temperatura y la humedad relativa del aire pueden influir en los procesos de evaporación, condensación y absorción de agua por parte de los materiales porosos.

Para la medición de estos parámetros se utilizó un termohigrómetro digital Laserliner ClimaPilot, dispositivo portátil diseñado para la medición de temperatura ambiente y humedad relativa del aire. Como puede observarse en la **FIGURA 3-6**, el equipo dispone de un sensor integrado que permite registrar ambos parámetros de forma simultánea.



Figura 3-6 Termohigrómetro digital Laserliner ClimaPilot utilizado para la medición de temperatura ambiente y humedad relativa durante la campaña de inspección (Extraído de [34])

Durante la realización de las mediciones higrométricas del muro se registraron valores aproximados de 17,8 °C de temperatura ambiente y 67 % de humedad relativa. Cabe señalar que en fechas próximas a la campaña de medición se habían producido episodios de precipitación, circunstancia que pudo favorecer la presencia de humedad en el material analizado.

La consideración de estas condiciones ambientales permite contextualizar adecuadamente los valores obtenidos en las mediciones higrométricas y facilita la interpretación posterior de los resultados.

3.4.2 Equipamiento utilizado y fundamento físico de la medición

Las mediciones de humedad se realizaron utilizando un termohigrómetro Protimeter Surveymaster, instrumento portátil ampliamente empleado en inspección técnica de edificios para la detección de humedad en materiales de construcción. Como puede observarse en **FIGURA 3-7**, el dispositivo permite realizar mediciones mediante distintos modos de funcionamiento, siendo en este caso utilizado el modo “*measure*”, basado en el empleo de dos electrodos metálicos.



Figura 3-7 Protimeter Surveymaster empleado para la medición de humedad en el paramento estudiado (Extraído de [35])

El principio de funcionamiento del equipo se basa en la medición de la resistencia eléctrica del material. En materiales porosos como la piedra natural, la presencia de agua en los poros modifica significativamente las propiedades eléctricas del material. En particular, el agua contenida en los poros actúa como medio conductor, especialmente cuando contiene sales disueltas, lo que provoca un aumento de la conductividad eléctrica [36].

Desde el punto de vista físico, la relación entre la conductividad eléctrica (σ) y la resistencia eléctrica (R) puede expresarse mediante la relación (Ecuación 19):

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (\text{Ecuación 19})$$

donde:

$R(\Omega)$ es la resistencia eléctrica medida entre los electrodos, $\rho (\Omega \cdot m)$ es la resistividad eléctrica del material, $L (m)$ es la distancia entre los electrodos y $A (m^2)$ es el área efectiva de conducción

La resistividad eléctrica del material disminuye a medida que aumenta la cantidad de agua presente en su estructura porosa. En consecuencia, un aumento del contenido de humedad se traduce en una reducción de la resistencia eléctrica medida por el dispositivo.

El Protimeter Surveymaster determina la humedad del material a partir de la medición de su resistencia eléctrica, expresando el resultado mediante el parámetro %WME (Wood Moisture Equivalent). Este valor corresponde al contenido de humedad que presentaría una pieza de madera con una resistencia eléctrica equivalente a la del material analizado [37].

La escala del equipo está calibrada para madera. En particular, la escala “C” agrupa diferentes especies con propiedades eléctricas similares, como castaño, cedro rojo occidental, diversas variedades de pino, abeto o nogal europeo, permitiendo establecer comparaciones relativas entre distintas zonas de un mismo elemento constructivo [37]. En este contexto, valores más elevados de %WME se asocian a un mayor contenido de humedad.

No obstante, en materiales pétreos el parámetro %WME no representa un valor absoluto de humedad, sino un indicador comparativo del estado higrométrico del material. Por tanto, su utilidad radica en la identificación de zonas con mayor acumulación de humedad y, potencialmente, más susceptibles a procesos de degradación.

3.4.3 Protocolo de medición y distribución de los puntos de muestreo

El paramento analizado está constituido por un conjunto de sillares de piedra dispuestos de forma regular, tal como se comentó en el **APARTADO 3.2** y se observa en la **FIGURA 3-3**, todos ellos con una altura aproximada de 80 cm. Con el fin de obtener una caracterización espacial representativa del estado de humedad del muro, se estableció un protocolo de medición sistemático basado en múltiples puntos de lectura por cada sillar.

Cada sillar fue medido en cinco puntos distintos, siguiendo siempre el mismo orden de medición con el objetivo de garantizar la coherencia en el registro de datos. La disposición de los puntos fue la siguiente:

- esquina superior izquierda
- esquina superior derecha
- punto central del sillar
- esquina inferior izquierda
- esquina inferior derecha

Esta distribución puede observarse en la **FIGURA 3-8**, que permite capturar posibles gradientes verticales y horizontales de humedad en el material. En particular, las mediciones situadas en la parte inferior del sillar resultan especialmente relevantes para detectar fenómenos asociados a humedad ascendente por capilaridad, mientras que las mediciones centrales y superiores pueden reflejar procesos de condensación o infiltración.

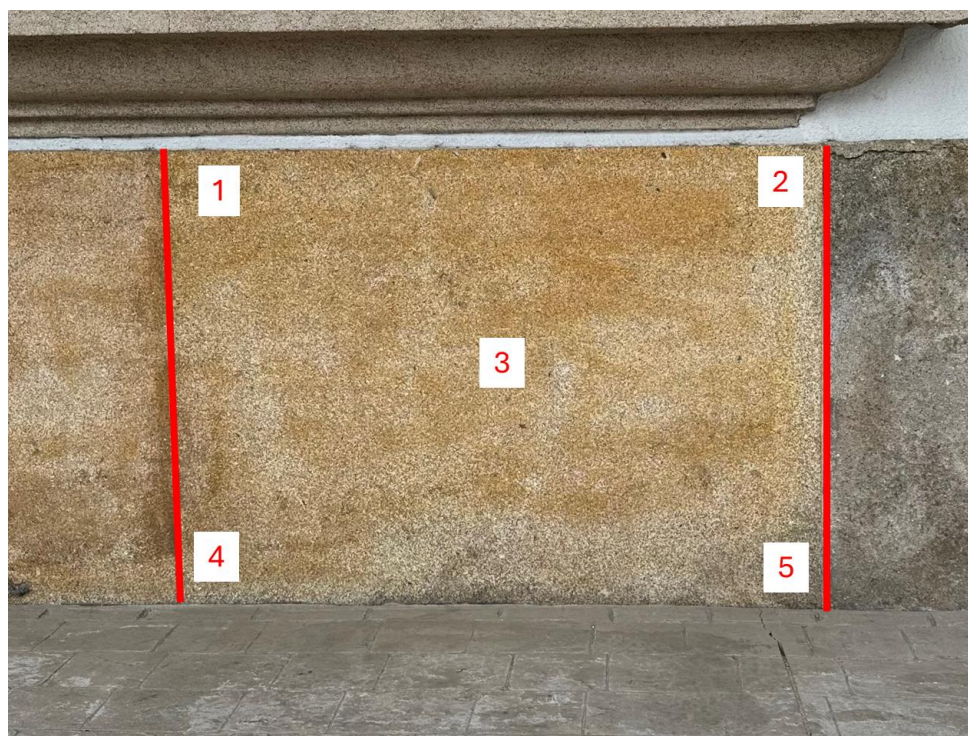


Figura 3-8 Esquema de la ubicación de los datos extraídos de cada sillar (Elaboración propia)

Las posiciones de medición se definieron dentro de un sistema de coordenadas local asociado al propio muro. En este sistema:

- $y = 0$ cm corresponde al contacto con el pavimento
- $y = 40$ cm corresponde aproximadamente al centro del sillar
- $y = 80$ cm corresponde a la parte superior del bloque

Durante cada medición, los electrodos del dispositivo se apoyaron sobre la superficie del material aplicando una ligera presión. En ningún caso se produjo una penetración significativa en el material, por lo que las mediciones pueden considerarse esencialmente superficiales. El dispositivo empleado permite medir hasta una profundidad de entre 19 y 25 mm de profundidad en función de la densidad del material.

Una vez colocado el dispositivo, se esperó el tiempo necesario hasta que el valor indicado por el equipo se estabilizara y dejara de oscilar, lo que garantizaba la obtención de una lectura coherente. Este procedimiento se repitió de forma sistemática para todos los puntos de medición.

En la **FIGURA 3-9** puede observarse un ejemplo del proceso de medición realizado durante el trabajo de campo.



Figura 3-9 Medición de humedad superficial en el paramento mediante higrómetro portátil durante la campaña de adquisición de datos (Elaboración propia)

En total se realizaron 345 mediciones, correspondientes a 69 sillares, con cinco puntos de lectura por cada bloque de piedra. Las mediciones se organizaron en cinco estaciones de análisis, definidas previamente durante el proceso de adquisición de datos LiDAR con el fin de mantener una correspondencia espacial entre las distintas técnicas empleadas en el estudio.

3.4.4 Organización y tratamiento de los datos de entrada

Una vez finalizada la campaña de mediciones, todos los valores obtenidos fueron registrados y organizados en una hoja de cálculo con el objetivo de preparar los datos para su posterior tratamiento.

Para cada estación se generó un conjunto de datos compuesto por tres variables principales:

- coordenada X, correspondiente a la posición horizontal de la medición dentro de la estación
- coordenada Y, correspondiente a la altura de la medición sobre el sillar
- valor de %WME, obtenido directamente del dispositivo de medición

Las coordenadas horizontales se calcularon a partir de las dimensiones reales de los sillares presentes en cada estación. Con el fin de evitar la coincidencia exacta de mediciones pertenecientes a sillares distintos, se introdujo una separación de aproximadamente 5 cm entre determinados puntos contiguos (los puntos de muestreo de las esquinas de los sillares), lo que permitió mejorar el comportamiento del proceso de interpolación posterior.

Este sistema de coordenadas permitió representar cada medición como un punto localizado dentro de un plano bidimensional correspondiente a la superficie del muro, facilitando posteriormente la generación de mapas de humedad. Destacar que el origen de coordenadas tanto en X como en Y es la esquina inferior izquierda en cada estación.

3.4.5 Generación del mapeo de humedad mediante interpolación espacial

Una vez organizados los datos de entrada, se procedió a la generación de mapas de humedad utilizando el software Surfer, herramienta ampliamente utilizada en análisis geoespacial para la interpolación y representación de datos distribuidos espacialmente.

El objetivo de este procedimiento consiste en transformar un conjunto de mediciones puntuales discretas en una superficie continua, permitiendo visualizar de forma clara cómo varía el contenido de humedad a lo largo del muro.

Para ello se empleó el método de interpolación *Kriging*, disponible dentro de las opciones de generación de malla del programa. Como puede observarse en la **FIGURA 3-10** Surfer permite seleccionar diferentes métodos de interpolación; en este caso se utilizó *Kriging* debido a su amplia aplicación en análisis geoespacial y a su capacidad para estimar valores en posiciones intermedias teniendo en cuenta la estructura espacial de los datos.

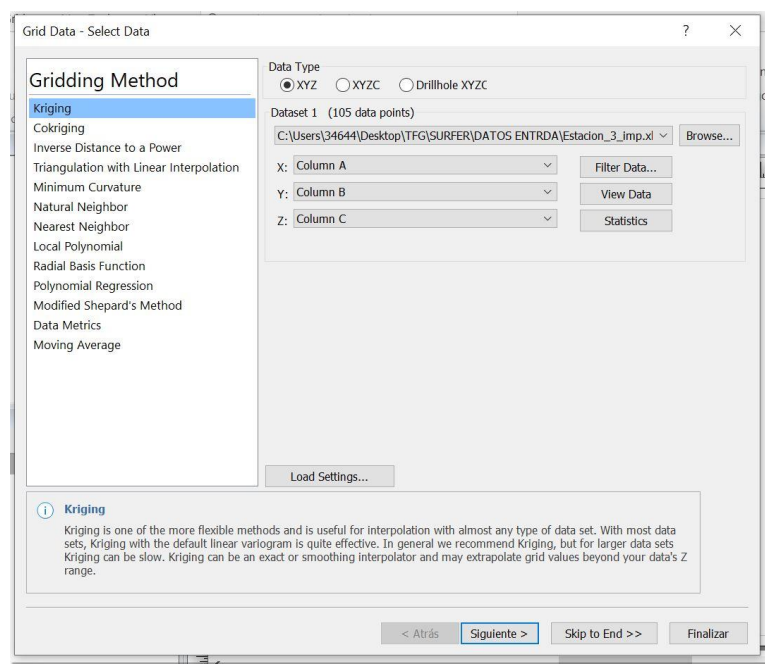


Figura 3-10 Interfaz de selección del método de interpolación *Kriging* en Surfer para la generación de superficies a partir de datos XYZ (Elaboración propia)

Desde el punto de vista matemático, el método *Kriging* se basa en la estimación de un valor desconocido como combinación lineal ponderada de los valores medidos en puntos cercanos. La estimación puede expresarse mediante la Ecuación (20):

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (\text{Ecuación 20})$$

donde:

$Z(x_0)$ es el valor estimado en el punto desconocido, $Z(x_i)$ son los valores observados en los puntos de medición, λ_i son los pesos asignados a cada medición y n es el número de puntos considerados.

Los pesos λ_i se determinan en función de la correlación espacial existente entre las mediciones, que se describe mediante una función estadística denominada variograma. Este variograma representa cómo varía la similitud entre los valores medidos en función de la distancia que separa los puntos.

Gracias a este enfoque, el método *Kriging* permite generar estimaciones espacialmente coherentes y reducir el error de interpolación, lo que lo convierte en una herramienta especialmente adecuada para representar fenómenos continuos como la distribución de humedad en un material.

El resultado final del proceso de interpolación se representa mediante un mapa de contornos coloreados en su interior, donde cada intervalo de color corresponde a un rango de valores de humedad. Un ejemplo de este tipo de representación puede observarse en la **FIGURA 3-11**, donde se muestra la distribución espacial de los valores de humedad obtenidos dentro del software Surfer.

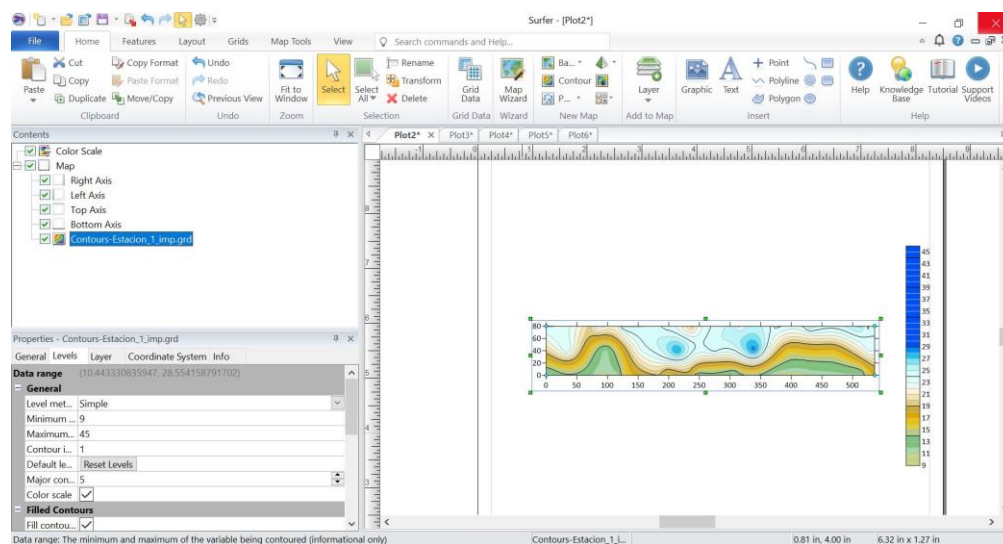


Figura 3-11 Generación del mapa de contornos de humedad mediante interpolación de los datos en el software Surfer (Elaboración propia)

3.5 Extracción de sales solubles y modelización espacial

La presencia de sales solubles constituye uno de los principales mecanismos de deterioro en materiales pétreos expuestos a ambientes húmedos o marinos. Estos compuestos pueden penetrar en la red porosa del material disueltos en agua y, posteriormente, cristalizar durante los procesos de evaporación. La cristalización de sales genera tensiones internas en los poros del material que pueden provocar la desagregación de la matriz mineral, pérdida de cohesión entre granos y aparición de eflorescencias visibles en superficie [37].

El fenómeno de deterioro asociado a la cristalización de sales puede explicarse mediante la denominada presión de cristalización, descrita por Correns. Cuando una disolución sobresaturada cristaliza en el interior de un poro, el crecimiento del cristal ejerce una presión sobre las paredes de este. [37] Esta presión puede expresarse mediante la Ecuación (21):

$$P = \frac{RT}{V_m} \ln \left(\frac{c}{c_s} \right) \quad (\text{Ecuación 21})$$

donde:

P (Pa) ($N \cdot m^{-2}$) es presión de cristalización, R ($J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$) es la constante universal de los gases, T (K) la temperatura absoluta, V_m ($m^3 \cdot mol^{-1}$) el volumen molar del cristal, c ($mol \cdot L^{-1}$) la concentración de la disolución y c_s ($mol \cdot L^{-1}$) la concentración de saturación

Cuando la presión generada por el crecimiento cristalino supera la resistencia mecánica del material pétreo, se producen procesos de microfracturación y desagregación superficial. Este mecanismo resulta especialmente relevante en entornos costeros, donde la presencia de aerosoles marinos favorece la acumulación de sales en los materiales de construcción [24].

Con el fin de evaluar la posible presencia de sales solubles en el paramento analizado y su relación con las anomalías detectadas mediante otras técnicas de diagnóstico, se incorporó al presente estudio un análisis específico de sales solubles.

3.5.1 Extracción de sales mediante papetas de celulosa

La obtención de muestras se realizó mediante la técnica de papetas de extracción, procedimiento ampliamente empleado en estudios de conservación de materiales pétreos debido a su carácter no invasivo y a su capacidad para extraer sales solubles presentes en los poros superficiales del material mediante difusión y advección.

Las papetas empleadas estaban compuestas por una mezcla de pulpa de celulosa y agua ultrapura. La celulosa actúa como material absorbente capaz de retener la disolución generada durante el proceso de extracción, mientras que el agua ultrapura actúa como disolvente para las sales presentes en el material. El uso de agua ultrapura resulta fundamental en este tipo de análisis, ya que evita la introducción de iones externos que podrían alterar la composición química de las muestras extraídas.

Durante el proceso de muestreo, la papeta, humedecida previamente con agua ultrapura para facilitar la disolución de las sales extraídas, se aplicó directamente sobre la superficie del material mediante un molde de 36 cm^2 aproximadamente que permitía mantener una cantidad de pasta medianamente constante entre las diferentes muestras. Como puede observarse en la **FIGURA 3-12**, este soporte delimitaba el área de contacto entre la papeta y la superficie del sillar, lo que contribuye a mejorar la reproducibilidad del proceso de extracción.

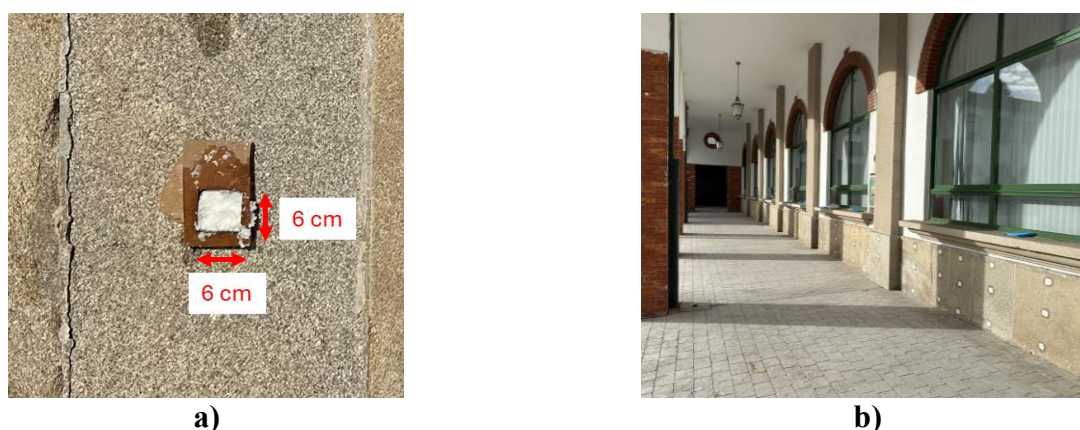


Figura 3-12 Proceso de aplicación de papetas de celulosa para la extracción de sales solubles: a) detalle del molde empleado para delimitar el área de contacto; b) vista general del paramento con las papetas colocadas durante el proceso de extracción (Elaboración propia)

Una vez aplicada, la papeta permanecía en contacto con el material durante aproximadamente una hora. Durante este tiempo, el agua contenida en la pasta penetra parcialmente en los poros superficiales de la piedra, disolviendo las sales presentes. Posteriormente, por difusión, la disolución resultante migra hacia la papeta, donde queda retenida en la matriz de celulosa.

Transcurrido el tiempo de contacto, las papetas fueron retiradas cuidadosamente para evitar su fragmentación y almacenadas en bolsas herméticas tipo *zip*, con el fin de garantizar su correcta conservación hasta su traslado al laboratorio.

3.5.2 Distribución espacial del muestreo

Con el objetivo de obtener una caracterización representativa de la distribución de sales en el paramento analizado, se estableció un protocolo de muestreo sistemático basado en múltiples puntos de extracción por cada sillar.

En cada bloque de piedra se realizaron tres extracciones, localizadas en las siguientes posiciones:

- zona superior del sillar
- zona central
- zona inferior

Esta distribución permite analizar posibles gradientes verticales en la concentración de sales, que pueden estar asociados a fenómenos de evaporación diferencial o a procesos de migración de soluciones salinas a través de la red porosa del material.

Las muestras se distribuyeron a lo largo de las cinco estaciones de análisis definidas previamente durante el estudio, coincidiendo con las estaciones utilizadas en el análisis LiDAR y en la evaluación higrométrica. De este modo se garantiza la correspondencia espacial entre las diferentes técnicas empleadas. En total se obtuvieron 204 muestras, correspondientes a tres extracciones por cada uno de los sillares analizados. Inicialmente se contemplaban 69 sillares; sin embargo, el número final se redujo a 68, ya que los sillares 8 y 9 de la Estación 1 se consideraron de forma conjunta. Esta decisión se adoptó por motivos presupuestarios y debido al reducido tamaño del último sillar, lo que hacía viable su agrupación con el anterior sin pérdida significativa de representatividad (Para una mejor comprensión de lo anteriormente expuesto, se remite a la **FIGURA 3-3**, donde se muestra un esquema a escala de la Estación 1).

3.5.3 Preparación de las muestras en laboratorio

Una vez trasladadas al laboratorio de investigación del Centro Universitario de la Defensa, las muestras fueron sometidas a un proceso de preparación destinado a extraer las sales presentes en las papetas y obtener una disolución adecuada para su posterior análisis químico.

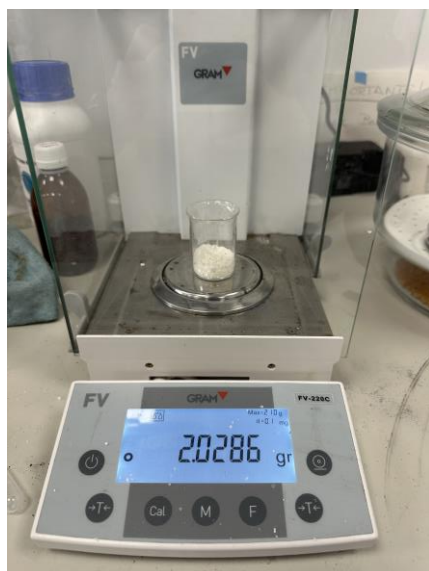
En primer lugar, las muestras fueron trasladadas al laboratorio de mecánica donde fueron introducidas en una estufa de laboratorio a 50 °C durante 48 horas, con el objetivo de eliminar la humedad residual presente en las papetas y estabilizar el material antes de su tratamiento posterior (**FIGURA 3-13**).



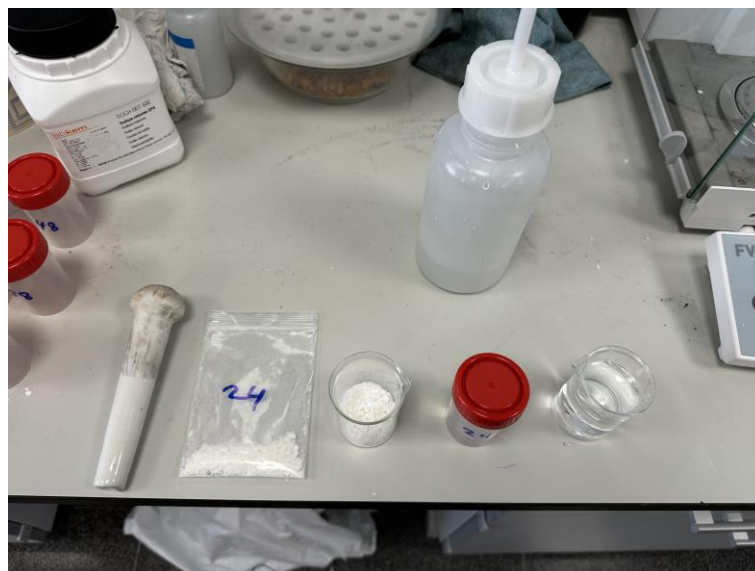
Figura 3-13 Muestras en la estufa de laboratorio a 50°C para la eliminación de humedad residual (Elaboración propia)

Posteriormente, las papetas secas se trasladaron al laboratorio de química donde fueron trituradas hasta obtener un material pulverulento, lo que facilita la liberación de las sales retenidas en la matriz de celulosa.

A continuación, se pesaron 2 g de cada muestra triturada (**FIGURA 3-14**), que fueron introducidos en recipientes de laboratorio junto con 50 ml de agua ultrapura. Esta relación masa-volumen permite obtener una disolución suficientemente diluida para facilitar la disolución completa de las sales.



a)



b)

Figura 3-14 Procedimiento de preparación de muestras para el análisis de sales solubles: a) pesada de la muestra con balanza de precisión; b) preparación de la disolución para su posterior análisis (Elaboración propia)

Las muestras fueron colocadas en un agitador orbital durante aproximadamente dos horas, proceso que favorece la transferencia de los iones presentes en la muestra hacia la disolución acuosa.

Una vez finalizado el proceso de agitación, la suspensión obtenida fue sometida a un proceso de filtración al vacío, utilizando papel de filtro y un sistema de vacío conectado a una trompa de laboratorio. Como puede observarse en la **FIGURA 3-15**, este procedimiento permite separar las partículas sólidas presentes en la muestra, obteniendo finalmente una disolución líquida que contiene exclusivamente las sales previamente extraídas.



Figura 3-15 Dispositivo de filtración al vacío utilizado para la separación de las partículas sólidas y la obtención de la disolución que contiene las sales extraídas de la muestra (Elaboración propia)

La disolución obtenida fue posteriormente almacenada en tubos de muestra y conservada en refrigeración hasta su envío al laboratorio encargado de realizar el análisis, es importante remarcar que la conservación de las muestras en un ambiente refrigerado evita la proliferación de microorganismos.

Durante el proceso de preparación de las muestras fue necesario descartar parte de ellas por motivos presupuestarios. Con el fin de mantener una distribución espacial representativa de los puntos analizados, se optó por seleccionar de forma alterna las muestras restantes, generando una disposición similar a un patrón en tresbolillo. Este criterio de selección permite conservar una cobertura homogénea de la superficie estudiada y mejora la representatividad espacial de los datos empleados posteriormente en los procesos de interpolación y elaboración de los mapas de distribución de sales. Remarcar que durante el tratamiento de las muestras se tuvieron que descartar una serie de muestras por problemas técnicos que obligó a reconfigurar el patrón de tresbolillo, que se reanudó a partir de la muestra 51 pero que se ve interrumpido entre la muestras 38 y la 51, es decir entre los sillares 7 y 10 de la Estación 2 donde se adoptó una distribución diagonal. A continuación, en la **FIGURA 3-16** se puede observar tanto aquellas muestras que fueron tomadas como aquellas que finalmente fueron enviadas a analizar.

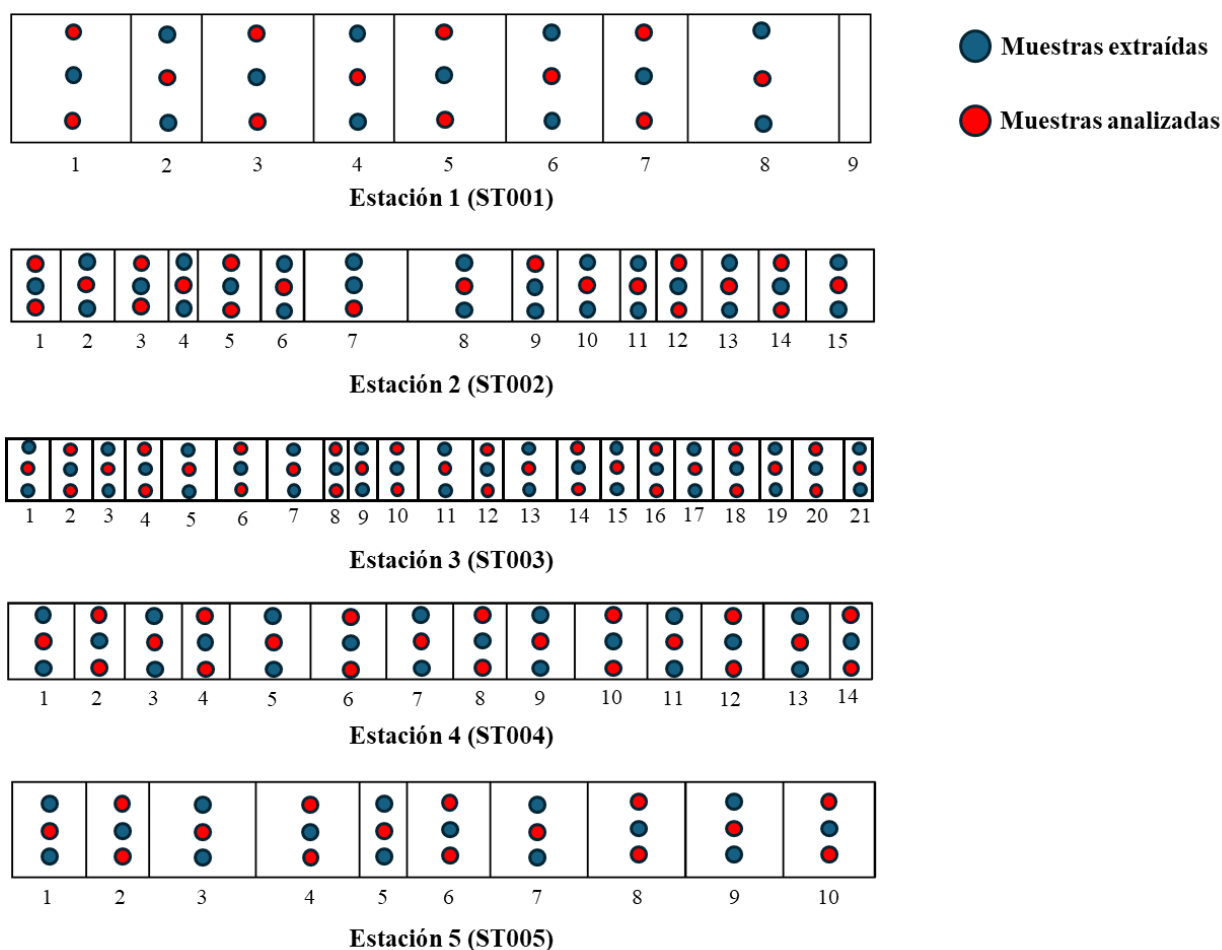


Figura 3-16 Esquema de la distribución de las muestras extraídas y analizadas en las distintas estaciones
(Elaboración propia)

Una vez finalizada la preparación de las muestras, estas fueron enviadas al Centro de Apoyo Científico-Tecnológico a la Investigación (CACTI) de la Universidad de Vigo, donde se determinó la concentración de cloruros, nitratos, sulfatos y fosfatos mediante cromatografía iónica de alta resolución, técnica analítica que permite separar y cuantificar iones disueltos en una solución a partir de su diferente interacción con una columna de intercambio iónico.

3.5.4 Organización de los datos y generación de mapas de distribución de sales

Una vez obtenidos los resultados analíticos correspondientes a las muestras enviadas al laboratorio, se procedió a la organización y tratamiento de los datos con el objetivo de representar espacialmente la distribución de sales a lo largo del paramento analizado.

Para ello se elaboró una hoja de cálculo en la que se recopilaban los valores de concentración obtenidos para cada uno de los iones analizados (cloruros, nitratos, sulfatos y fosfatos). De forma análoga al procedimiento descrito previamente para el mapeo de humedad, cada punto de muestreo fue asociado a un sistema de coordenadas bidimensional definido sobre la superficie del muro. En este sistema, se usa la misma metodología que en el mapeo de humedad. (**FIGURA 3-3**).

Este procedimiento permitió asignar a cada muestra una localización espacial concreta dentro del plano del paramento, generando un conjunto de datos estructurado del tipo X–Y–Z, donde las variables

X e Y corresponden a la posición de la muestra y la variable Z representa la concentración del ion analizado. Los resultados analíticos proporcionados por el laboratorio se expresaban inicialmente en mg/L, por lo que fue necesario convertirlos a porcentaje en masa respecto a la muestra sólida. Para ello se calculó la masa total de ion presente en el volumen de extracción (50 mL) a partir de la concentración medida y posteriormente se relacionó con la masa de muestra empleada en la extracción (2 g), expresando finalmente el resultado en porcentaje. Matemáticamente, esta conversión puede expresarse como (Ecuación 22):

$$Z(\%) = \frac{C \cdot V}{1000 \cdot m} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 22})$$

donde C (mg/L) es la concentración obtenida mediante cromatografía iónica, V (mL) el volumen de disolución empleado en la extracción y m (g) la masa de muestra analizada.

Una vez organizada la información en este formato, los datos fueron introducidos en el software Surfer, donde se aplicó nuevamente el método de interpolación *Kriging* para generar superficies continuas de distribución de sales a partir de las mediciones puntuales disponibles. Este procedimiento permite estimar valores intermedios entre los puntos de muestreo, facilitando la representación espacial de la concentración de cada especie iónica.

Como resultado de este proceso se obtuvieron mapas de distribución independientes para cada uno de los iones analizados (cloruro, nitrato, sulfato y fosfato), representados mediante mapas de contorno coloreados en su interior que permiten visualizar de forma intuitiva la variación espacial de la concentración de sales a lo largo del elemento constructivo estudiado.

3.6 Evaluación mediante termografía infrarroja

En el presente trabajo las capturas termográficas se realizaron mediante una cámara FLIR E85, con resolución térmica de 384×288 píxeles (ancho x alto) y sensibilidad térmica inferior a $0,03^\circ\text{C}$, lo que permite detectar variaciones de temperatura muy pequeñas en la superficie del material. En la **FIGURA 3-17** se muestra la cámara térmica empleada y en el **ANEXO IV: ESPECIFICACIONES FLIR E85** sus especificaciones.



Figura 3-17 Cámara FLIR E85 (Extraído de [38])

Durante la adquisición de imágenes se configuraron los siguientes parámetros principales, aunque no afectan a los resultados al haberse realizado un análisis cualitativo:

- Emisividad: 0,95
- Temperatura reflejada aparente: 20 °C
- Distancia aproximada al objeto: 1,5 m

Las mediciones se realizaron manteniendo la cámara lo más perpendicular posible al plano del muro, con el fin de minimizar errores geométricos en la medición radiométrica, es decir la medición de la temperatura de cada píxel en grados centígrados.

Las condiciones ambientales durante la campaña de adquisición fueron registradas mediante un termohigrómetro digital Laserliner ClimaPilot (**FIGURA 3-6**), obteniéndose valores aproximados de 15°C y 69% de humedad el primer día de la campaña y 9°C de temperatura ambiente y 68 % de humedad relativa el segundo.

3.6.1 Inspección termográfica de zonas de interés (termografía activa)

La primera fase de la inspección tuvo como objetivo analizar zonas puntuales del paramento que previamente habían sido identificadas como potencialmente problemáticas mediante escaneado láser, mapeo de humedad y extracción de sales. Entre estas zonas se incluían áreas con elevados valores de humedad detectados en el mapeo de humedad, regiones donde el análisis geométrico de las nubes de puntos mostraba anomalías superficiales, así como puntos en los que visualmente se apreciaban procesos de alteración o desprendimientos.

Para potenciar el contraste térmico en estas zonas, para realzar la diferencia de la huella térmica patológica frente a la huella térmica sana, se empleó un procedimiento de termografía activa, consistente en aplicar una fuente externa de calor sobre la superficie del material. En este caso se utilizó un foco halógeno de 500 W (**FIGURA 3-18**), que permitió inducir un calentamiento localizado del material durante intervalos controlados de tiempo.



Figura 3-18 Foco halógeno 500W utilizado en termografía activa (Extraído de [39])

Tras la excitación térmica se realizaron capturas termográficas con la cámara FLIR, registrando la distribución de temperaturas en la zonas analizadas. Este procedimiento permite detectar diferencias en

el comportamiento térmico del material, ya que zonas con distinta composición, humedad o grado de alteración presentan diferentes capacidades de almacenamiento y disipación de calor.

Las imágenes obtenidas fueron posteriormente exportadas al software FLIR Tools, donde se realizó su análisis radiométrico. Con el fin de permitir una comparación visual coherente entre las distintas imágenes, se procedió a normalizar la escala térmica, estableciendo los mismos valores de temperatura mínima y máxima en todas las capturas analizadas. Este procedimiento evita que la escala de colores se adapte automáticamente a cada imagen y garantiza que las diferencias cromáticas observadas correspondan realmente a variaciones térmicas entre las distintas zonas estudiadas.

3.6.1 Captura termográfica global del paramento (termografía pasiva)

En una segunda jornada de trabajo se llevó a cabo una campaña de adquisición destinada a obtener una visión térmica global comportamiento natural del paramento completo. Para ello se optó por realizar las capturas al amanecer, momento en el que el gradiente térmico natural entre el material pétreo y el ambiente suele favorecer la detección de anomalías térmicas.

Debido a la distancia de trabajo empleada (aproximadamente 1,5 m), no era posible obtener en una sola imagen la totalidad del tramo analizado manteniendo al mismo tiempo un nivel de resolución adecuado. Por este motivo se optó por realizar una serie de capturas termográficas parciales donde cada una correspondiente a un tramo reducido del paramento. Con el objetivo de facilitar posteriormente la identificación y unión de estas imágenes, se colocaron separadores temporales de papel de aluminio entre capturas consecutivas. Este material presenta una respuesta térmica claramente diferenciada en la imagen infrarroja, lo que permitió delimitar visualmente cada una de las secciones fotografiadas durante el proceso de reconstrucción posterior. En la **FIGURA 3-19** se puede observar el proceso de captura de las imágenes termográficas de esta fase.



Figura 3-19 Captura de imágenes termográficas del paramento mediante termografía pasiva (Elaboración propia)

Una vez obtenidas todas las imágenes, estas fueron nuevamente procesadas en el software FLIR Tools, donde se ajustaron de forma uniforme los valores de temperatura mínima y máxima para todas las capturas. Posteriormente, las imágenes individuales fueron ensambladas manualmente para generar una representación térmica continua aproximada de cada estación analizada.

Un ejemplo de este procedimiento de reconstrucción puede observarse en la **FIGURA 3-20**, donde se muestra la composición termográfica correspondiente a la Estación 1 (ST001) del paramento. En la parte inferior se incluyen las fotografías visibles de los mismos sillares, lo que permite comparar visualmente el estado superficial del material con su comportamiento térmico, así como evidenciar la utilidad de esta técnica en la detección de patologías constructivas.

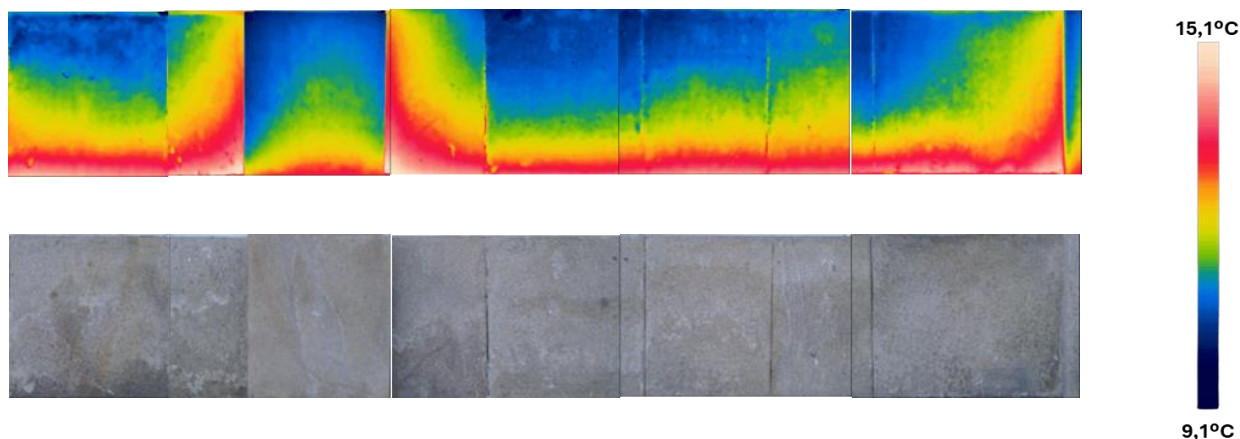


Figura 3-20 Composición termográfica de la Estación 1 (ST001) obtenida mediante la reconstrucción de capturas individuales en termografía pasiva, junto con la imagen visible correspondiente (Elaboración propia)

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de las diferentes técnicas de inspección empleadas en el desarrollo del trabajo. A partir de dichos resultados se realiza un análisis del estado del elemento constructivo estudiado, interpretando la información proporcionada por cada metodología aplicada.

En primer lugar, se exponen los resultados derivados de cada técnica de forma individual. Posteriormente, se lleva a cabo una interpretación conjunta de los datos obtenidos, con el fin de identificar posibles relaciones entre las distintas técnicas y obtener una visión global del estado de conservación del paramento.

4.1 Resultados de las técnicas de inspección aplicadas

4.1.1 *Análisis geométrico de la nube de puntos (LiDAR)*

4.1.1.1 *Estación 1 (ST001)*

En este apartado se discutirán los resultados obtenidos mediante el procesado de la nube de puntos correspondiente a la Estación 1 (ST001). En la **TABLA 4-1** se presentan los diferentes parámetros obtenidos a partir del procesamiento de la nube de puntos (con radio de vecindad $r = 1$ cm) correspondiente a la Estación 1 (ST001). En ella se incluyen las representaciones de los distintos parámetros analizados en el paramento. Posteriormente en la **TABLA 4-2** se muestran las escalas cromáticas correspondientes a cada parámetro analizado.

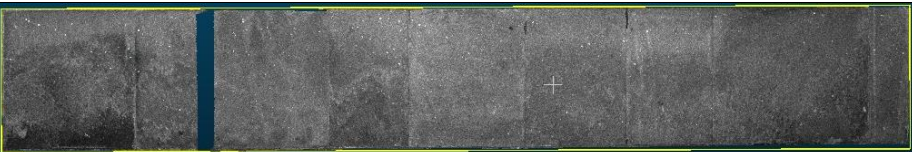
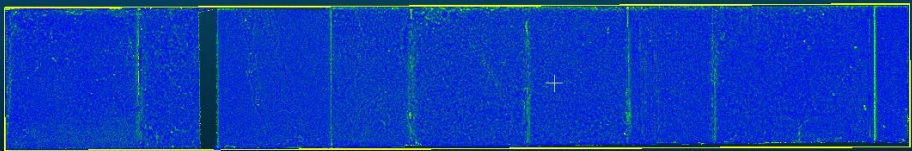
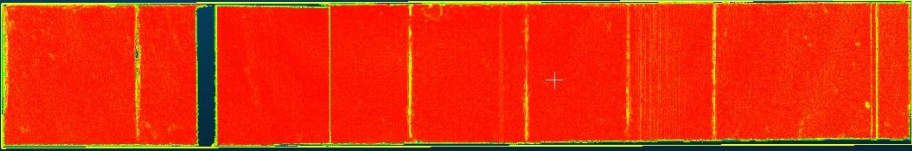
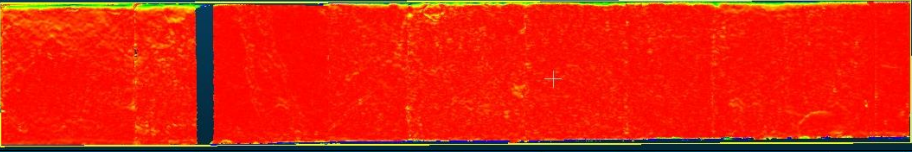
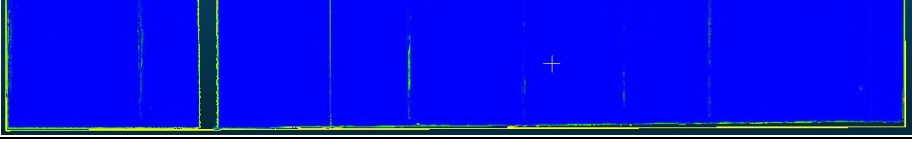
Parámetro	Imagen								
<i>Referencia</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>RGB</i>									
<i>Intensity</i>									
<i>Roughness</i>									
<i>Planarity</i>									
<i>Verticality</i>									
<i>Mean Curvature</i>									
<i>1st order moment</i>									

Tabla 4-1 Parámetros visualizados de la nube de puntos LiDAR (RGB, intensidad, rugosidad, planaridad, verticalidad, curvatura media y momento de primer orden) correspondientes a la Estación 1 (ST001) y radio de vecindad de 1cm (Elaboración propia)

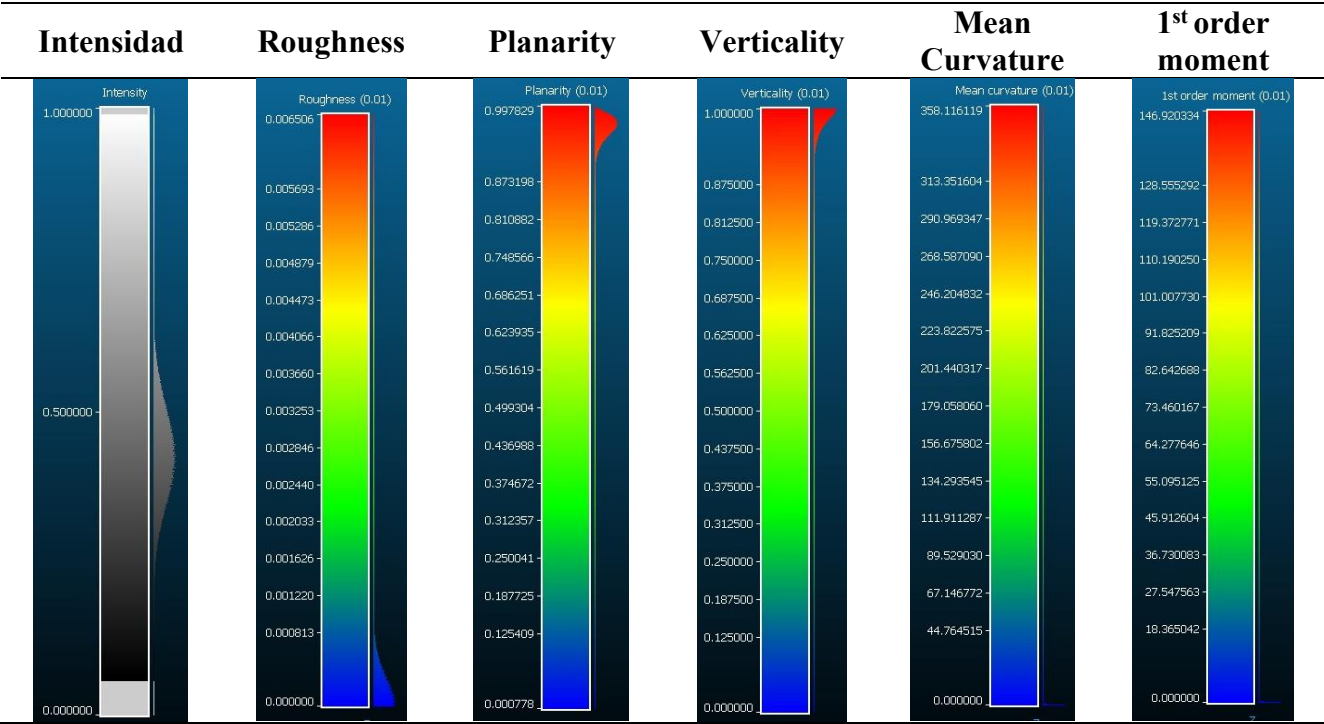


Tabla 4-2 Escalas cromáticas de los parámetros geométricos obtenidos a partir del análisis de la nube de puntos LiDAR de la Estación 1 (ST001) (Elaboración propia)

La visualización en color real (RGB) permite identificar la disposición de los bloques de granito y la textura superficial del material. Se observan ligeras variaciones cromáticas y pequeñas irregularidades propias del envejecimiento superficial del granito expuesto al ambiente exterior.

El mapa de intensidad presenta variaciones moderadas a lo largo de la superficie, que pueden estar relacionadas con cambios en la textura del material o en las condiciones superficiales del paramento. No obstante, no se aprecian contrastes marcados que indiquen alteraciones significativas del material.

El parámetro de rugosidad muestra valores bajos en la mayor parte de la superficie, lo que indica una geometría relativamente regular. Sin embargo, se detectan pequeñas zonas puntuales con valores algo superiores que podrían corresponder a irregularidades superficiales o ligeros procesos de desgaste del material.

Los resultados de planaridad muestran valores elevados en prácticamente todo el paramento, lo que confirma que la superficie mantiene un comportamiento geométrico próximo al plano. Las variaciones observadas se asocian principalmente a irregularidades locales del material.

El análisis de verticalidad presenta valores próximos a la orientación vertical dominante del paramento, lo que confirma la correcta alineación del elemento constructivo.

Por su parte, la curvatura media y la variación de superficie muestran valores bajos y relativamente homogéneos, indicando la ausencia de deformaciones significativas o pérdidas de material de entidad a la escala analizada.

Finalmente, el parámetro *1st order moment* presenta una distribución bastante uniforme, lo que refuerza la interpretación de una geometría globalmente estable.

En conjunto, los resultados obtenidos para la estación ST001 indican que el paramento presenta una geometría globalmente regular, sin evidencias claras de deterioro geométrico significativo, aunque se

identifican pequeñas irregularidades superficiales compatibles con procesos leves de desgaste del material (sillares 2 y 5).

4.1.1.2 Estación 2 (ST002)

En la **TABLA 4-3** se puede observar las capturas (con radio de vecindad $r = 1$ cm) correspondientes a la Estación 2 (ST002) del paramento. De manera análoga a la Estación 1 la tabla se divide en el parámetro analizado y a la derecha su correspondiente imagen. Posteriormente en la **TABLA 4-4** se muestran las escalas cromáticas correspondientes a cada parámetro analizado.

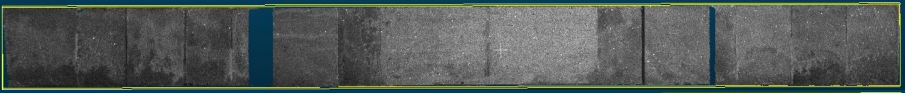
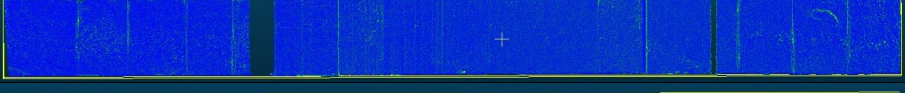
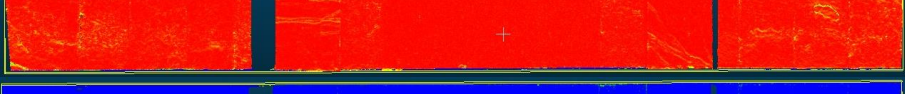
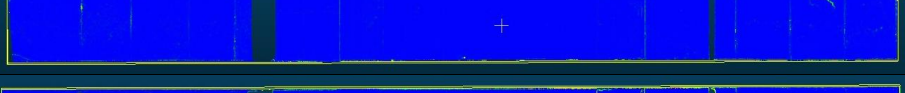
Parámetro	Imagen														
Referencia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RGB															
Intensity															
Roughness															
Planarity															
Verticality															
Mean curvature															
Surface variation															
1 st order moment															

Tabla 4-3 Parámetros visualizados de la nube de puntos LiDAR (RGB, intensidad, rugosidad, planaridad, verticalidad, curvatura media, variación de superficie y momento de primer orden) correspondientes a la Estación 2 (ST002) y radio de vecindad de 1cm (Elaboración propia)

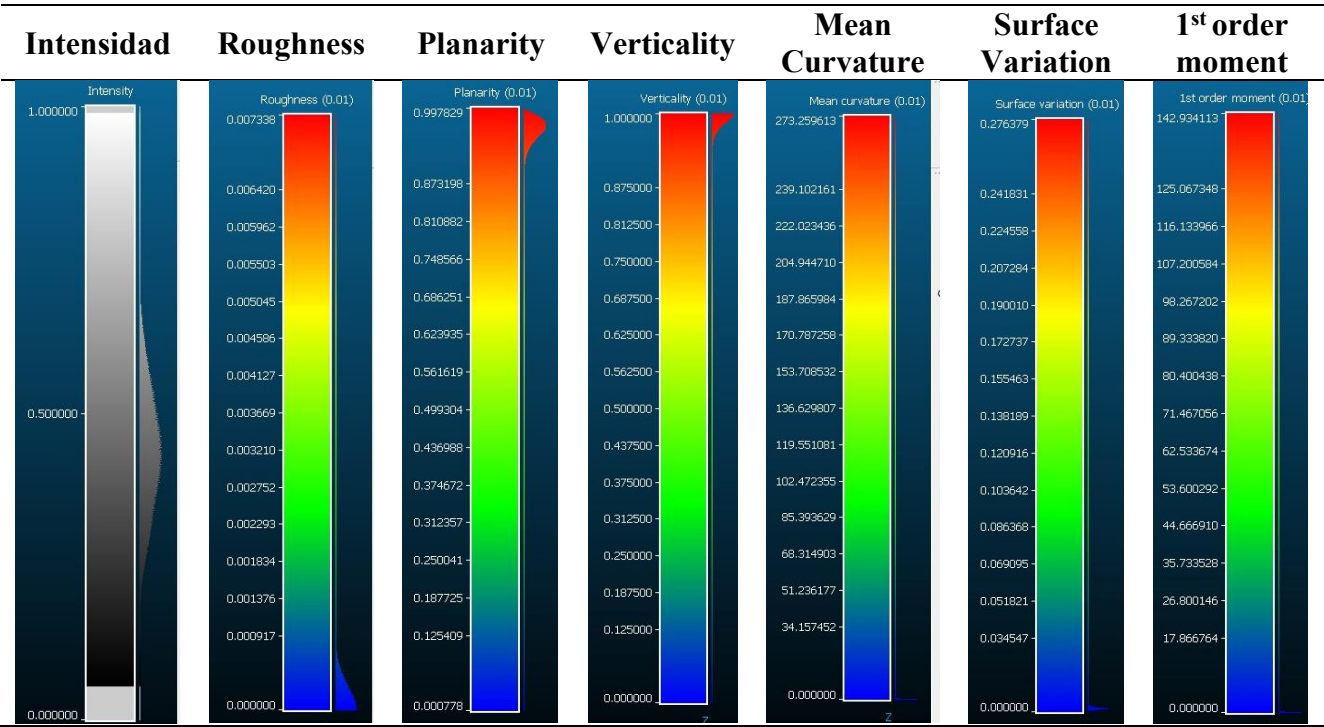


Tabla 4-4 Escalas cromáticas de los parámetros geométricos obtenidos a partir del análisis de la nube de puntos LiDAR de la Estación 2 (ST002) (Elaboración propia)

La visualización en color real (RGB) permite distinguir claramente los bloques de granito que componen el paramento. En comparación con la estación ST001, se observan mayores variaciones cromáticas entre diferentes bloques, así como la presencia de manchas superficiales y zonas con tonalidades más oscuras, que podrían estar relacionadas con procesos de alteración superficial o acumulación de suciedad derivados de la exposición ambiental.

El mapa de intensidad presenta un contraste algo más marcado que en la estación anterior, especialmente entre distintos bloques del paramento. Estas diferencias pueden estar asociadas a variaciones en las propiedades superficiales del material, como cambios en la textura, el grado de alteración o las condiciones de humedad presentes en la superficie.

En el caso de la rugosidad, los valores continúan siendo en general reducidos, lo que indica que la superficie mantiene una geometría relativamente regular. No obstante, se identifican algunas zonas puntuales con valores algo superiores a los observados en ST001, particularmente en los sillares 15, 14 y la parte superior del 12.

Los parámetros de planaridad y verticalidad muestra valores elevados en la mayor parte del paramento, confirmando que la superficie conserva un comportamiento geométrico próximo al plano y próximos a la orientación vertical. Nuevamente se puede observar claramente como los sillares comentados anteriormente vuelven a destacar en el análisis de estos parámetros, lo que confirma que hay variaciones superficiales en dichas zonas.

Por su parte, los mapas de curvatura media y variación de superficie continúan mostrando valores bajos y bastante homogéneos, lo que indica que, al igual que en la estación anterior, no se detectan deformaciones geométricas significativas ni pérdidas de material de gran entidad.

Finalmente, el parámetro *1st order moment* presenta una distribución relativamente uniforme en el conjunto del paramento, reforzando la interpretación de una geometría globalmente estable.

En conjunto, los resultados obtenidos para la estación ST002 muestran un comportamiento geométrico similar al observado en ST001, aunque con una mayor heterogeneidad superficial entre bloques y la presencia de algunas irregularidades puntuales que podrían estar asociadas a procesos leves de alteración o desgaste del material pétreo.

4.1.1.3 Estación 3 (ST003)

Se presenta a continuación, de manera análoga a las anteriores estaciones, en la **TABLA 4-5** las capturas correspondientes a la Estación 3 (ST003). Posteriormente en la **TABLA 4-6** se muestran las escalas cromáticas correspondientes a cada parámetro analizado.

Parámetro	Imagen																				
Referencia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
RGB																					
Intensity																					
Roughness																					
Planarity																					
Verticality																					
Mean curvature																					
Surface variation																					
1 st order moment																					

Tabla 4-5 Parámetros visualizados de la nube de puntos LiDAR (RGB, intensidad, rugosidad, planaridad, verticalidad, curvatura media, variación de superficie y momento de primer orden) correspondientes a la Estación 3 (ST003) y radio de vecindad de 1cm (Elaboración propia)

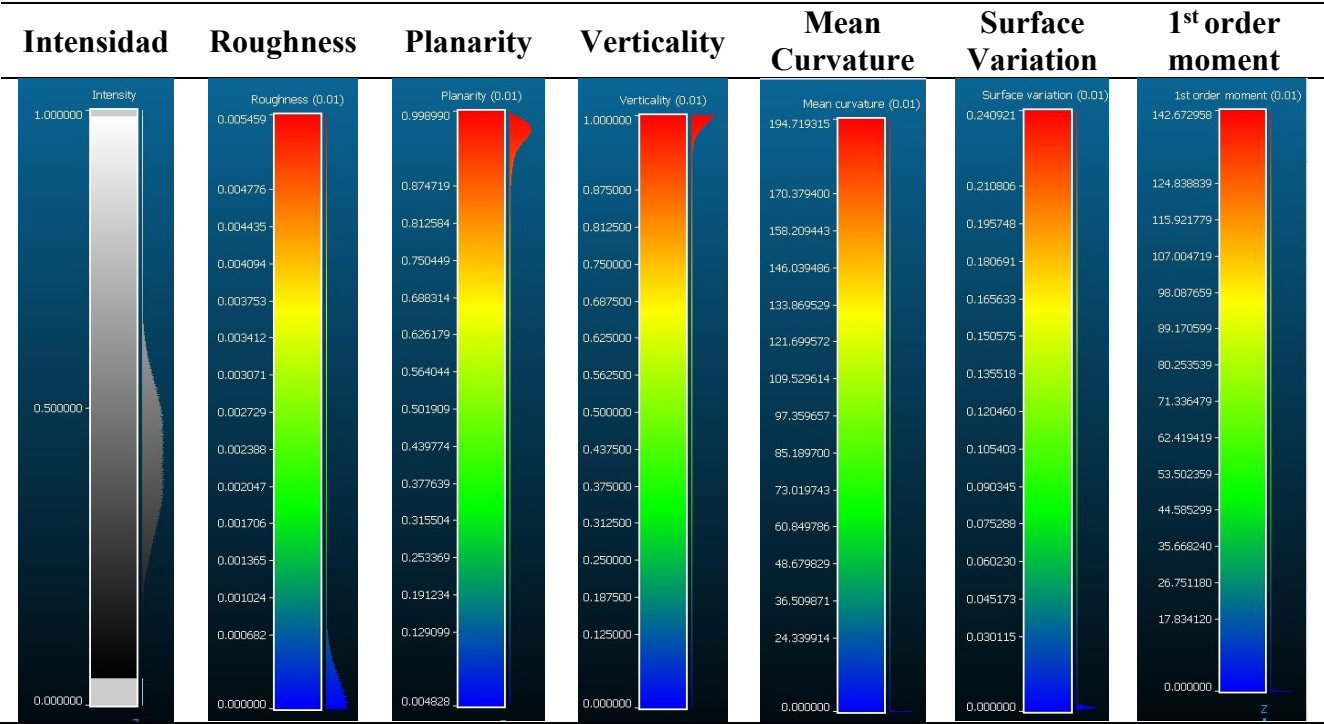


Tabla 4-6 Escalas cromáticas de los parámetros geométricos obtenidos a partir del análisis de la nube de puntos LiDAR de la Estación 3 (ST003) (Elaboración propia)

En la representación RGB se observa una superficie relativamente homogénea, en la que se distinguen con claridad los distintos sillares y sus juntas. A diferencia de lo observado en alguna de las estaciones anteriores, no se aprecian contrastes cromáticos especialmente acusados, lo que sugiere una alteración visual limitada del material en esta zona.

El mapa de intensidad muestra una distribución bastante uniforme a lo largo del paramento, con ligeras variaciones entre algunos bloques y en las proximidades de las juntas. Este comportamiento es similar al observado en estaciones previas, donde las principales diferencias se concentraban igualmente en las transiciones entre sillares.

En el caso de la rugosidad, los valores se mantienen generalmente bajos, aunque aparecen incrementos puntuales asociados principalmente a las juntas verticales y a pequeñas irregularidades superficiales del material, esto último es notable en el sillar 18 donde se aprecia un pico, posiblemente debido a un desprendimiento del material. Por otro lado, en la zona central de la sección se observa también un repunte de tonalidades verdes, este patrón también se repite en las estaciones anteriormente analizadas, donde se observa un comportamiento correcto y focos localizados donde hay pequeños indicios de desprendimiento, pero menores a los sillares mencionados.

Los parámetros de planaridad y verticalidad presentan valores elevados y bastante homogéneos en la mayor parte de la superficie, lo que indica que los sillares mantienen una geometría regular y una orientación estable del paramento. Las ligeras variaciones de estos parámetros vuelven a localizarse principalmente en las juntas y en las zonas comentadas anteriormente.

Tanto la curvatura media como la variación superficial muestran valores reducidos en la mayor parte de los bloques, concentrándose las diferencias en zonas puntuales que coinciden con juntas o irregularidades locales del material.

Por último, el momento de primer orden presenta una distribución bastante uniforme a lo largo del paramento, sin contrastes especialmente marcados entre sillares, manteniendo un comportamiento similar al observado en las estaciones anteriores.

4.1.1.4 Estacion 4 (ST004)

En la **TABLA 4-7** se presentan las capturas correspondientes a la Estación 4 (ST004), siguiendo la misma metodología. Posteriormente en la **TABLA 4-8** se muestran las escalas cromáticas correspondientes a cada parámetro analizado.

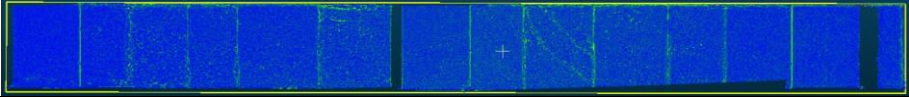
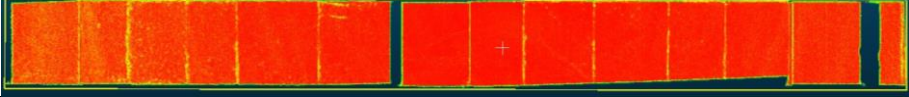
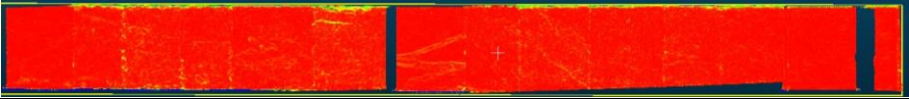
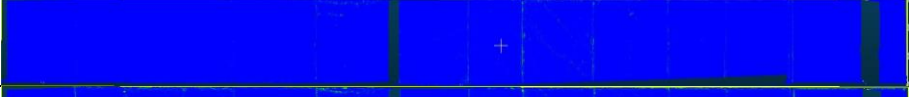
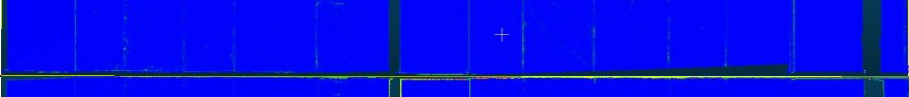
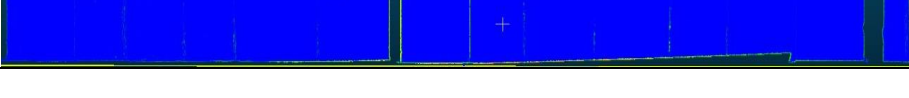
Parámetro	Imagen													
Referencia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
RGB														
Intensity														
Roughness														
Planarity														
Verticality														
Mean curvature														
Surface variation														
1 st order moment														

Tabla 4-7 Parámetros visualizados de la nube de puntos LiDAR (RGB, intensidad, rugosidad, planaridad, verticalidad, curvatura media, variación de superficie y momento de primer orden) correspondientes a la Estación 4 (ST004) y radio de vecindad de 1cm (Elaboración propia)

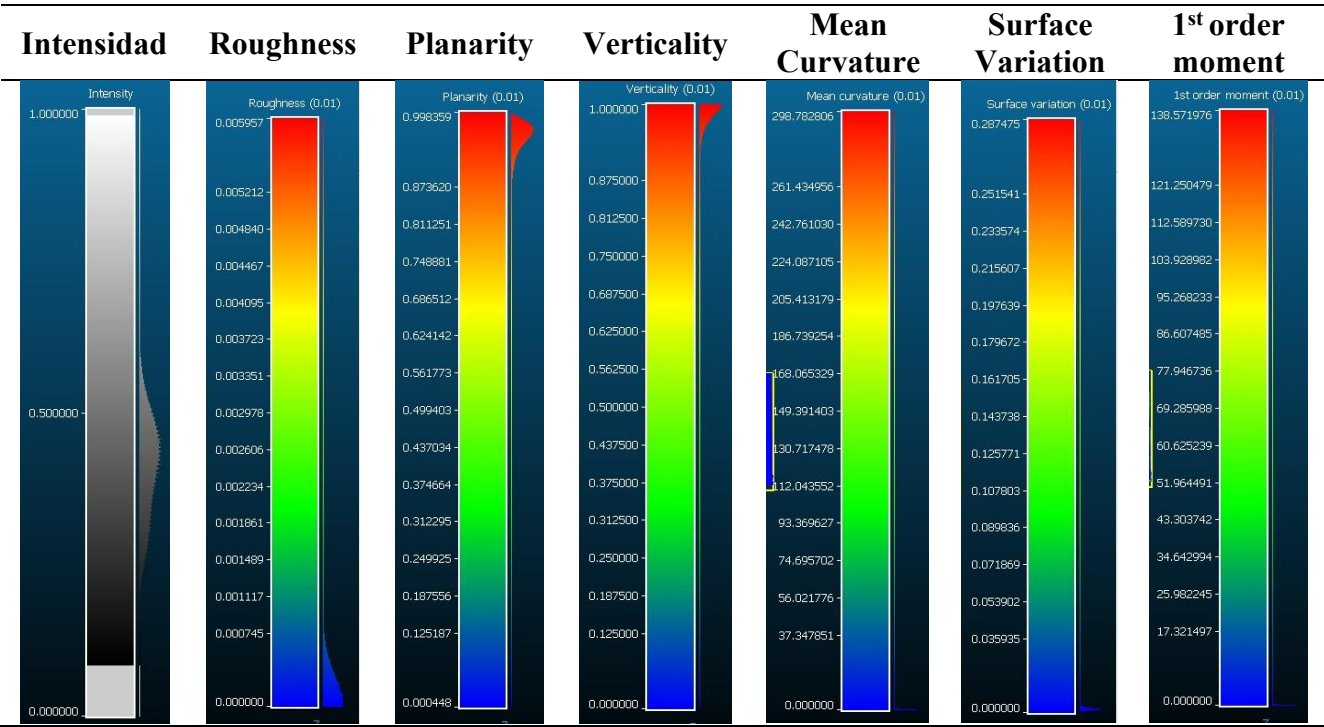


Tabla 4-8 Escalas cromáticas de los parámetros geométricos obtenidos a partir del análisis de la nube de puntos LiDAR de la Estación 4 (ST004) (Elaboración propia)

La representación RGB muestra un paramento relativamente homogéneo, aunque se aprecian algunas variaciones cromáticas entre sillares y ciertas marcas superficiales, especialmente en la parte central derecha. Estas diferencias son algo más visibles que en la Estación 3, aunque siguen sin indicar alteraciones superficiales muy marcadas.

En el mapa de intensidad se observa una distribución bastante uniforme, con ligeros contrastes asociados principalmente a las juntas entre bloques. Este comportamiento es coherente con el patrón identificado en las estaciones anteriores, donde las transiciones entre sillares concentran la mayor parte de las variaciones.

La rugosidad presenta valores generalmente bajos, si bien se detectan incrementos localizados en las juntas como viene siendo habitual y en algunas zonas puntuales, concretamente en este caso se observa dos estrías claramente diferenciadas en el sillar 9 así como pérdida de material en la parte superior del sillar 6. Este patrón coincide con lo observado previamente, donde las discontinuidades geométricas y algunos focos localizados del paramento generan pequeñas concentraciones de valores más elevados.

Los parámetros de planaridad y verticalidad muestran valores altos y bastante homogéneos en prácticamente toda la superficie, lo que indica que el paramento mantiene una geometría regular. Las variaciones se localizan nuevamente en los sillares 6, 9 y en las juntas, siguiendo una tendencia similar a la registrada en las estaciones anteriores.

En cuanto a la curvatura media y variación superficial, los valores permanecen bajos en la mayor parte del área analizada, con incrementos puntuales asociados a bordes y transiciones entre sillares. Este comportamiento resulta consistente con el observado en estaciones previas.

Por último, el momento de primer orden muestra una distribución bastante uniforme, sin contrastes significativos entre bloques. En términos generales, su comportamiento es similar al observado en el resto de las estaciones, sin evidenciar anomalías destacables.

4.1.1.5 Estación 5 (ST005)

Finalmente, de la misma manera se presentan en la **TABLA 4-9** las capturas que corresponden al análisis de la nube de puntos de la Estación 5 (ST005). Posteriormente en la **TABLA 4-10** se muestran las escalas cromáticas correspondientes a cada parámetro analizado.

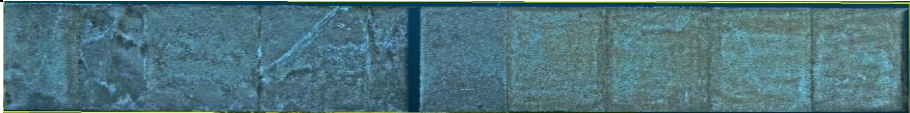
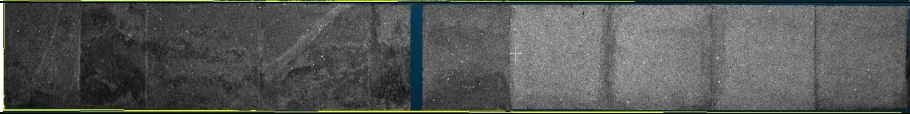
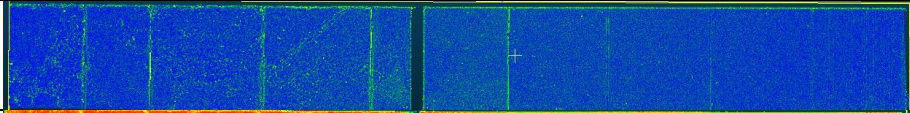
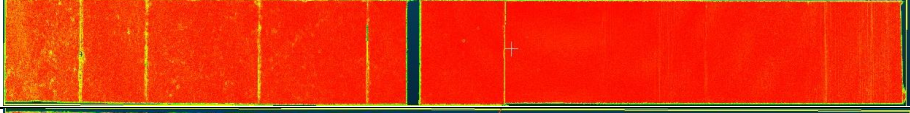
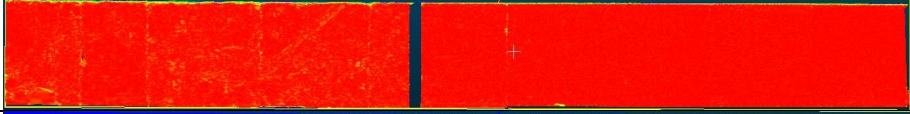
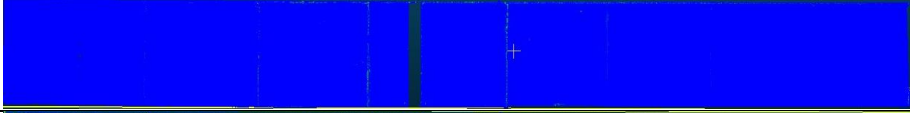
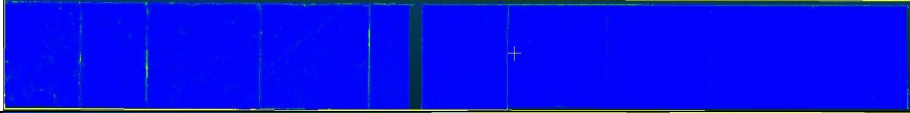
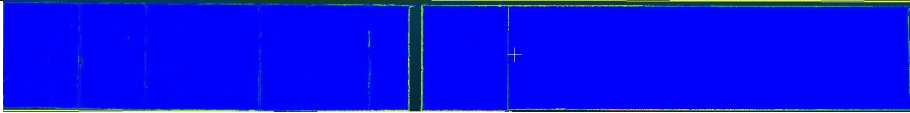
Parámetro	Imagen									
Referencia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RGB										
Intensidad										
Roughness										
Planarity										
Verticality										
Mean curvature										
Surface variation										
1 st order moment										

Tabla 4-9 Parámetros visualizados de la nube de puntos LiDAR (RGB, intensidad, rugosidad, planaridad, verticalidad, curvatura media, variación de superficie y momento de primer orden) correspondientes a la Estación 5 (ST005) y radio de vecindad de 1cm (Elaboración propia)

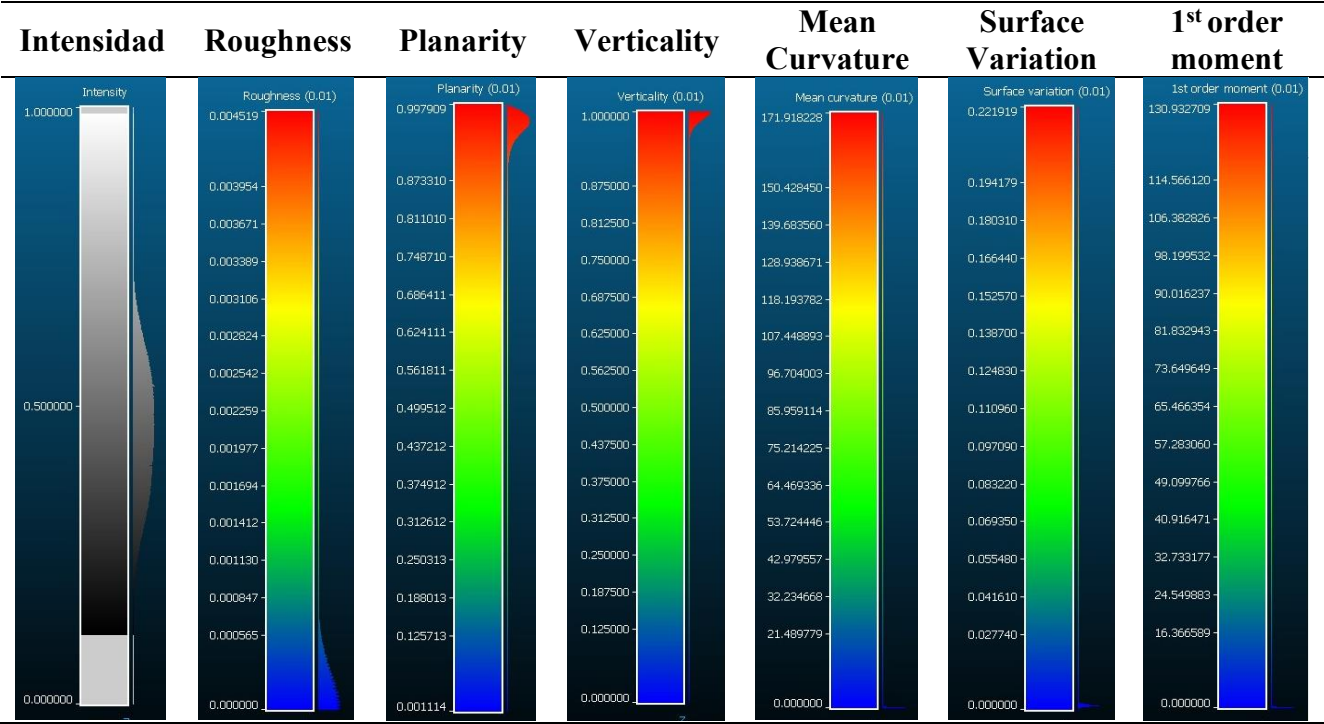


Tabla 4-10 Escalas cromáticas de los parámetros geométricos obtenidos a partir del análisis de la nube de puntos LiDAR de la Estación 5 (ST005) (Elaboración propia)

La representación RGB muestra una superficie relativamente uniforme, aunque se distinguen ligeras variaciones cromáticas hasta el sillar 5, a partir del cual se homogeniza la superficie haciendo notar el mejor estado de la parte derecha de esta sección.

El mapa de intensidad refleja una distribución relativamente regular, con diferencias moderadas entre algunos sillares que podrían estar asociadas tanto a variaciones en la reflectividad del material como a pequeñas diferencias en el ángulo de incidencia del haz láser. Este patrón es similar al observado en otras estaciones, donde las juntas entre bloques tienden a concentrar los principales contrastes.

La rugosidad se mantiene en valores generalmente bajos en la mayor parte de la superficie, con incrementos puntuales en las juntas y en determinadas zonas localizadas del interior de algunos sillares. En este caso se observa claramente en el sillar 4 una estría cortando el sillar diagonalmente, si bien parece estar más asociado a un proceso de cristalización de sales que de desprendimiento, por lo que se puede deducir que está en una fase más precoz que otras secciones previamente analizadas.

Los parámetros de planaridad y verticalidad muestran valores altos y bastante homogéneos en prácticamente todo el paramento, lo que indica que la superficie conserva una geometría regular y bien definida. Las pequeñas variaciones detectadas se localizan principalmente en los límites entre sillares, como ya se había observado en el resto de las estaciones analizadas.

En el caso de la curvatura media y de la variación de superficie, los valores permanecen muy bajos en la mayor parte de la superficie, lo que indica una geometría prácticamente plana. Los ligeros incrementos detectados se concentran en bordes y juntas, donde se producen cambios locales en la orientación de la superficie.

Por último, el momento de primer orden muestra una distribución bastante homogénea a lo largo de toda la superficie analizada, sin evidenciar contrastes significativos entre bloques. En conjunto, el comportamiento de los distintos parámetros geométricos en esta estación resulta coherente con el observado en el resto de las zonas estudiadas, sin indicios claros de alteraciones geométricas relevantes en el paramento.

4.1.2 Mapeo de humedad

Tal y como se explica en el Capítulo 3, con el fin de evaluar la presencia y distribución de humedad en el paramento analizado, se realizaron mediciones de contenido de humedad en distintos puntos de su superficie. A partir de los valores obtenidos se generaron mapas de interpolación que permiten representar de forma continua la variación espacial del contenido de humedad a lo largo del paramento.

Las figuras presentadas en este apartado muestran la distribución de humedad correspondiente a las diferentes estaciones analizadas. La escala cromática permite identificar zonas con mayor o menor concentración de humedad, facilitando la localización de posibles áreas donde este fenómeno se manifiesta con mayor intensidad. En la **FIGURA 4-1** se puede observar aquella correspondiente a la Estación 1 (ST001).

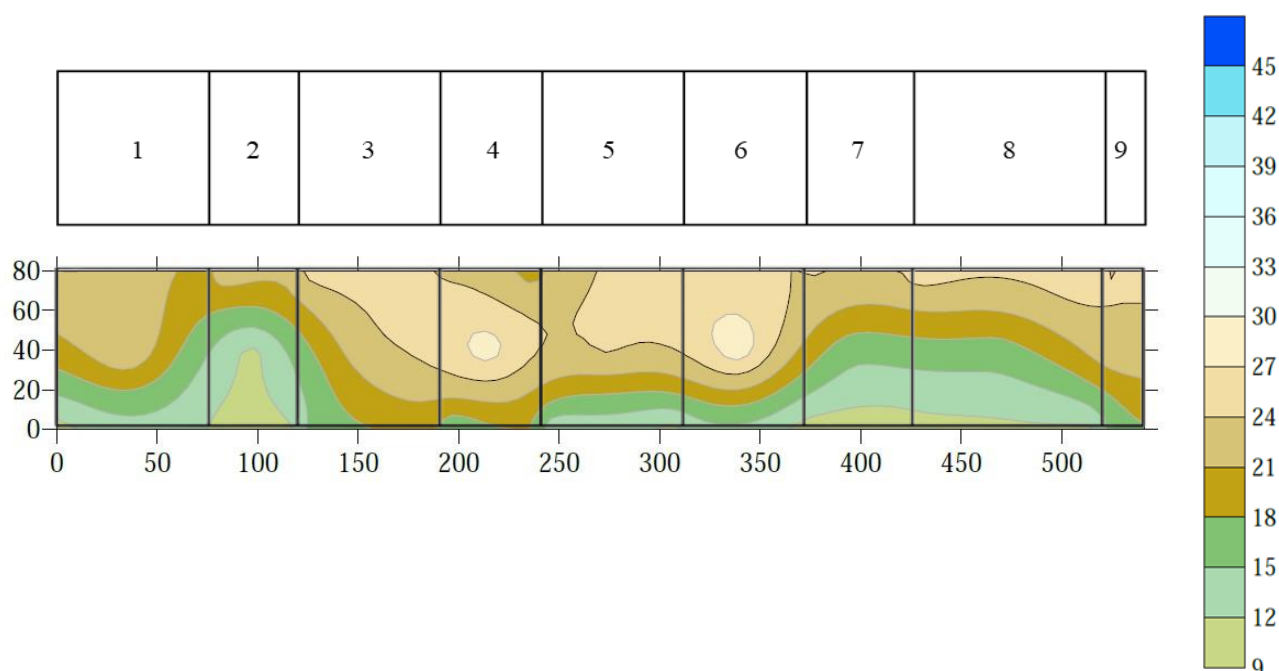


Figura 4-1 Distribución espacial de la humedad relativa medida en %WME de la Estación 1 (ST001) (Escala 1:36) (Elaboración propia)

Considerando el conjunto del paramento, una parte significativa de la superficie presenta valores comprendidos entre 15 y 25 %WME, compatibles con niveles moderados de humedad según el Estado del Arte y el manual del instrumento utilizado. No obstante, la presencia de focos puntuales con valores superiores a 30 %WME indica la existencia de zonas localizadas con un grado de humedad elevado, lo que pone de manifiesto una distribución no uniforme del contenido de humedad en el elemento analizado.

A continuación, en la **FIGURA 4-2** se presenta el mapa de humedad de la Estación 2 (ST002).

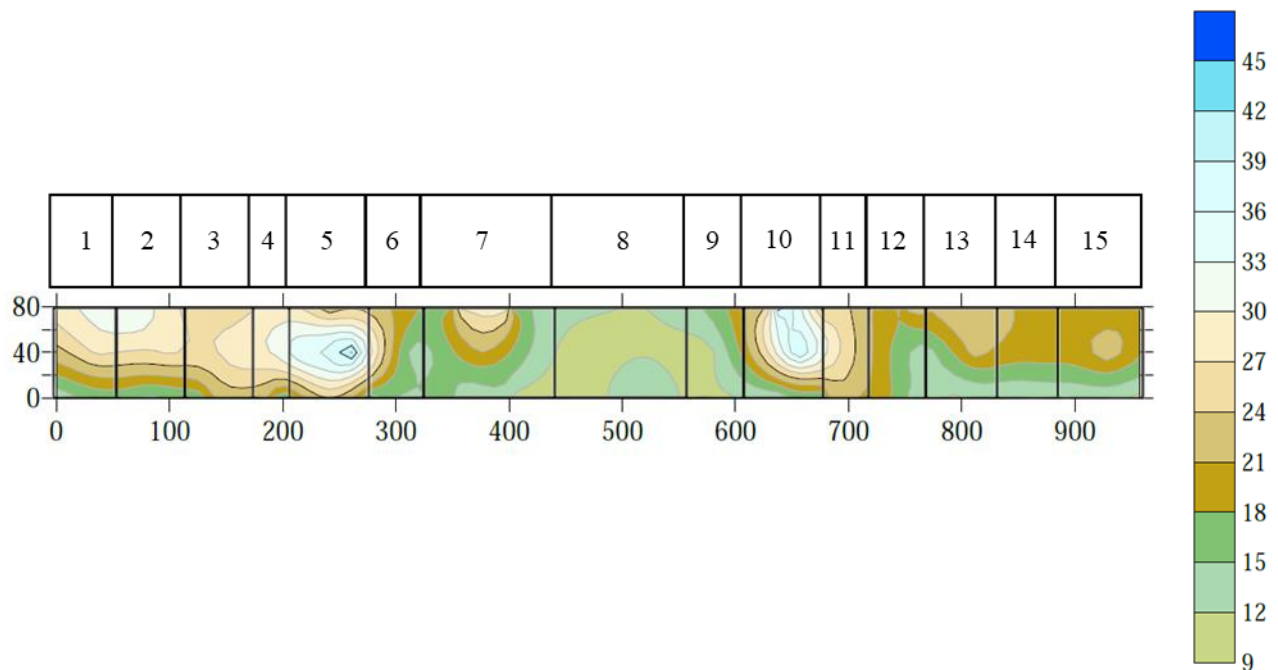


Figura 4-2 Distribución espacial de la humedad relativa medida en %WME de la Estación 2 (ST002) (Escala 1:65) (Elaboración propia)

En este caso se identifican varios focos localizados con valores elevados, destacando especialmente los situados aproximadamente en los sillares 5 y 10, donde se alcanzan valores cercanos a 40–45 %WME. En los primeros dos sillares se observa también en la zona superior un foco menor que alcanza valores de 30–35 % WME indicativo de zona de humedad alta. Entre estas zonas aparecen sectores con valores notablemente menores, generalmente comprendidos entre 15 y 25 %WME, lo que indica niveles de humedad moderados.

Al igual que en la estación anterior, se mantiene la tendencia general de incremento de la humedad hacia la parte superior del paramento, registrándose valores más reducidos en la franja inferior.

En conjunto, aunque una parte significativa del paramento presenta valores moderados, la presencia de concentraciones puntuales superiores a 30–40 %WME pone de manifiesto una distribución irregular de la humedad y la existencia de zonas localizadas donde este fenómeno se manifiesta con mayor intensidad.

A continuación, en la **FIGURA 4-3** se presenta el mapeo de humedad de la Estación 3 (ST003)

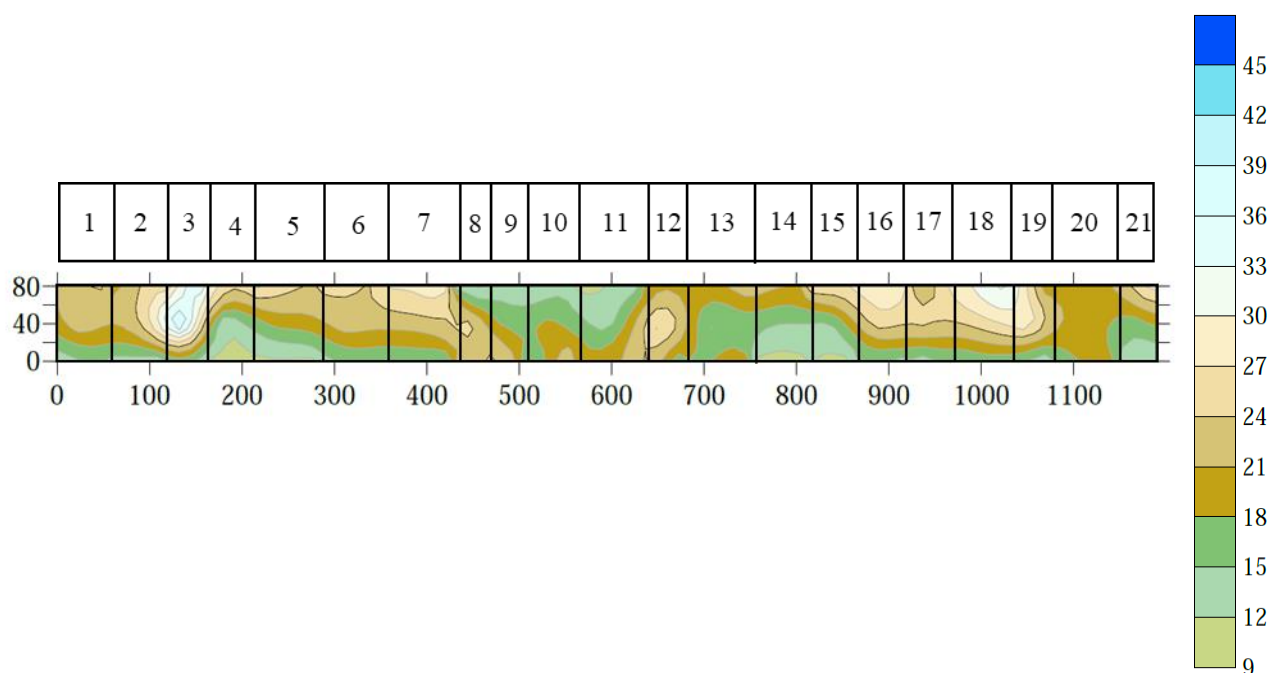


Figura 4-3 Distribución espacial de la humedad relativa medida en %WME de la Estación 3 (ST003) (Escala 1:82) (Elaboración propia)

Al igual que en las representaciones anteriores, la humedad no se distribuye de forma uniforme a lo largo del paramento, sino que aparecen variaciones locales entre distintos sillares.

Se identifican varios focos puntuales con valores elevados, especialmente en los sectores situados aproximadamente en los sillares 2-3 y en la zona comprendida entre los sillares 16-18, donde se alcanzan valores próximos a 30-35 %WME, indicativos de zonas con un contenido de humedad elevado. Entre estas áreas aparecen sectores con valores considerablemente menores, generalmente comprendidos entre 15 y 25 %WME, lo que refleja condiciones de humedad moderada.

En términos generales, el patrón observado mantiene la tendencia vertical descrita en las estaciones anteriores, con valores relativamente mayores hacia la parte superior del paramento y registros más bajos en la zona inferior.

La estación ST003 en su conjunto presenta una distribución heterogénea del contenido de humedad, similar a la Estación 1, caracterizada por la alternancia de sectores con niveles moderados y focos localizados con valores elevados, lo que confirma nuevamente que la presencia de humedad se concentra en áreas específicas del paramento y no de forma uniforme a lo largo del elemento constructivo.

A continuación, se expone en la **FIGURA 4-4** el mapeo de la Estación 4 (ST004).

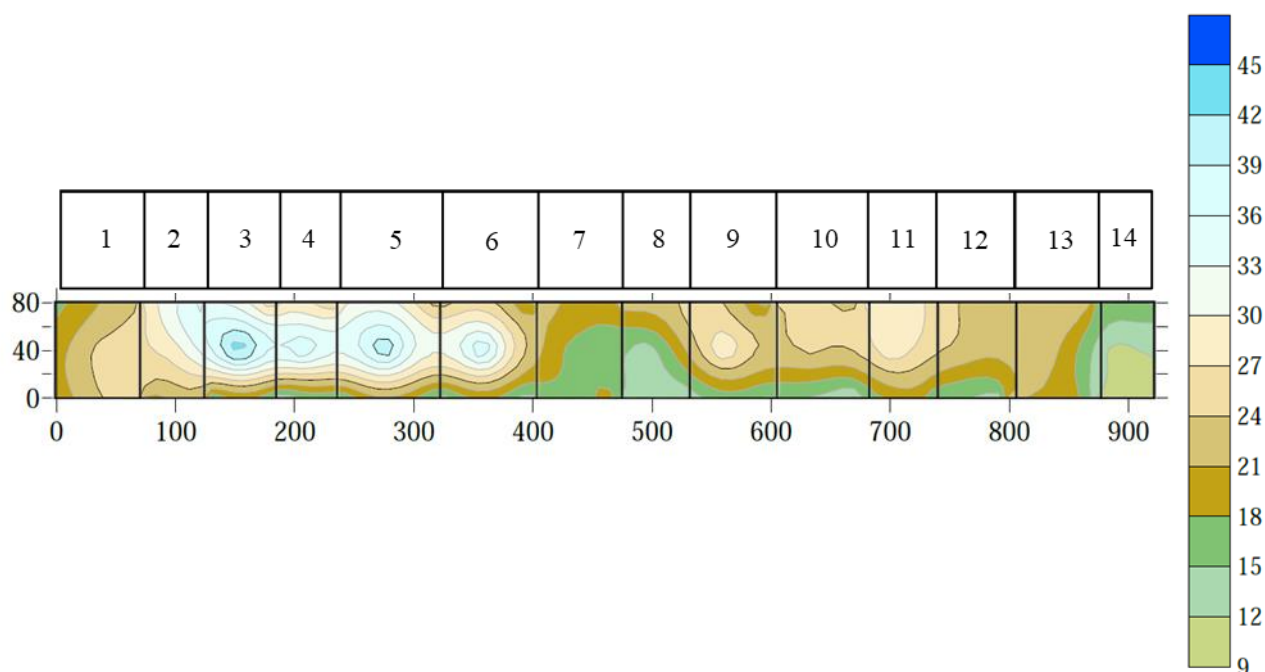


Figura 4-4 Distribución espacial de la humedad relativa medida en %WME de la Estación 4 (ST004) (Escala 1:63) (Elaboración propia)

Como en las estaciones analizadas previamente, el paramento presenta variaciones espaciales apreciables en los valores de humedad, sin que esta se distribuya de forma homogénea a lo largo del paramento.

En este caso destacan concentraciones relativamente elevadas en la zona inicial del tramo analizado, aproximadamente en la zona central y superior de los sillares 2–6, donde se alcanzan valores cercanos a 30–35 %WME e incluso ligeramente superiores en algunos puntos, lo que indica sectores con presencia notable de humedad. Estas áreas contrastan con otros sectores del paramento, especialmente hacia la zona central y final del tramo, donde predominan valores más reducidos, en muchos casos situados entre 15 y 25 %WME.

De forma similar a lo observado en las estaciones anteriores, el mapa mantiene el patrón general de mayor contenido de humedad hacia la parte superior del paramento, mientras que los registros más bajos tienden a concentrarse en la franja inferior.

De manera global, los resultados obtenidos en la estación ST004 muestran nuevamente una distribución irregular de la humedad, incluso más agravado con respecto a las estaciones anteriores, caracterizada por la presencia de focos localizados con valores elevados intercalados con zonas de humedad moderada o baja. Este comportamiento refuerza la idea de que la presencia de humedad no afecta de forma homogénea a todo el paramento, sino que se concentra en determinados sectores del paramento.

En la **FIGURA 4-5** se representa el mapa de distribución de la humedad obtenido para la Estación 5 (ST005).

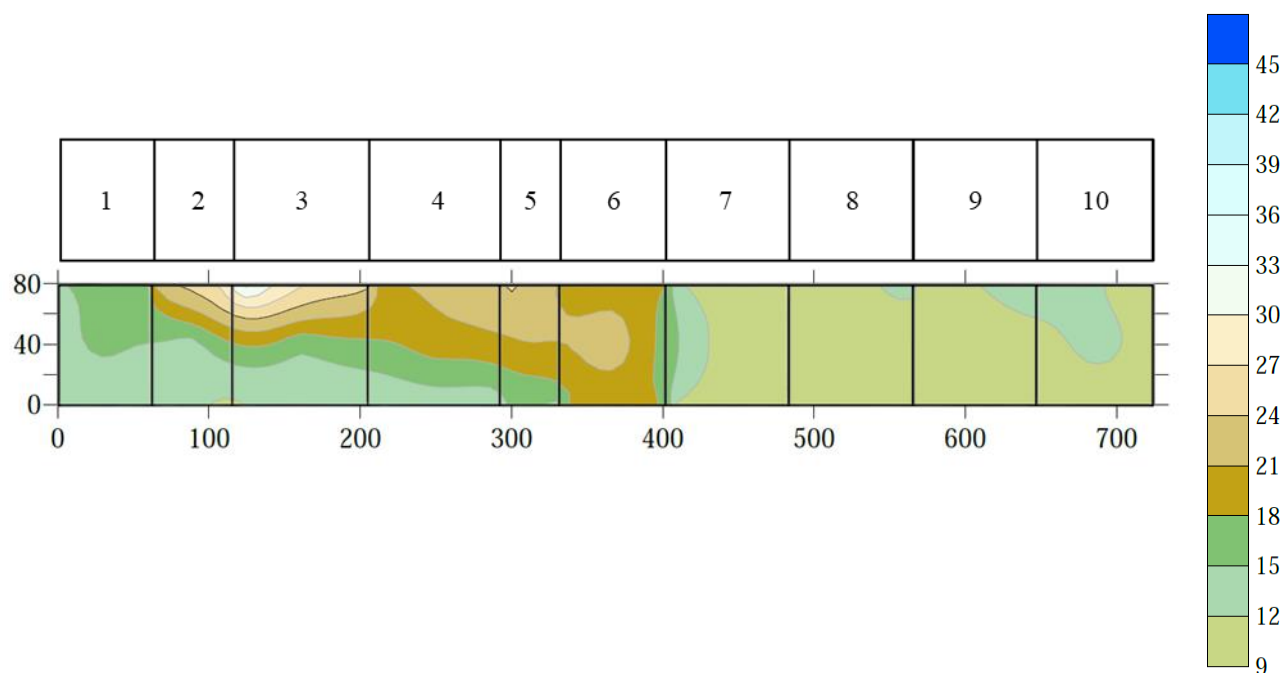


Figura 4-5 Distribución espacial de la humedad relativa medida en %WME de la Estación 5 (ST005) (Escala 1:50) (Elaboración propia)

En este caso se aprecia una mayor concentración de humedad en el tramo inicial del paramento, especialmente en los sillares situados aproximadamente entre las posiciones 2 y 3, donde aparecen valores que alcanzan 30–35 %WME. Estas zonas se identifican claramente en el mapa mediante tonalidades azuladas y blanquecinas.

A medida que se avanza hacia la parte central del tramo analizado, los valores tienden a disminuir progresivamente, predominando registros comprendidos entre 20 y 25 %WME. Finalmente, en el sector final del paramento los valores se reducen aún más, situándose mayoritariamente en el intervalo de 10–20 %WME, lo que indica condiciones de humedad relativamente bajas en comparación con los sectores iniciales.

Al igual que en las estaciones analizadas previamente, se mantiene la tendencia general de incremento de los valores hacia la parte superior del paramento, mientras que la franja inferior presenta registros más reducidos.

De esta forma, la estación ST005 muestra un gradiente de humedad claramente diferenciado a lo largo del paramento, con concentraciones más elevadas en el tramo inicial y una disminución progresiva hacia el resto del elemento analizado.

En términos generales, los mapas de humedad obtenidos muestran que la humedad no se distribuye de forma homogénea a lo largo del paramento analizado, sino que aparece concentrada en determinados sectores del paramento, pero más suave que la estaciones 2, 3 y 4 y al nivel de la Estación 1. En todas las estaciones se identifican focos localizados con valores elevados de %WME, ayudado por la alta humedad relativa durante de la campaña de adquisición (69%), intercalados con zonas donde los registros son moderados o bajos. Asimismo, se observa de forma recurrente una mayor presencia de humedad en la parte superior del paramento respecto a la zona inferior. Estos resultados ponen de

manifiesto la existencia de variaciones espaciales significativas en el contenido de humedad cuya causa y origen serán objeto de discusión.

4.1.3 Extracción y análisis de sales solubles

En este apartado se presentan mediante mapas de distribución espacial los distintos aniones de sales solubles obtenidos en el paramento.

4.1.3.1 Cloruro

A continuación, en la **TABLA 4-11** se presenta el mapeo de la presencia de cloruro en las cinco estaciones que componen el paramento. Se recuerda que los valores se representan en tanto porcentual de contenido masa sal respecto a masa de la muestra de extracción.

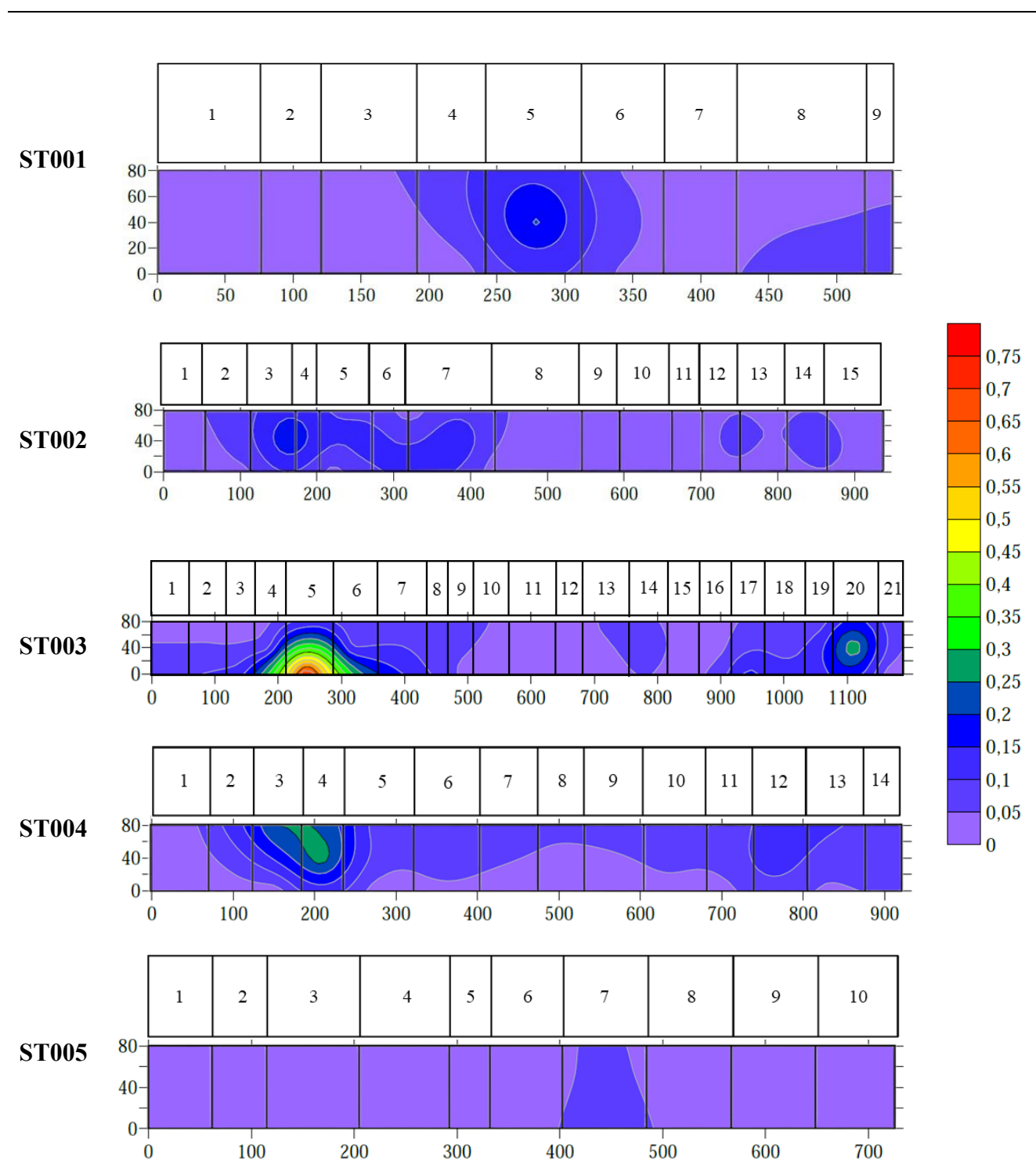


**Tabla 4-11 Mapas de distribución espacial de la concentración de cloruro en las estaciones ST001–ST005
(Elaboración propia)**

El mapa de distribución de cloruros revela una focalización crítica en la Estación 3, donde se alcanzan concentraciones de hasta el 0,75%. Este valor es elevado y contrasta con la práctica ausencia de esta sal en los extremos del zócalo (Estaciones 1, 2 y 5). Dada la ubicación geográfica del edificio, este pico sugiere una acumulación por aerosol marino o por remonte capilar, donde el sillar actúa como receptor principal de iones cloruro.

Las consecuencias de esta concentración son significativas debido a la elevada capacidad de los cloruros para absorber humedad del ambiente. Estas sales favorecen la retención de agua en la red porosa del granito y, durante los ciclos de disolución y cristalización, pueden generar presiones internas en el interior de los poros. Este proceso de cristalización de sales es un mecanismo conocido de deterioro en materiales pétreos, ya que el crecimiento de los cristales puede superar la resistencia a tracción del material, provocando fenómenos de degradación física como exfoliaciones o desprendimientos superficiales.

4.1.3.2 Fosfato

A continuación, en la **TABLA 4-12** se presenta el mapeo de la presencia de fosfato en las cinco estaciones que componen el paramento.

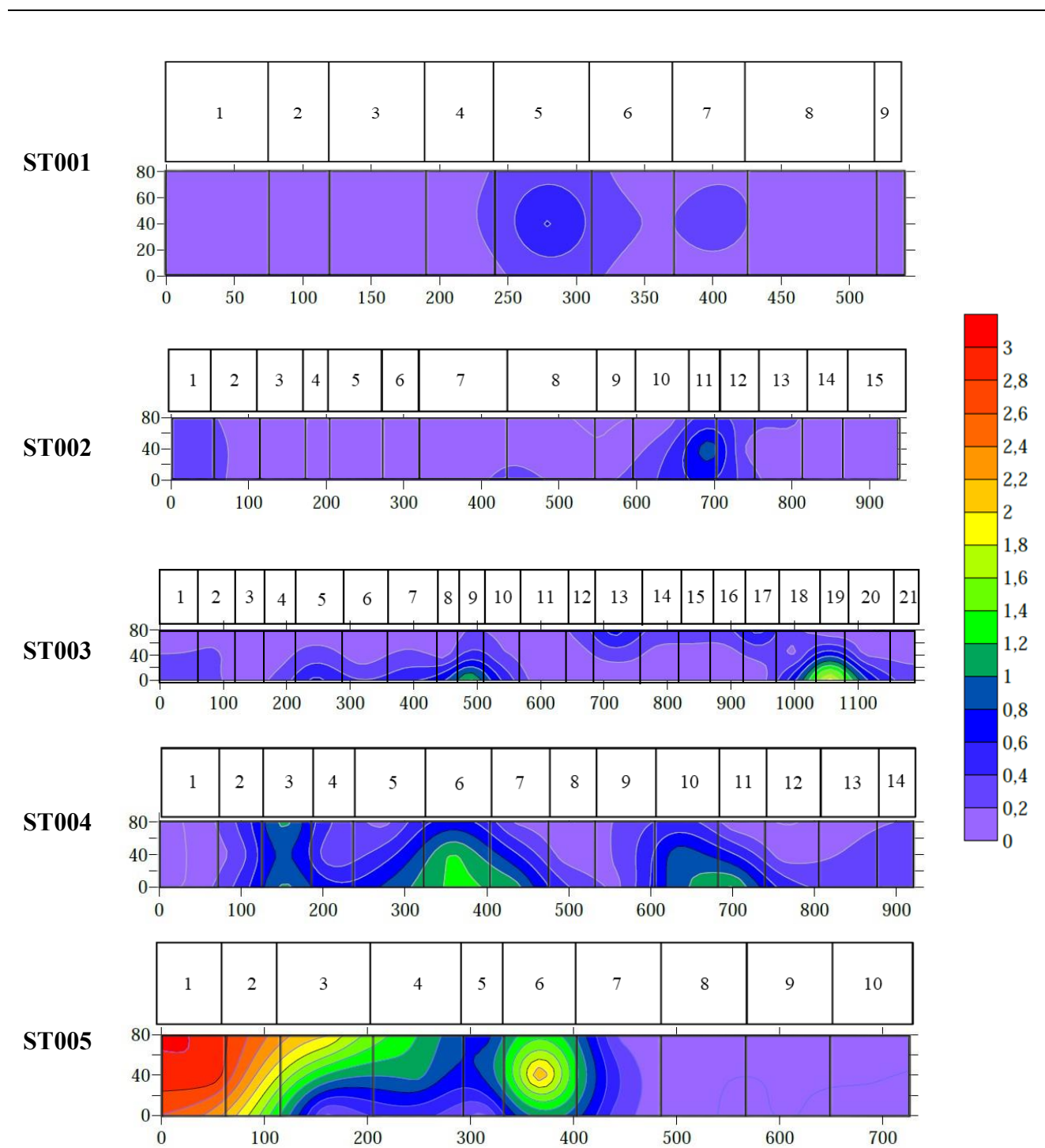


Tabla 4-12 Mapas de distribución espacial de la concentración de fosfatos en las estaciones ST001–ST005
(Elaboración propia)

La distribución de fosfatos desplaza el punto de mayor concentración hacia la Estación 5, donde se registra un valor cercano al 3,0%. Este constituye el valor más elevado detectado en todo el estudio y

sugiere una acumulación significativa de compuestos fosfatados en los sillares de este sector. A diferencia de otras sales, los fosfatos suelen estar asociados a fuentes de origen orgánico, como la acumulación de deyecciones de aves o la presencia de residuos derivados de productos de limpieza o contaminantes ambientales que han quedado fijados en la superficie pétreo.

Desde el punto de vista del deterioro, una elevada concentración de fosfatos puede favorecer procesos de alteración química en el material, especialmente en presencia de humedad. Estos compuestos pueden interactuar con los minerales del granito o con otros depósitos presentes en la superficie, contribuyendo a la degradación progresiva del paramento. La elevada concentración detectada en la Estación 5 sugiere, por tanto, la existencia de una fuente localizada de contaminación que podría estar relacionada con los procesos de deterioro superficial observados en esta zona.

4.1.3.3 Nitrato

A continuación, en la **TABLA 4-13** se presenta el mapeo de la presencia de nitrato en las cinco estaciones que componen el paramento.

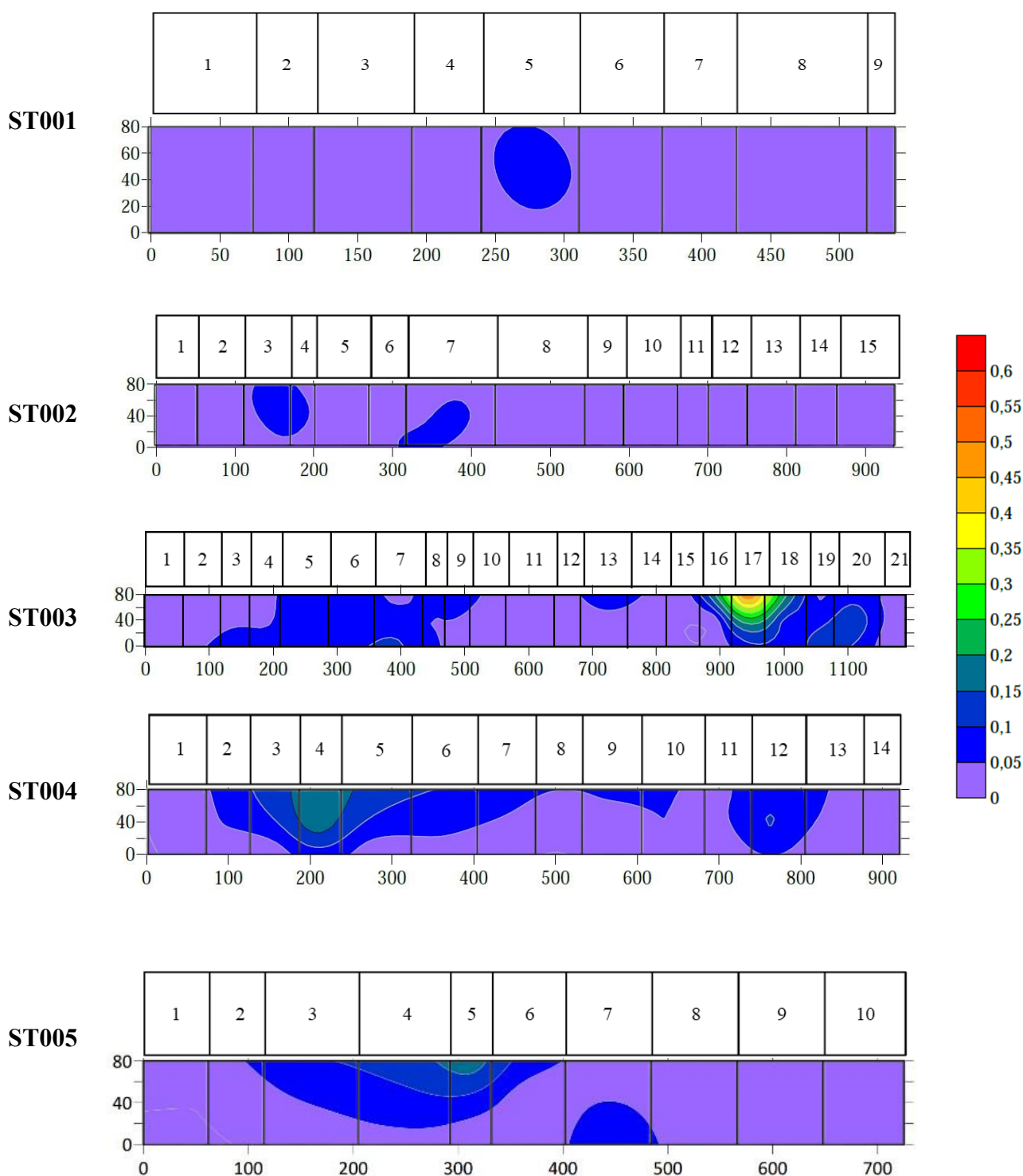


**Tabla 4-13 Mapas de distribución espacial de la concentración de nitrato en las estaciones ST001–ST005
(Elaboración propia)**

El mapeo de nitratos identifica un foco de acumulación significativo en la Estación 3, con un pico cercano al 0,5%, manteniendo además una presencia relativamente constante de alrededor del 0,2% en el tramo final del muro (Estaciones 4 y 5). Los nitratos son sales altamente solubles y móviles, frecuentemente asociadas a la descomposición de materia orgánica o a la infiltración de aguas con carga nitrogenada procedentes del terreno o de pavimentos colindantes.

La presencia de nitratos resulta relevante desde el punto de vista del deterioro porque estas sales favorecen la retención de humedad en el material y participan en ciclos de disolución y recristalización dentro de la red porosa de la piedra. Además, su coexistencia con otras sales, como los cloruros detectados en el estudio, puede intensificar los procesos de acumulación salina en el interior del paramento. La concentración observada en la Estación 3 sugiere, por tanto, un entorno con elevada actividad salina que podría contribuir a los procesos de alteración superficial identificados en esta zona.

4.1.3.4 Sulfato

A continuación, en la **TABLA 4-14** se presenta el mapeo de la presencia de sulfato en las cinco estaciones que componen el paramento.

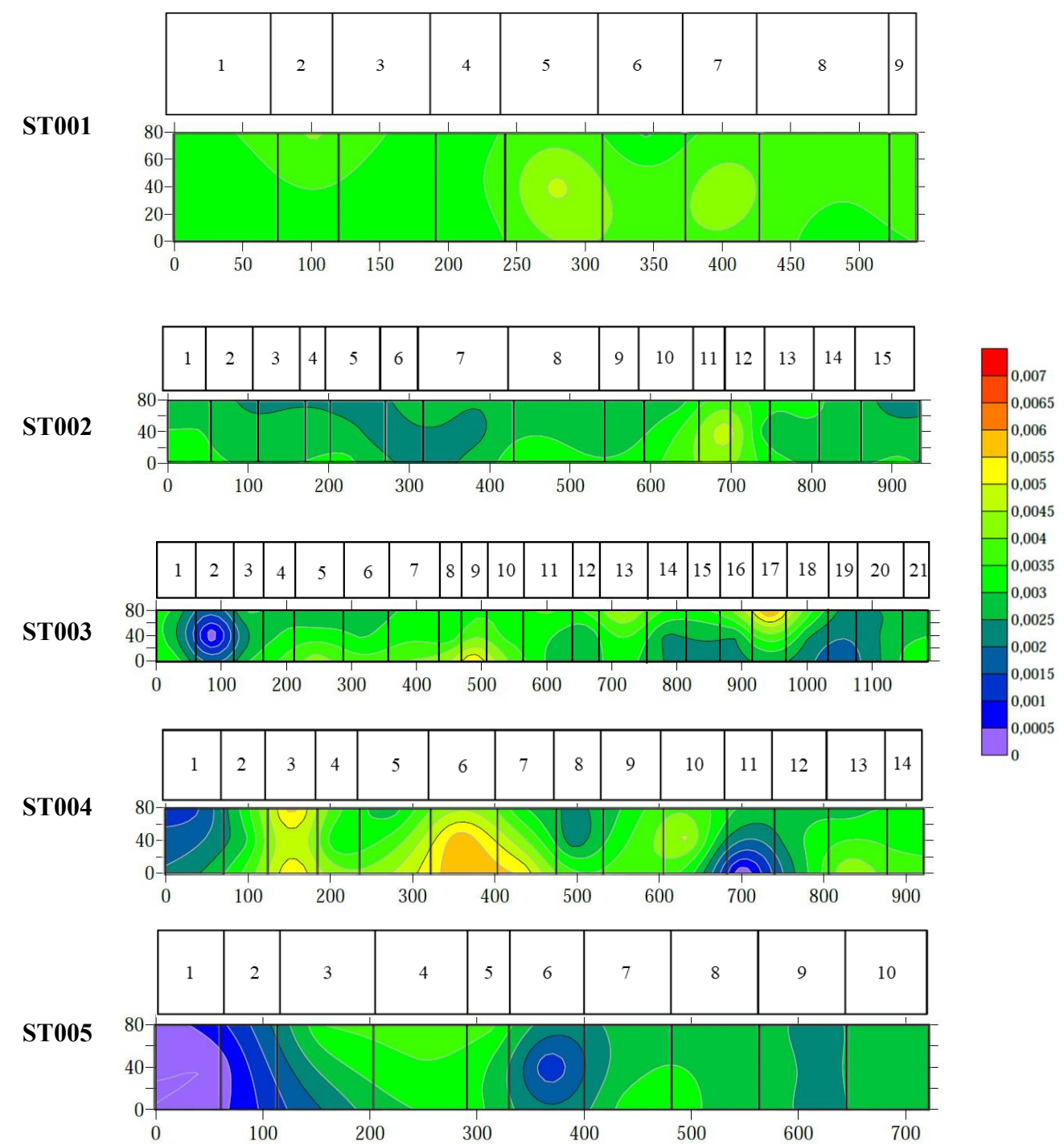


**Tabla 4-14 Mapas de distribución espacial de la concentración de sulfato en las estaciones ST001–ST005
(Elaboración propia)**

En el caso de los sulfatos, los resultados muestran concentraciones muy reducidas en comparación con el resto de los aniones analizados, situando el valor máximo en torno al 0,007% en la Estación 4.

Desde el punto de vista cuantitativo, se trata del anión menos representativo dentro del conjunto de sales detectadas en el paramento. Aunque su distribución no es completamente uniforme, los valores ligeramente superiores observados en la zona central del zócalo no permiten identificar un patrón claro asociado a factores constructivos o ambientales específicos.

Dada la baja concentración registrada y la ausencia de un mecanismo evidente de acumulación, los sulfatos no parecen desempeñar un papel relevante en los procesos de deterioro identificados en este edificio. No obstante, su presencia confirma la llegada de compuestos transportados por el aire o por el agua al paramento. En este sentido, la detección de sulfatos puede interpretarse como un indicador de la exposición del material pétreo a agentes externos, aunque en el caso analizado su contribución al proceso global de degradación resulta limitada en comparación con otros aniones presentes en mayor concentración.

4.1.4 Análisis termográfico mediante cámara infrarroja

En este apartado se aborda el estudio del paramento granítico mediante el uso de la termografía infrarroja, estructurando el análisis en dos fases metodológicas diferenciadas. Se resume el protocolo abordado y descrito en el Capítulo 3:

1. **Fase de Termografía Pasiva:** Se han analizado las cinco estaciones de control aprovechando las condiciones de equilibrio térmico natural al alba. Para obtener una visión continua y rigurosa del paramento, se ha realizado una reconstrucción fotogramétrica de cada estación a partir de capturas individuales, permitiendo así identificar patrones de humedad y degradación a lo largo de toda la superficie del sillar de forma ininterrumpida.
2. **Fase de Termografía Activa:** Localizados los puntos críticos mediante el análisis realizado en este trabajo se procede a realizar un análisis mediante termografía activa. Mediante la aplicación controlada de calor, se busca profundizar en la respuesta dinámica del material para caracterizar con mayor precisión el alcance de las patologías detectadas, como la profundidad de las humedades o la pérdida de cohesión interna.

Este enfoque combinado permite no solo localizar las patologías, sino también diagnosticar su gravedad y comportamiento bajo estrés térmico.

4.1.4.1 Termografía pasiva

En este apartado se presenta el análisis detallado de las capturas obtenidas mediante termografía pasiva en las cinco estaciones del paramento granítico. El objetivo es identificar patrones térmicos anómalos que revelen patologías invisibles a simple vista, como el ascenso capilar o la degradación de juntas, utilizando la comparación directa entre la imagen infrarroja y la visual para validar el diagnóstico de cada zona.

En la **TABLA 4-15** se puede observar el esquema de referencia de los sillares correspondientes a la Estación 1 junto con la correspondiente imagen infrarroja, visual y la escala de temperatura.

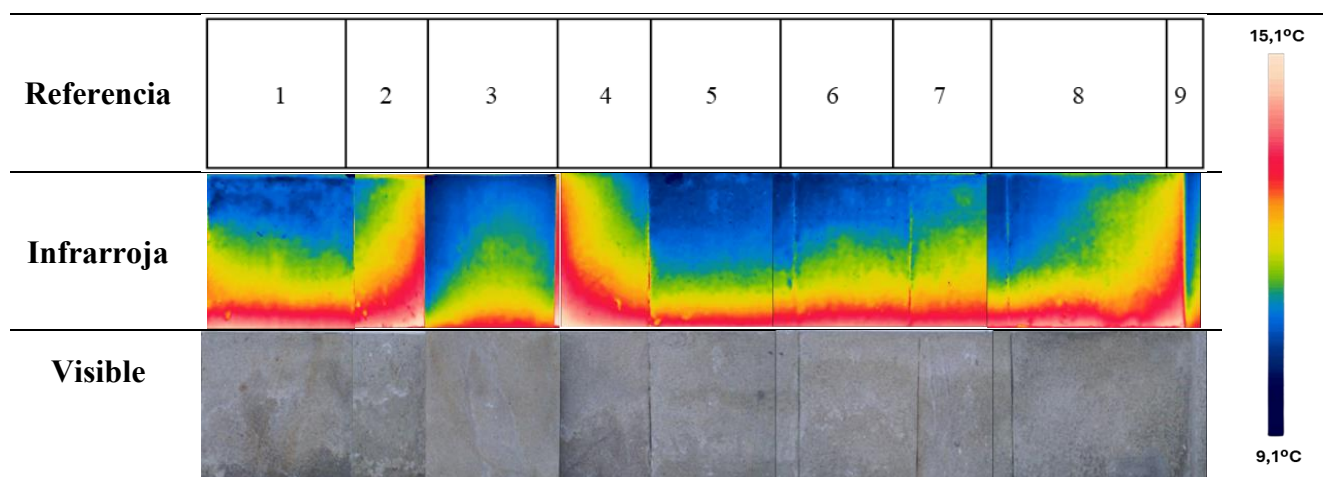


Tabla 4-15 Mapa térmico e imagen visible obtenidos mediante termografía infrarroja pasiva en el paramento correspondiente a la Estación 1 (ST001) (Elaboración propia)

En la base del paramento se identifica una franja de mayor temperatura que contrasta con el enfriamiento más acelerado de la parte superior del sillar. Este fenómeno responde, en primera instancia, a la elevada inercia térmica del terreno y de la propia cimentación, que actúan como foco de calor durante el periodo de enfriamiento nocturno. Además, la transferencia de calor entre el suelo-pared y aire-pared es mayor en la primera debido a que la transferencia de calor predomina por conducción y la segunda por convección. Destacar, que en el interior del edificio se encontraba la calefacción en funcionamiento, de ahí los 15°C alcanzados, estando a 9°C en el exterior. Sin embargo, resulta especialmente relevante la morfología ondulada de esta zona cálida. La irregularidad en la altura que alcanza el flujo térmico no es uniforme, lo que apunta a una patología de humedad por capilaridad y cristalización de sales, siendo la zona de evaporación de sales la zona superior de la onda. Se aprecia también el efecto barrera de la columna en el sillar 3.

Un punto crítico detectado en esta estación es el comportamiento de las juntas verticales. Se observa que el calor se propaga con mayor intensidad a través de los senos de las juntas, lo que sugiere que el material de agarre o el sellado presenta una mayor permeabilidad, mayor conducción del calor o degradación que el granito circundante. Esta discontinuidad facilita el ascenso de la humedad, creando "puentes" que aceleran el deterioro del material pétreo en sus bordes, algo que empieza a intuirse en la cámara visual mediante ligeras alteraciones cromáticas y manchas de humedad.

En conclusión, la Estación 1 muestra un paramento que, si bien mantiene su integridad estructural, presenta un proceso activo de absorción capilar. La diferencia de temperatura detectada confirma que el agua está actuando como agente modificador de la conductividad térmica del granito junto a las posibles sales disueltas, marcando un patrón de degradación.

En la **TABLA 4-16** se observa el análisis de la Estación 2, de manera análoga a la anterior.

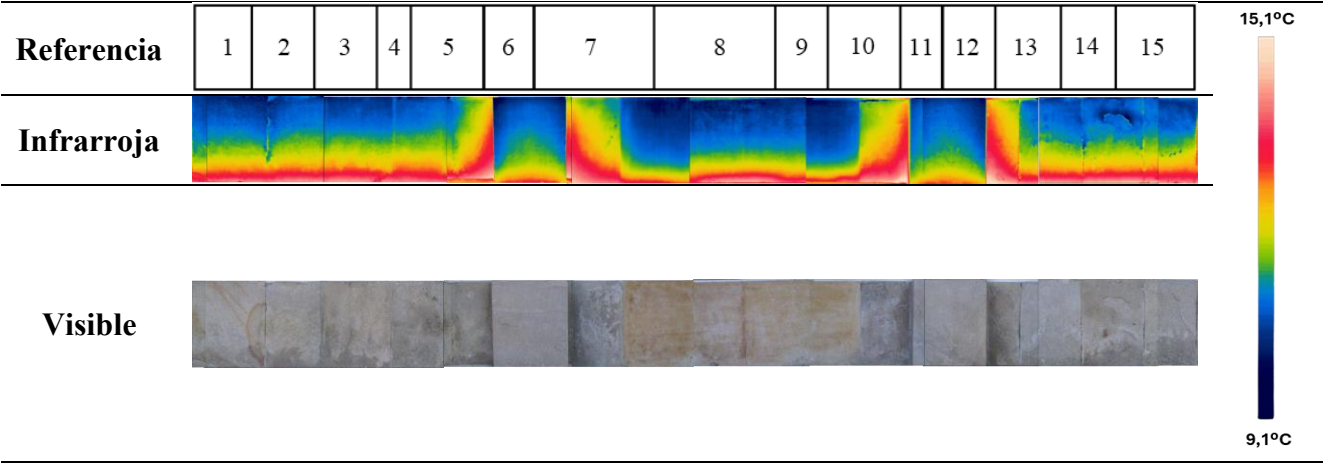


Tabla 4-16 Mapa térmico e imagen visible obtenidos mediante termografía infrarroja pasiva en el paramento correspondiente a la Estación 2 (ST002) (Elaboración propia)

El análisis termográfico de la Estación 2 revela una continuidad en el fenómeno de inercia térmica basal, aunque con matices morfológicos que la diferencian de la estación previa. En esta sección, el flujo térmico ascendente no se presenta como una franja horizontal prácticamente homogénea, sino que muestra una sectorización mucho más acusada, con picos de temperatura que alcanzan cotas superiores en puntos específicos del sillar. Por otro lado, se puede apreciar, al igual que en la anterior Estación el efecto barrera que presentan las columnas en los sillares 6, 13 y 20.

En la imagen visual, se detectan ligeras eflorescencias y una mayor porosidad superficial en los bloques centrales. Al contrastarlo con la termografía, se confirma que las zonas con mayor "ruido" térmico coinciden con estas áreas de degradación física como se puede observar en los sillares 13, 14 y 15. Además, en el 14 se observa un claro desprendimiento de material claramente diferenciado en la imagen infrarroja.

En conclusión, la Estación 2 evidencia un estado de alteración más avanzado en las uniones constructivas. La detección de estos puntos críticos mediante la termografía pasiva permite señalar las juntas como los elementos de mayor vulnerabilidad higrotérmica de este tramo, donde la rotura del equilibrio térmico es más evidente.

En la **TABLA 4-17** se observa el análisis correspondiente a la Estación 3.

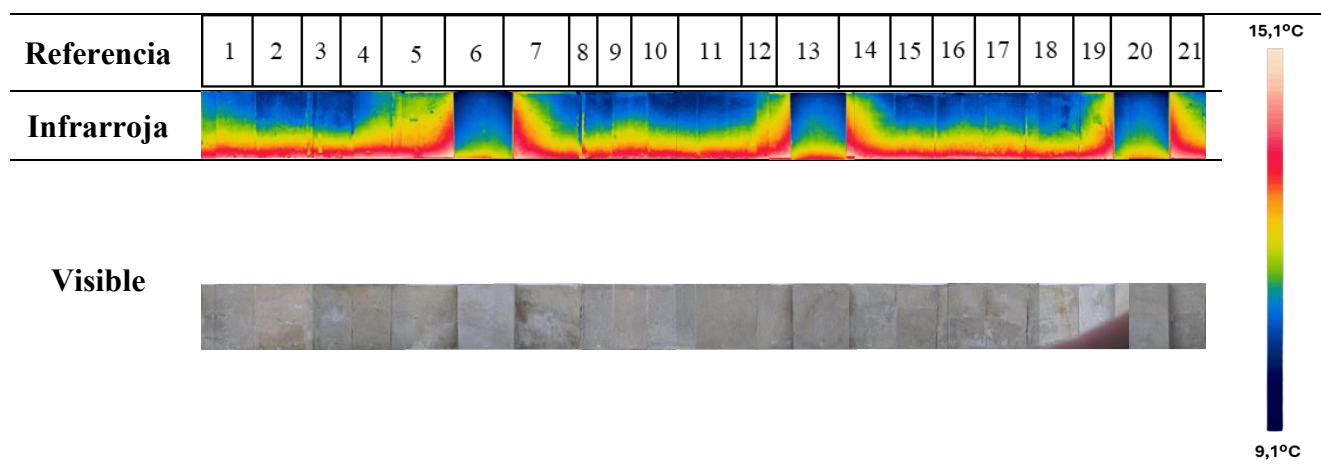


Tabla 4-17 Mapa térmico e imagen visible obtenidos mediante termografía infrarroja pasiva en el paramento correspondiente a la Estación 3 (ST003) (Elaboración propia)

En la Estación 3, el comportamiento térmico del paramento muestra una cierta estabilización del ascenso capilar en comparación con los tramos anteriores, aunque persiste la franja cálida en la base debido a la inercia térmica del terreno.

A pesar de esta relativa homogeneidad, las juntas verticales continúan manifestándose como los elementos de mayor transmisión térmica. Se aprecia cómo el calor se concentra en las uniones de los sillares, actuando como puentes que elevan la temperatura localmente. Esto confirma que, independientemente de la carga de humedad del sillar, el mortero de rejuntado presenta una degradación constante a lo largo del paramento, perdiendo su función de barrera estanca y facilitando la entrada de agentes externos, además de ser mayor conductor de calor. Nuevamente se puede observar lo comentado en las anteriores Estaciones, tanto de transferencia de calor como de efecto barrera de las columnas que componen esta Estación. Al contrastar la imagen térmica con la visual, se observa que la superficie del granito en esta estación presenta menos manchas oscuras y una textura aparentemente más sana.

En la **TABLA 4-18** se observa el análisis de la Estación 4.

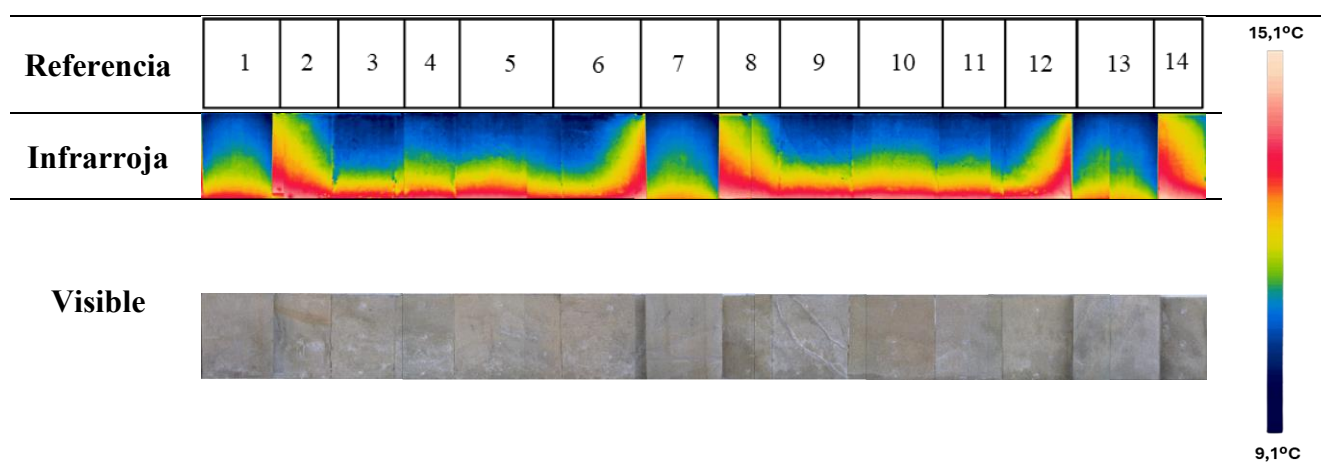


Tabla 4-18 Mapa térmico e imagen visible obtenidos mediante termografía infrarroja pasiva en el paramento correspondiente a la Estación 4 (ST004) (Elaboración propia)

En este tramo, el gradiente térmico basal sigue siendo muy marcado. La diferencia térmica entre la base y la parte superior es aquí más drástica, lo que aumenta el riesgo de tensiones internas en el material pétreo durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento diarios.

Por otro lado, las juntas en esta estación actúan de forma muy agresiva como puentes térmicos, especialmente en el encuentro con el terreno. Se observa que el calor escapa o se retiene con más fuerza en las líneas verticales, lo que sugiere que el mortero ha perdido gran parte de su capacidad impermeabilizante.

Finalmente, en la **TABLA 4-19** se observa el análisis térmico de la Estación 5.

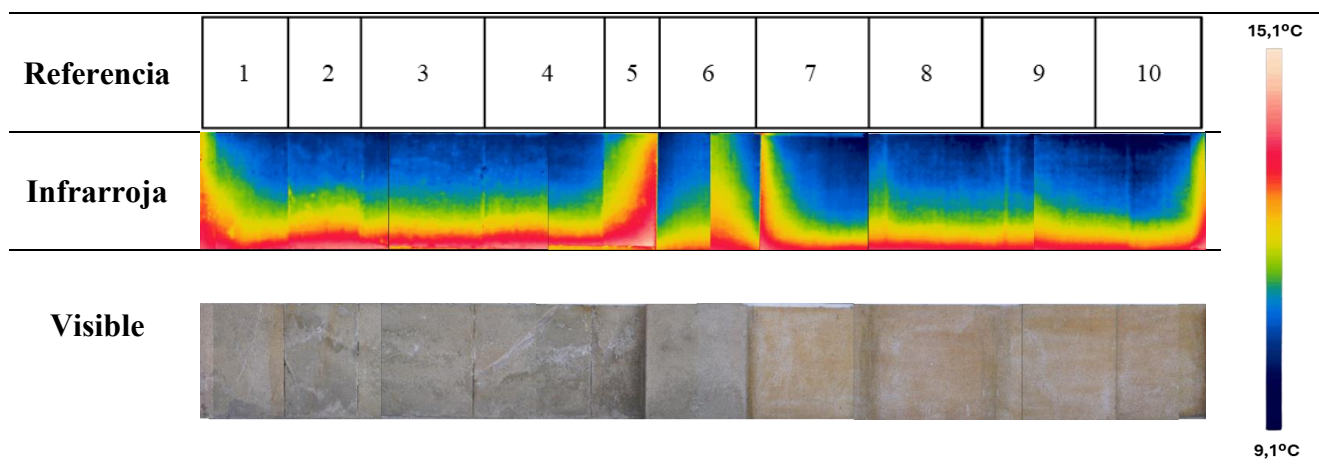


Tabla 4-19 Mapa térmico e imagen visible obtenidos mediante termografía infrarroja pasiva en el paramento correspondiente a la Estación 5 (ST005) (Elaboración propia)

En esta Estación se sigue la misma tendencia que en el resto de Estaciones analizadas. Un aspecto relevante en esta captura es la nitidez con la que se marcan las juntas de dilatación o unión. Se aprecia que el calor asciende por las juntas verticales de manera muy definida, pero sin llegar a empapar térmicamente el resto del sillar de forma tan agresiva. Esto indica que, aunque el mortero sigue siendo el punto débil del sistema, el granito en esta estación parece conservar mejor su densidad original.

En la imagen visual, el paramento se muestra aparentemente seco y con menos eflorescencias que en los puntos críticos previos. Sin embargo, la termografía vuelve a ser fundamental al revelar que, bajo esa apariencia de normalidad, existe un gradiente de temperatura que indica una retención de calor persistente en la base. Esta patología latente es típica en el granito, donde la degradación interna suele preceder a las manifestaciones visuales externas (como el arenizado o el desprendimiento de placas).

4.1.4.2 Termografía activa

Tras la localización de las áreas críticas en la fase pasiva y resto de técnicas, se procede a realizar un análisis mediante termografía activa en los focos detectados como más vulnerables. Al aplicar una fuente de calor controlada sobre estos puntos específicos, se monitoriza la evolución del flujo térmico y su velocidad de calentamiento; permitiendo confirmar la severidad de las patologías causadas por humedades superficiales y acumulaciones internas o huecos estructurales que no son visibles bajo condiciones ambientales normales.

Zona 1

La primera zona analizada (**TABLA 4-20**) se encuentra en la Estación 2 en la parte superior sillar 10. En ella se observa el espectro infrarrojo y el visible de la zona, así como la escala de temperatura.

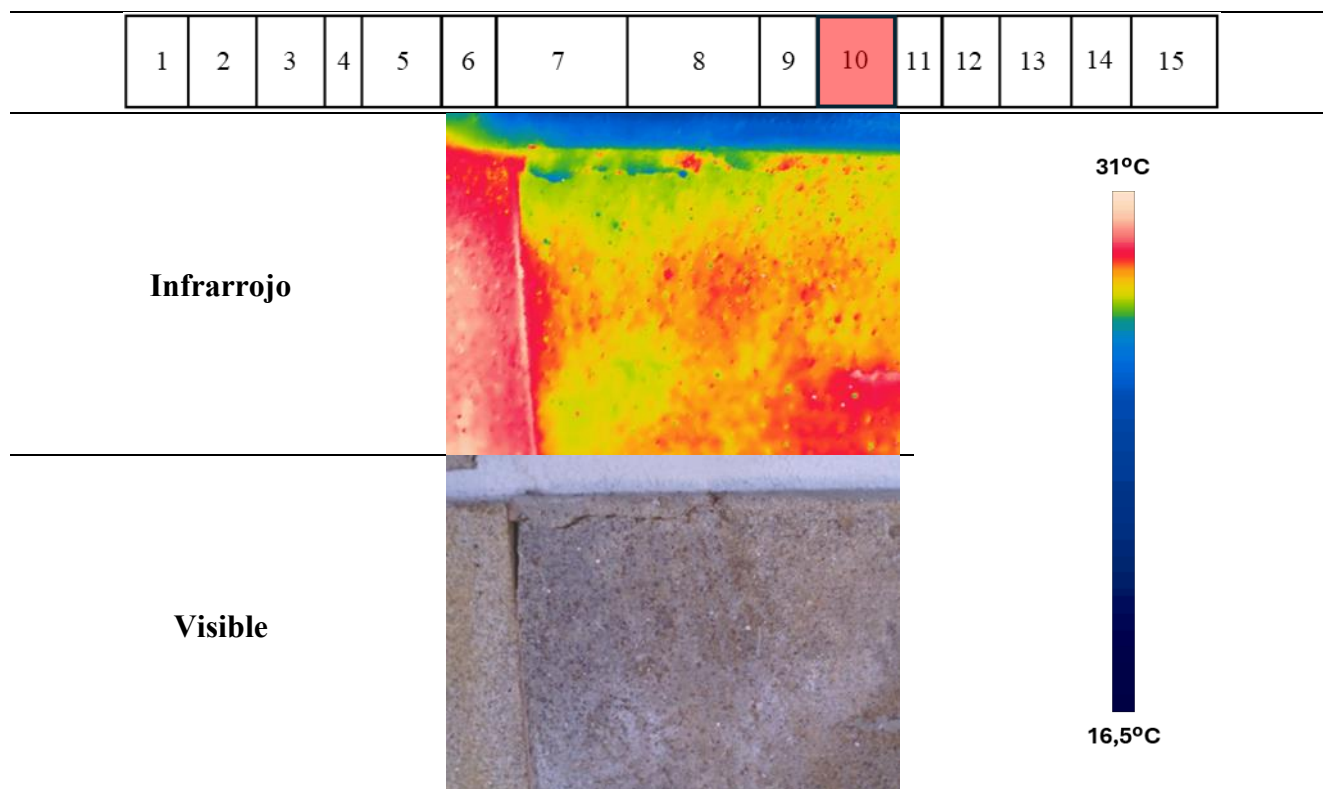


**Tabla 4-20 Registro termográfico infrarrojo y visible de la zona 1 identificada en la Estación 2, sillar 10
(Elaboración propia)**

En esta captura, se identifica que, tras la excitación térmica, en la zona inferior izquierda queda una mancha que no se excita tanto térmicamente, lo cual podría ser indicio de un foco de humedad que mantiene la superficie a una temperatura inferior, ya que en un proceso de calentamiento la evaporación de humedad es un fenómeno endotérmico.

Simultáneamente, el análisis permite detectar otra anomalía significativa en la esquina superior izquierda, donde se aprecia un área de retención térmica que coincide con un desprendimiento físico ya iniciado. La firma térmica en esta zona muestra una temperatura elevada y aislada del resto del bloque, lo que ratifica la existencia de una cámara de aire interna. El calor aplicado queda confinado en la delgada capa superficial debido al efecto aislante del despegue de la piedra, lo que permite delimitar la extensión real de la zona con falta de adherencia más allá de lo que es visible a simple vista.

Zona 2

La segunda zona analizada (**TABLA 4-21**) se corresponde con la zona central del sillar 14 de la Estación 2. En ella se observa nuevamente el espectro infrarrojo, la imagen visible y la escala de temperatura.

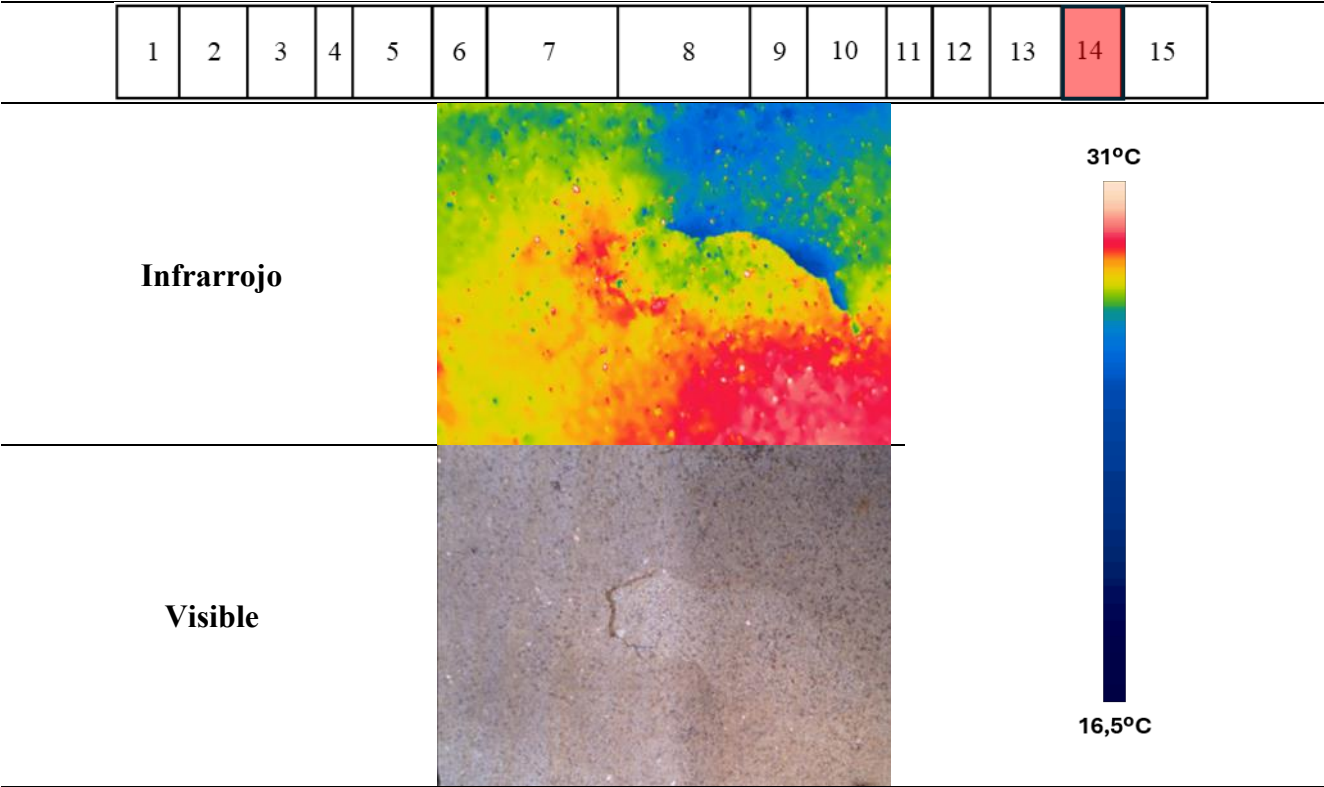


Tabla 4-21 Registro termográfico infrarrojo y visible de la zona 2 identificada en la Estación 2, sillar 14 (Elaboración propia)

En esta segunda captura de termografía activa, se observa la evolución del flujo térmico tras la aplicación de calor. El área afectada por el desprendimiento presenta una mayor persistencia térmica, en concreto en el borde ratificando de nuevo la existencia de una cámara de aire interna, manteniéndose en temperaturas superiores respecto al granito circundante.

Este comportamiento confirma que la falta de adherencia no es un daño superficial puntual, sino que existe una cámara de aire interna que rompe la continuidad térmica del sillar. Mientras que el resto del paramento disipa el calor hacia el interior del muro por conducción, la zona degradada queda aislada, permitiendo delimitar mediante la escala de temperaturas la extensión real de la bolsa de despegue. Esta capacidad de la termografía activa para dimensionar el área afectada resulta crítica para la evaluación de riesgos, evidenciando que la superficie comprometida es significativamente mayor a la grieta observable en la imagen convencional.

Zona 3

En la **TABLA 4-22** se observa la primera zona de interés de la Estación 3, la parte inferior izquierda del sillar 1.

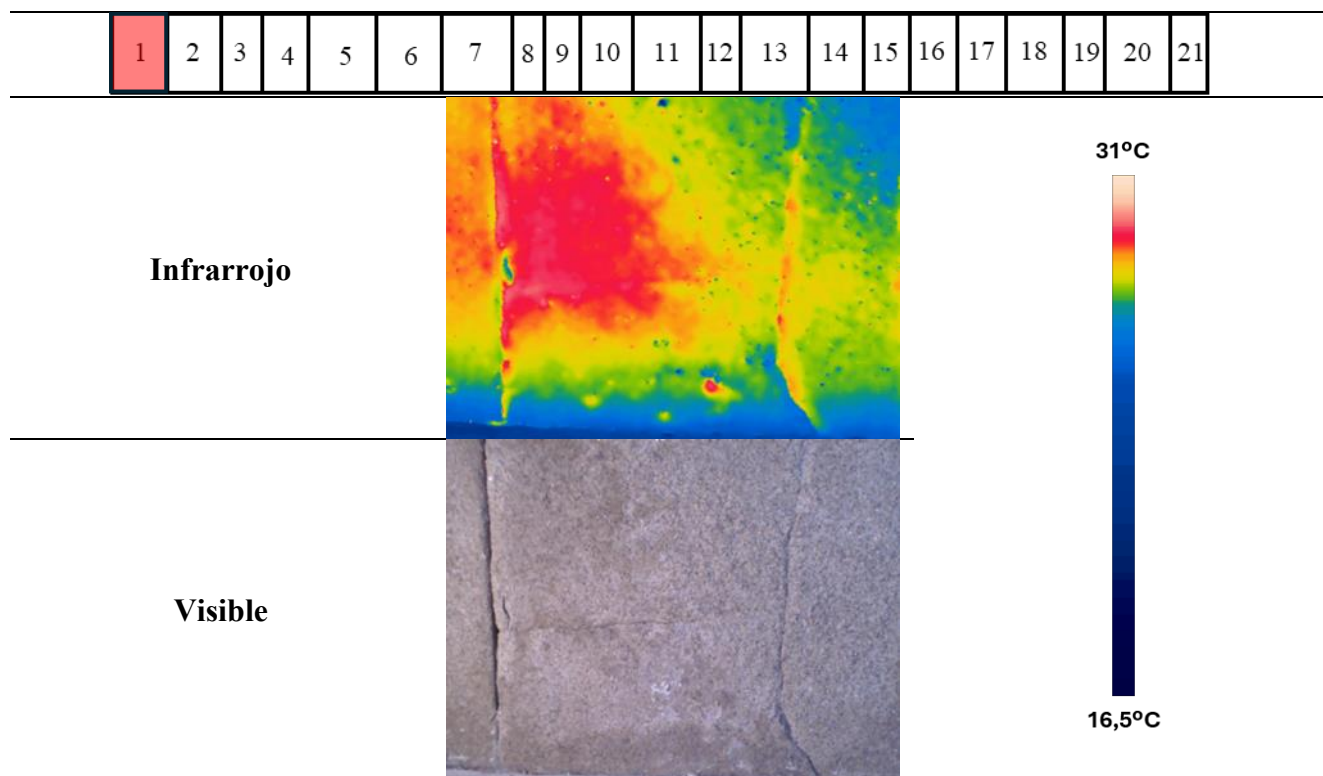


**Tabla 4-22 Registro termográfico infrarrojo y visible de la zona 3 identificada en la Estación 3, sillar 1
(Elaboración propia)**

En este caso, destaca la presencia de una discontinuidad estructural en forma de “T” girada hacia la derecha. El espectro infrarrojo revela cómo esta fractura altera drásticamente el flujo térmico del elemento.

Este comportamiento indica que la grieta no es una alteración superficial, sino una rotura profunda que permite la disipación acelerada de energía, funcionando como un canal de ventilación térmica. La diferencia de temperaturas a ambos lados de la fisura confirma una pérdida de continuidad física en la red pétreo. La termografía activa permite concluir que este bloque se encuentra en un estado de fatiga avanzada, donde la fractura actúa como el principal vector de inestabilidad térmica y mecánica, facilitando además la futura entrada de agentes externos que podrían acelerar el proceso de degradación.

Zona 4

A continuación, se expone en la **TABLA 4-23** la segunda zona crítica de la Estación 3, zona superior derecha del sillar 2.

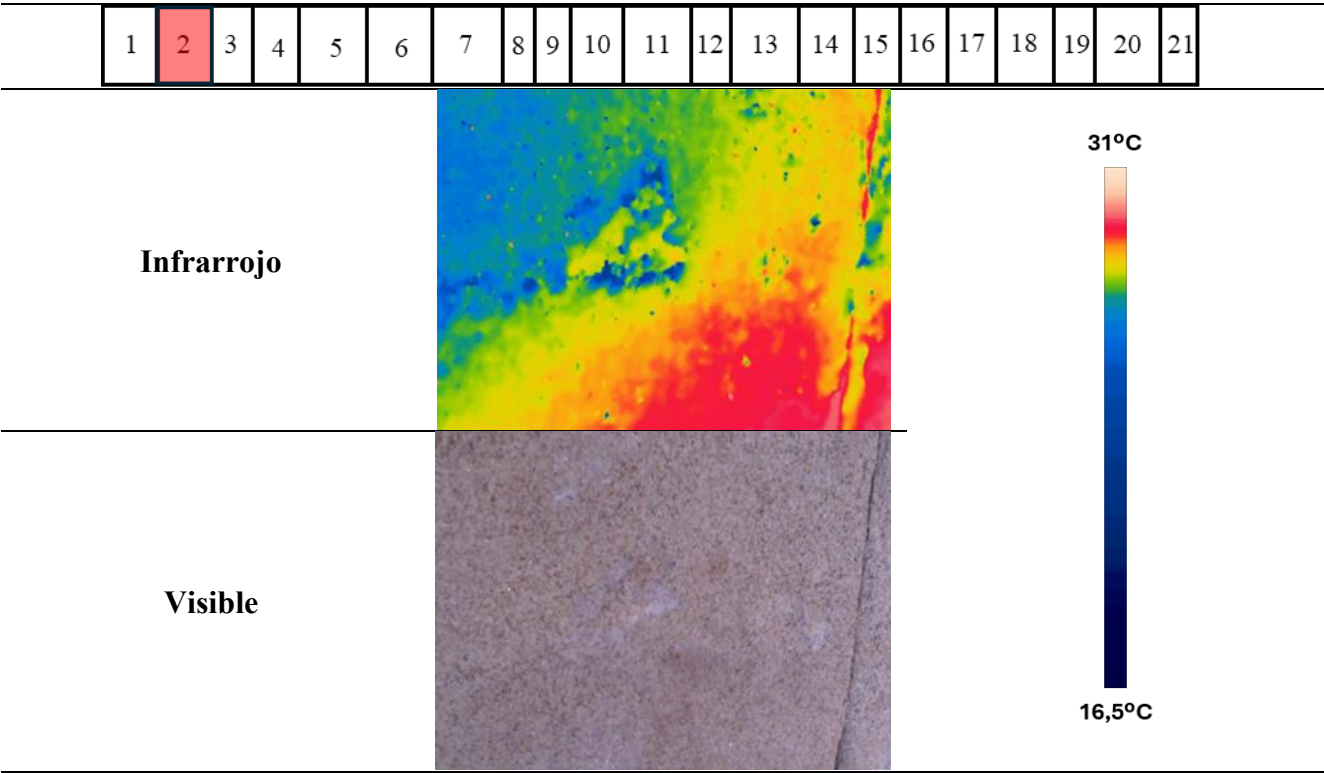


Tabla 4-23 Registro termográfico infrarrojo y visible de la zona 4 identificada en la Estación 3, sillar 2 (Elaboración propia)

En el análisis de la segunda zona crítica de la Estación 3, las captura infrarroja revela una distribución térmica altamente irregular en la superficie del sillar. Tras la excitación térmica, se aprecia una zona donde no se excita térmicamente tanto como el resto del sillar. Este comportamiento térmico es característico de superficies con porosidad alterada. La persistencia de temperaturas elevadas en áreas específicas del bloque sugiere una modificación en la emisividad del granito, probablemente causada por la presencia de depósitos o sustancias ajenas a la matriz pétreo que han penetrado en la red capilar. La termografía permite identificar aquí una patología de carácter químico (sales) o de humedad, donde el material presenta una inercia térmica distinta a la del granito sano, evidenciando una degradación del sillar que compromete su capacidad de transferencia energética y su durabilidad a largo plazo.

Zona 5

En la **TABLA 4-24** se observa la última zona de interés de la Estación 3, zona inferior izquierda del sillar 3.

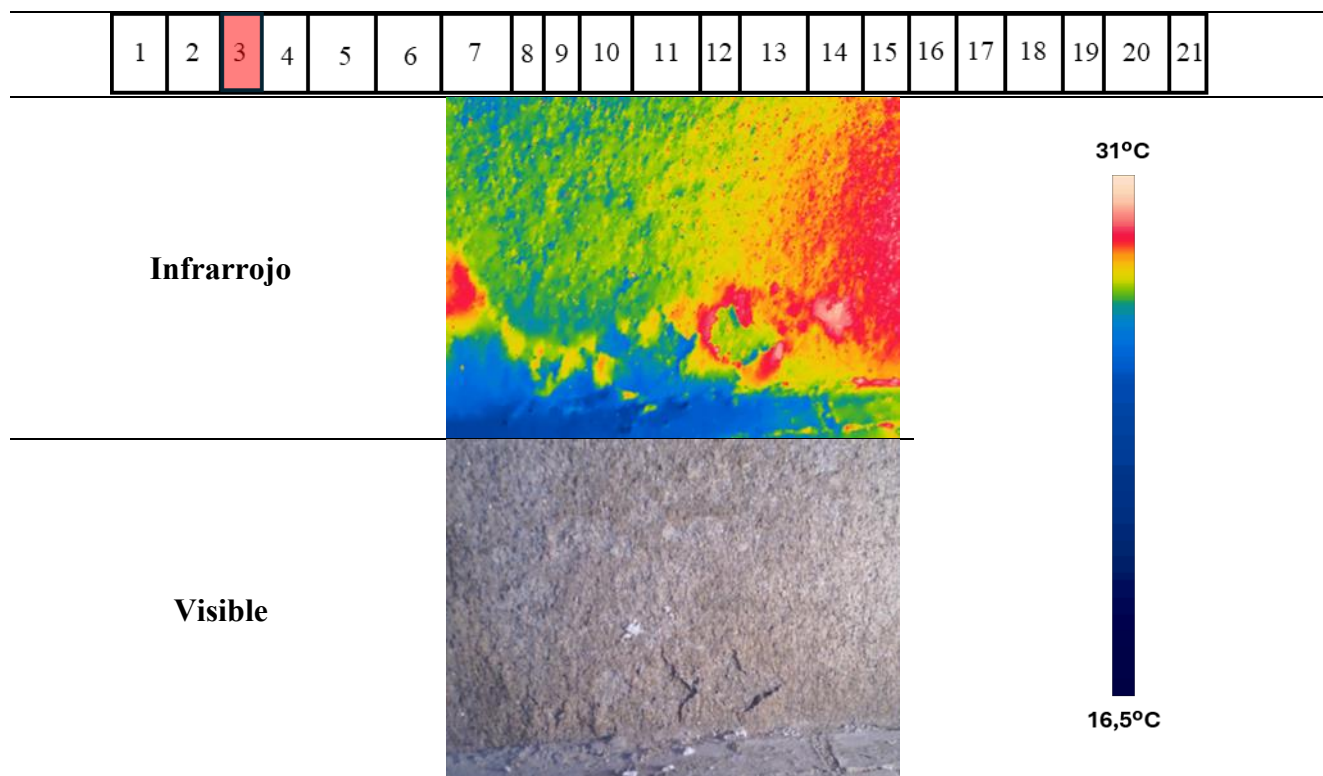


**Tabla 4-24 Registro termográfico infrarrojo y visible de la zona 5 identificada en la Estación 3, sillar 3
(Elaboración propia)**

La última zona de interés de la Estación 3 presenta una firma térmica característica de los procesos de desplazamiento y arenizado. En la imagen infrarroja se identifican varios focos de alta intensidad térmica localizados en el borde inferior del sillar, coincidiendo con las áreas donde el material ha comenzado a exfoliarse en placas delgadas.

Esta respuesta térmica confirma que dichas placas se encuentran físicamente desligadas de la matriz del sillar, generando microcámaras de aire que impiden la conducción del calor hacia el interior y provocan un sobrecalentamiento superficial rápido. La termografía activa permite concluir que la degradación en este punto es evolutiva, mostrando áreas de despegue inminente que superan en extensión a los daños apreciables en la inspección visual.

Zona 6

En la **TABLA 4-25** se presenta la zona de interés de la Estación 4, zona central del sillar 9.

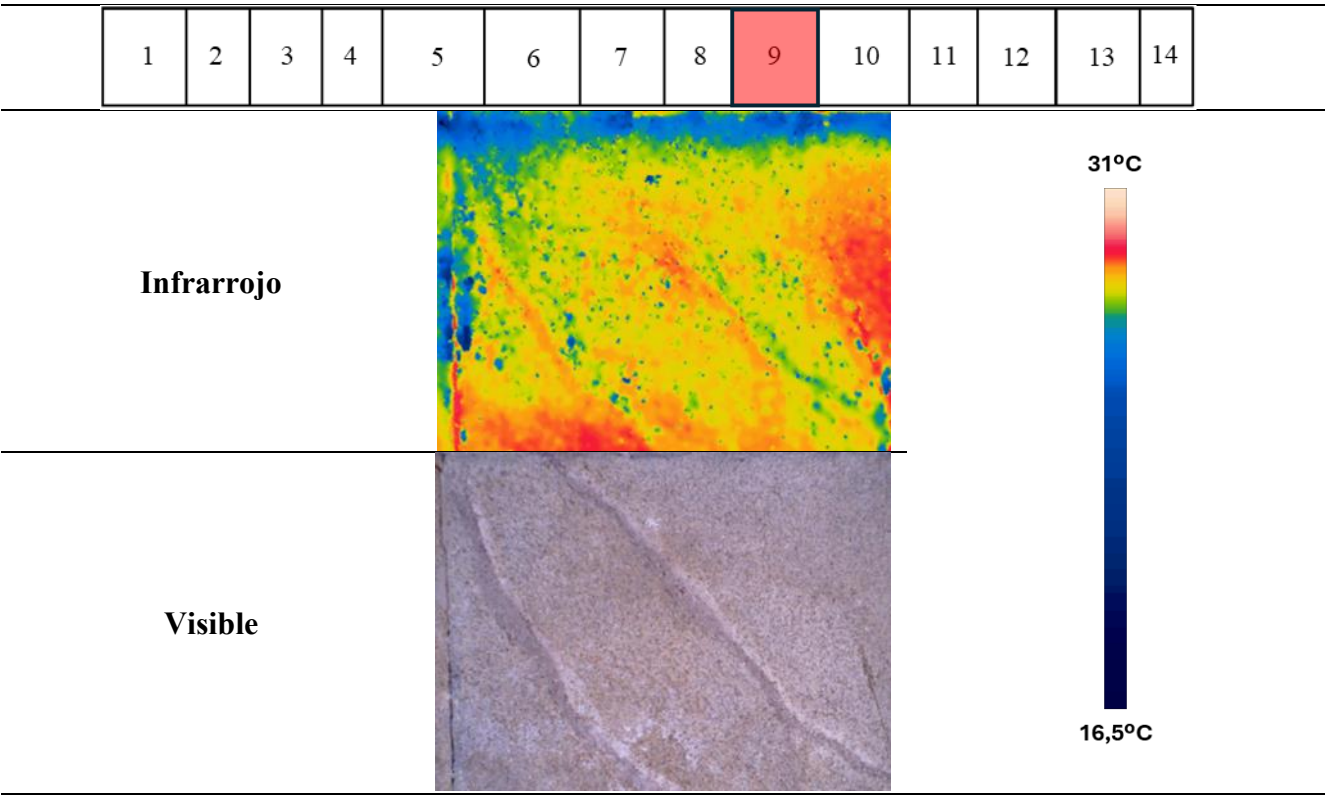


Tabla 4-25 Registro termográfico infrarrojo y visible de la zona 6 identificada en la Estación 4, sillar 9 (Elaboración propia)

En este caso se pone de manifiesto una respuesta térmica heterogénea tras la fase de excitación y se distinguen varias franjas diagonales con comportamiento térmico diferenciado, que coinciden con las líneas de alteración superficial visibles en la imagen convencional. Esta correspondencia indica que dichas marcas no son únicamente rasgos visuales, sino que están asociadas a cambios locales en las propiedades térmicas del material.

La distribución del calor en esta zona no es uniforme, ya que las bandas diagonales presentan un comportamiento distinto al del entorno inmediato. Este patrón sugiere la existencia de heterogeneidades superficiales o subsuperficiales, que podrían estar relacionadas con variaciones locales de textura, porosidad o microfisuración. En este sentido, la termografía activa permite delimitar con claridad la extensión de estas anomalías lineales, confirmando que el sillar presenta una respuesta térmica irregular en las zonas donde también se observan alteraciones en la imagen visible.

Zona 7

A continuación, se presenta en la **TABLA 4-26** la primera zona de interés de la Estación 5, zona superior del sillar 2.

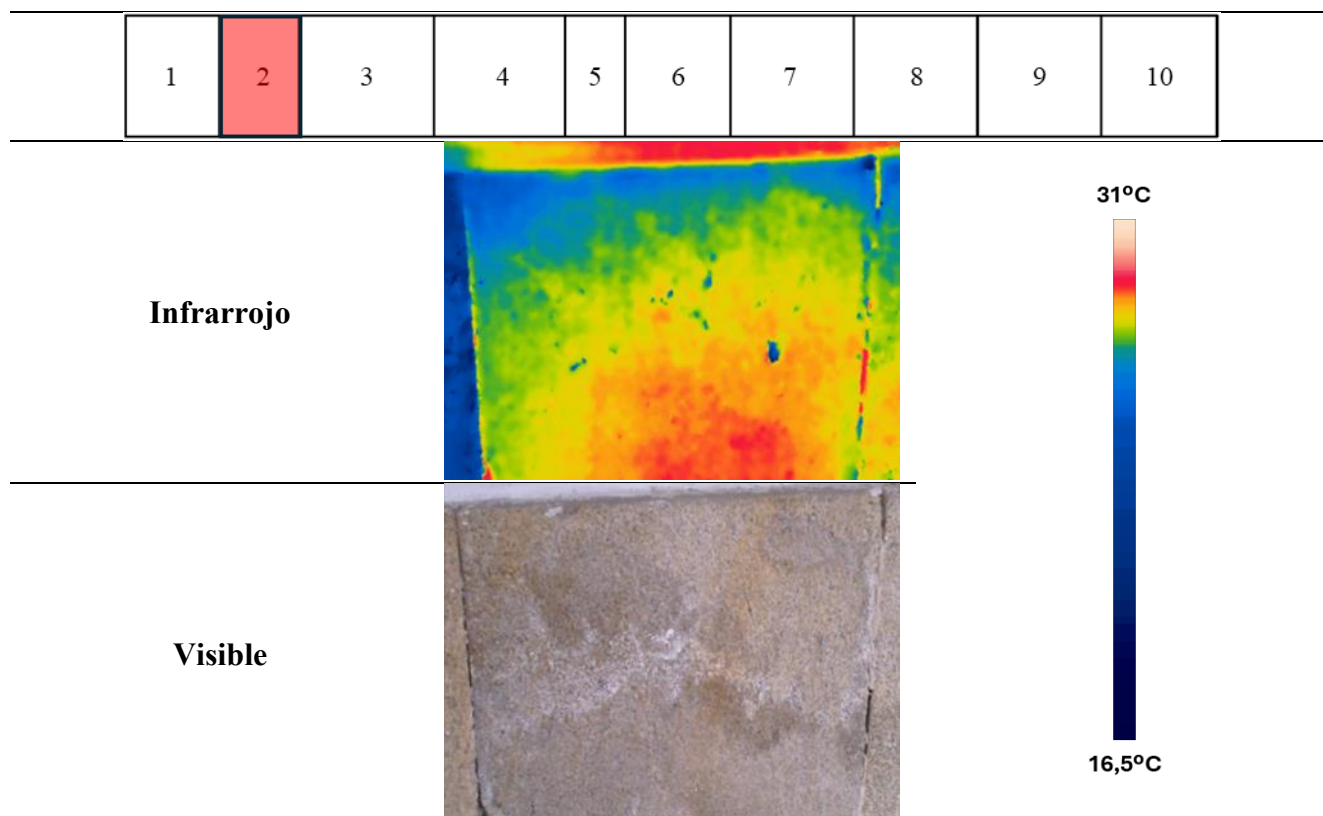


**Tabla 4-26 Registro termográfico infrarrojo y visible de la zona 7 identificada en la Estación 5, sillar 2
(Elaboración propia)**

En el área central de la zona de interés, el espectro infrarrojo revela una serie de discontinuidades térmicas puntuales que se manifiestan como pequeños focos de menor temperatura insertos en el área de mayor calentamiento. Este fenómeno es indicativo de la presencia de agentes con una capacidad calorífica distinta a la del granito, lo que sugiere la existencia de humedad interna o sales solubles.

La respuesta observada tras la excitación térmica muestra que, mientras la superficie degradada tiende a sobrecalentarse, estos puntos específicos actúan como sumideros de energía, probablemente debido a procesos de micro-evaporación o a la alteración de la conductividad provocada por la cristalización de sales en el interior del material. Esta firma térmica irregular confirma que el sillar no solo sufre una degradación física superficial (arenizado), sino que existe un transporte de fluidos y sustancias en el interior de la matriz pétreo que altera el flujo térmico normal del elemento, convirtiendo esta zona en un punto crítico de actividad patológica activa.

Zona 8

En la **TABLA 4-27** se presenta el análisis termográfico de la última zona de interés del paramento, zona central del sillar 4.

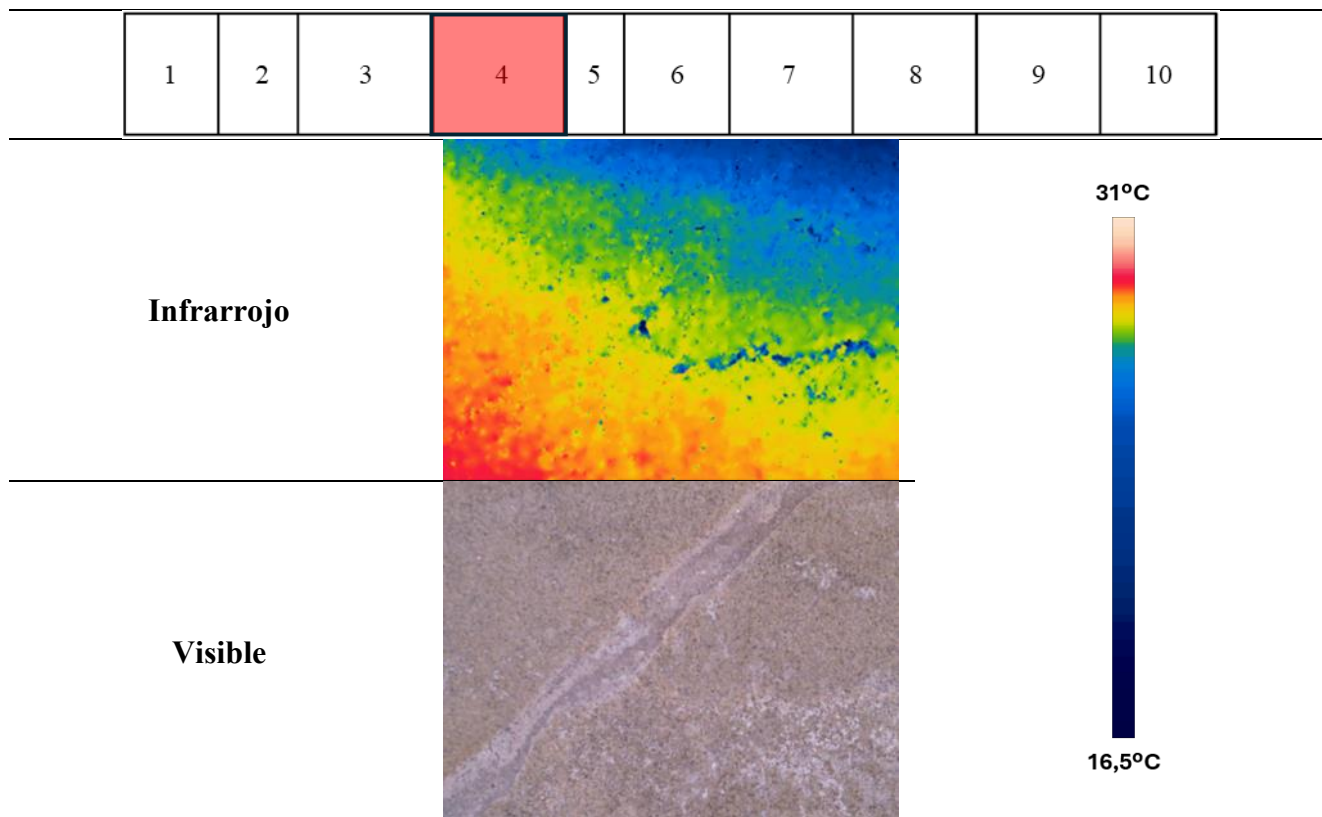


Tabla 4-27 Registro termográfico infrarrojo y visible de la zona 8 identificada en la Estación 5, sillar 4 (Elaboración propia)

En este caso se observa una distribución térmica heterogénea tras la fase de excitación. En la imagen térmica se aprecia un gradiente térmico marcado, con temperaturas más elevadas en la zona inferior de la imagen y valores progresivamente menores hacia la parte superior.

Además, se distinguen pequeñas irregularidades térmicas distribuidas a lo largo de la superficie del sillar, que indican una respuesta térmica no completamente homogénea del material. Concretamente se observa en la zona central una concentración de temperaturas inferiores a las que presenta la zona por lo que podría relacionarse con una alta concentración de sales o más concentración de humedad. Por otro lado, en la imagen visible se observa una marca superficial diagonal, que atraviesa el sillar desde la esquina superior derecha hacia la inferior izquierda. Aunque esta alteración textural es claramente identificable en la fotografía convencional, su correspondencia directa con el patrón térmico observado no resulta evidente en la imagen térmica.

4.2 Análisis cruzado de técnicas de inspección

4.2.1 Estación 1

A continuación, en la **TABLA 4-28** se presentan los resultados de la Estación 1 en conjunto. Posteriormente en la **TABLA 4-29** se muestran las escalas cromáticas que siguen los resultados.

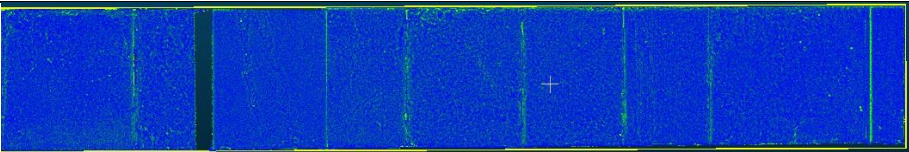
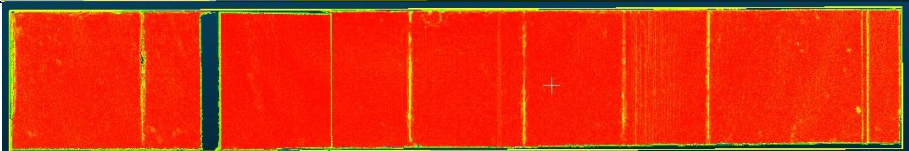
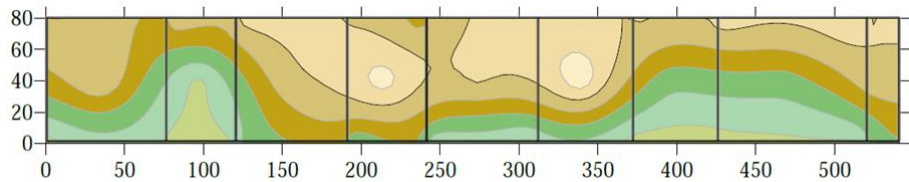
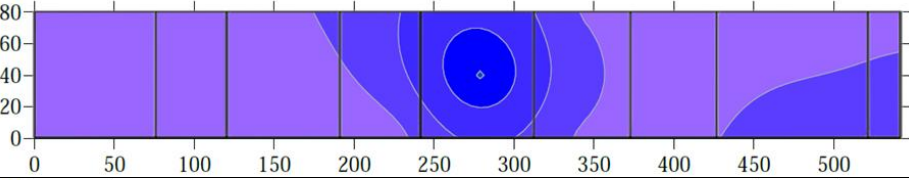
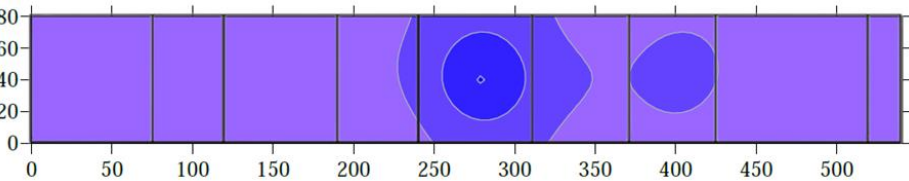
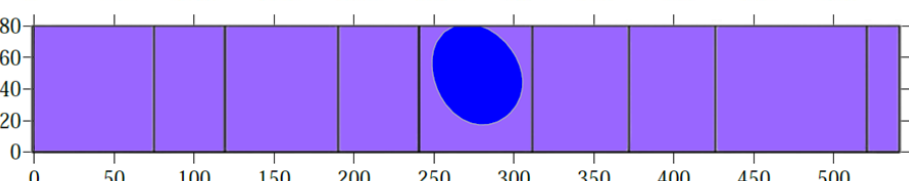
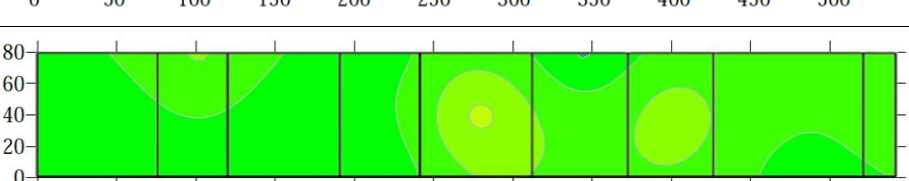
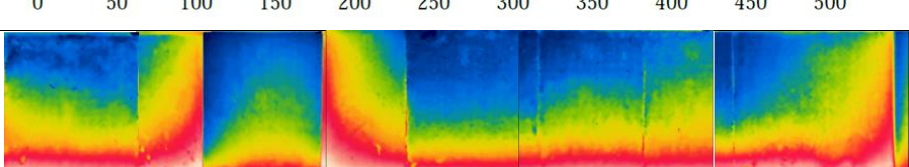
Referencia	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9
LiDAR	<i>Rugosidad</i>									
	<i>Planaridad</i>									
Humedad	-									
Sales	<i>Cloruro</i>									
	<i>Fosfato</i>									
	<i>Nitrato</i>									
	<i>Sulfato</i>									
Termografía	-									

Tabla 4-28 Síntesis de los resultados obtenidos mediante las distintas técnicas de inspección aplicadas en la Estación 1 (Elaboración propia)

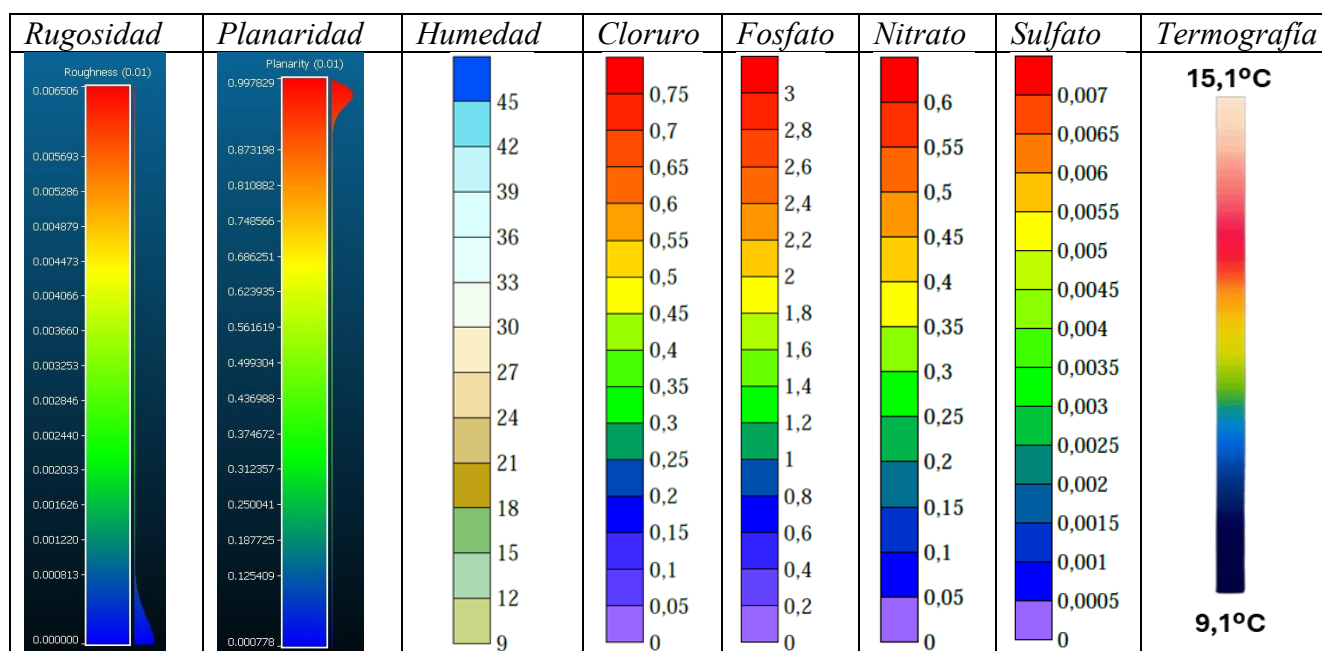


Tabla 4-29 Escalas cromáticas utilizadas para la representación de los resultados de la Estación 1

El análisis conjunto de las distintas técnicas aplicadas permite identificar ciertas coincidencias espaciales entre los factores que favorecen el deterioro del material y las manifestaciones físicas observables en el paramento. En particular, los mapas de humedad y de concentración de sales muestran focos localizados principalmente en la zona central de la estación, aproximadamente entre los sillares 3 y 6, donde se registran los valores más elevados de contenido hídrico y presencia de aniones.

Estas zonas coinciden parcialmente con sectores en los que el análisis LiDAR muestra ligeras irregularidades superficiales, reflejadas en incrementos puntuales de rugosidad y pequeñas variaciones en la planaridad respecto al comportamiento general del paramento, observable por ejemplo en el sillar 5. Aunque la geometría global se mantiene relativamente regular, estas variaciones sugieren la existencia de procesos iniciales de desgaste o pérdida superficial de material. Destacar que, en el LiDAR, aunque se ha calculado más parámetros geométricos, la de rugosidad y planaridad son los más representativos.

De forma complementaria, la termografía también evidencia ciertas anomalías térmicas localizadas, lo que indica una respuesta no completamente homogénea del material en estos mismos sectores. Estas diferencias en el comportamiento térmico pueden estar relacionadas con variaciones en las propiedades geométricas y físicas del granito, como cambios en la porosidad o en el contenido de humedad.

En conjunto, la comparación entre técnicas sugiere que las zonas donde se concentran humedad y sales corresponden con aquellas donde comienzan a manifestarse las primeras alteraciones físicas del material, siendo detectables con mejor precisión las alteraciones más maduras mediante el análisis geométrico y termográfico. Este comportamiento refuerza la idea de que las técnicas de humedad y análisis químico permiten identificar áreas con mayor potencial de degradación, mientras que LiDAR y termografía permiten observar las consecuencias materiales de dichos procesos sobre la superficie del paramento.

4.2.2 Estación 2

A continuación, en la **TABLA 4-30** se presentan los resultados de la Estación 2 en conjunto. Posteriormente en la **TABLA 4-31** se muestran las escalas cromáticas que siguen los resultados.

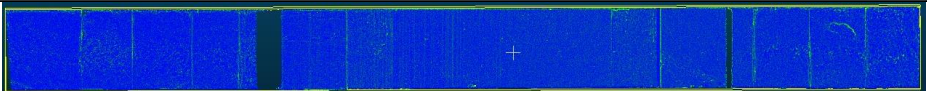
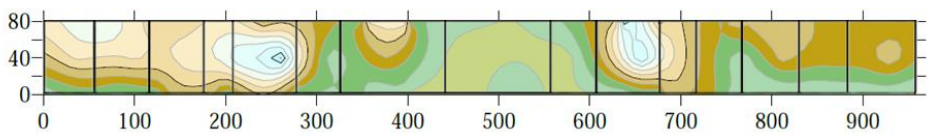
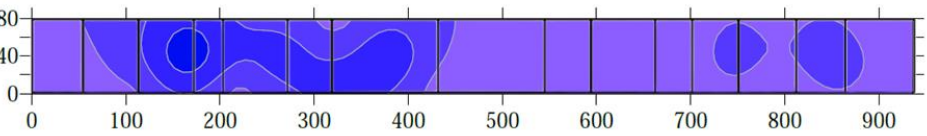
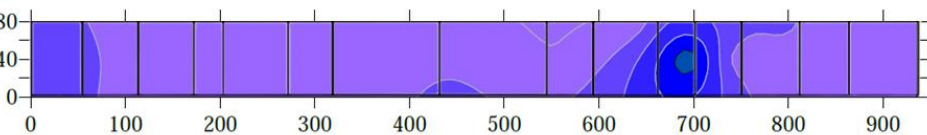
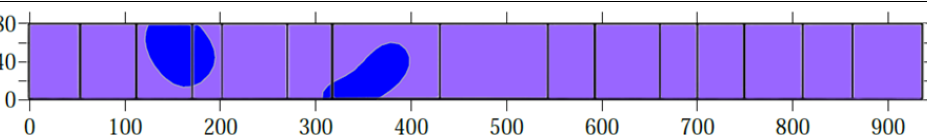
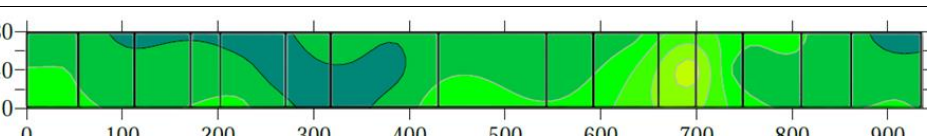
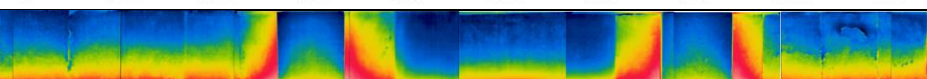
Referencia	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
LiDAR	<i>Rugosidad</i>															
	<i>Planaridad</i>															
Humedad	-															
Sales	<i>Cloruro</i>															
	<i>Fosfato</i>															
	<i>Nitrato</i>															
	<i>Sulfato</i>															
Termografia	-															

Tabla 4-30 Síntesis de los resultados obtenidos mediante las distintas técnicas de inspección aplicadas en la Estación 2 (Elaboración propia)

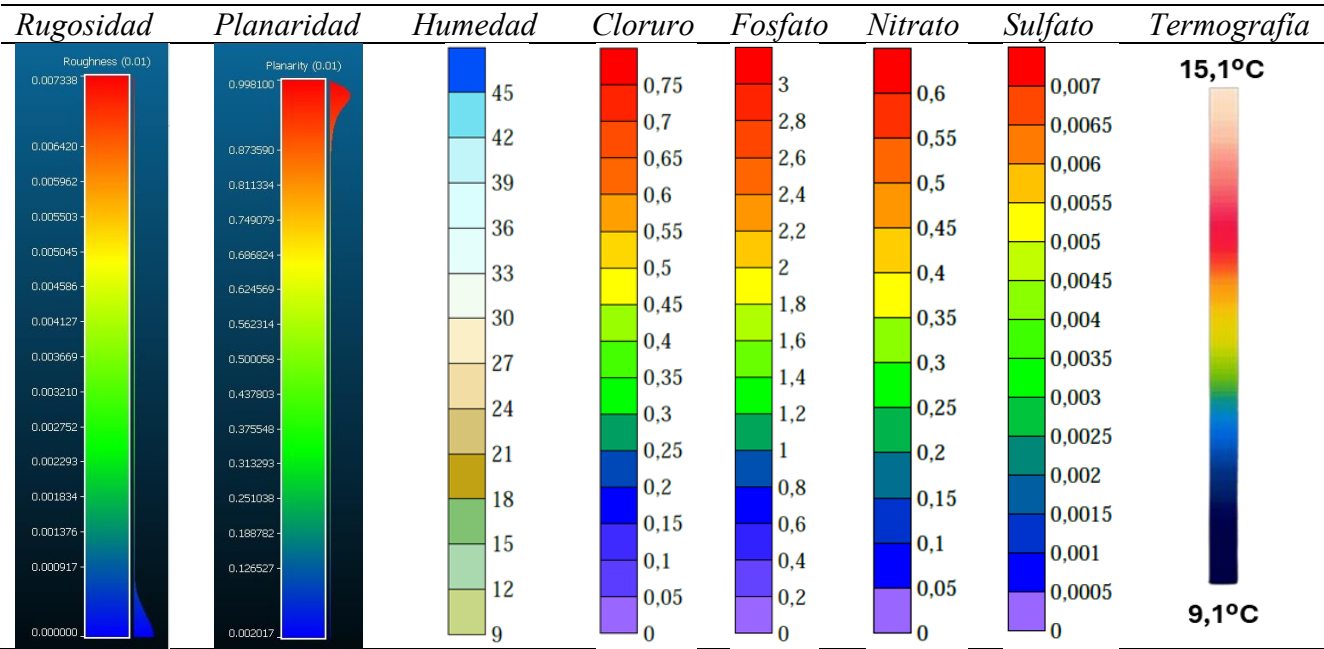


Tabla 4-31 Escalas cromáticas utilizadas para la representación de los resultados de la Estación 2 (Elaboración propia)

El análisis conjunto de las técnicas aplicadas en la Estación 2 permite identificar varias coincidencias espaciales entre las zonas donde se concentran los factores que favorecen el deterioro del material y aquellas en las que comienzan a observarse manifestaciones físicas de alteración en el paramento.

El mapa de humedad muestra focos localizados con valores elevados principalmente en los sillares 5 y 10, donde se alcanzan valores próximos a 35–40 %WME, así como un foco adicional en la parte superior de los primeros bloques. Esta distribución irregular del contenido hídrico indica la existencia de sectores donde el material presenta una mayor capacidad de retención de humedad.

El análisis de sales refuerza esta tendencia. Los mapas de cloruros, fosfatos, sulfatos y nitratos muestran acumulaciones puntuales que coinciden en parte con las zonas donde previamente se habían identificado mayores contenidos de humedad.

Estas áreas también presentan correspondencia con los resultados obtenidos mediante LiDAR, donde se detectan pequeñas irregularidades superficiales reflejadas en incrementos locales de la rugosidad y ligeras variaciones en la planaridad, especialmente hacia los sillares del principio y de finales del tramo analizado. Aunque la geometría general del paramento continúa siendo relativamente regular, estas variaciones indican la presencia de procesos iniciales de desgaste o alteración superficial del material.

La termografía muestra igualmente anomalías térmicas en sectores concretos del paramento, particularmente en la zona de los sillares 13, 14 y 15, donde se observa una respuesta térmica más irregular y con más “ruido”.

En conjunto, la comparación entre técnicas indica que las zonas donde se concentran humedad y sales corresponden con aquellas en las que comienzan a detectarse manifestaciones físicas del deterioro, observables mediante LiDAR y termografía. Este patrón refuerza la interpretación de del mapeo de humedad y de sales donde se permite identificar áreas con mayor potencial de degradación, mientras que las técnicas geométricas y térmicas permiten detectar las consecuencias materiales de estos procesos en el paramento.

4.2.3 Estación 3

A continuación, en la **TABLA 4-32** se presentan los resultados de la Estación 3 en conjunto. Posteriormente en la **TABLA 4-33** se muestran las escalas cromáticas que siguen los resultados.

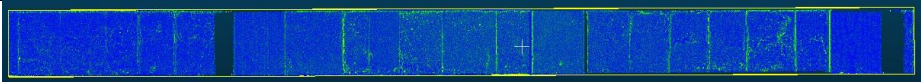
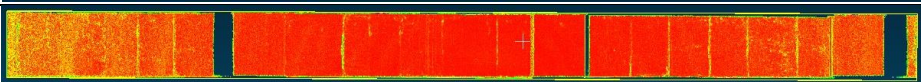
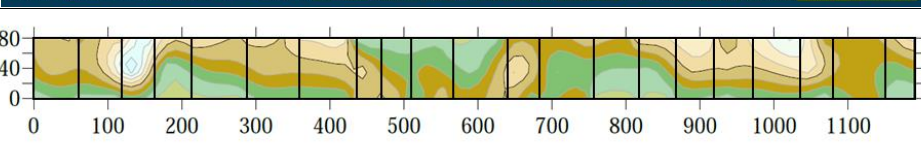
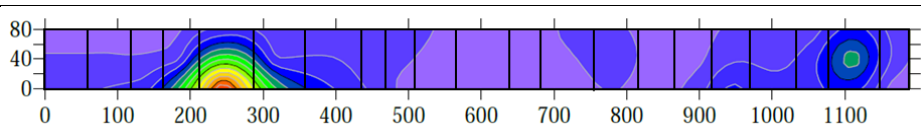
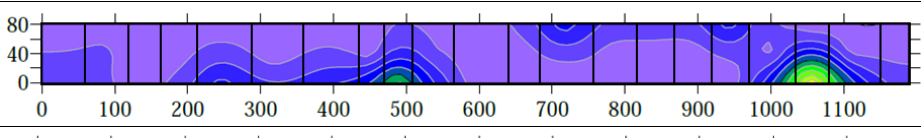
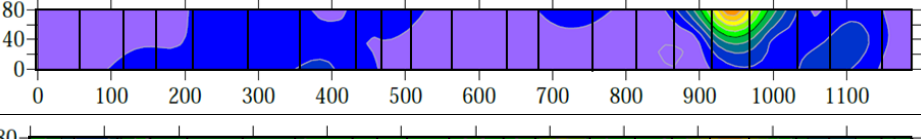
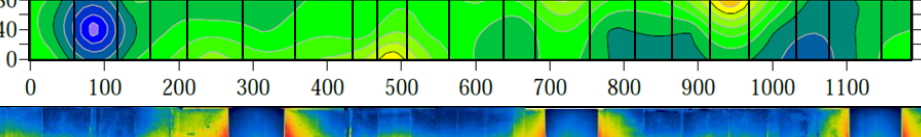
Referencia	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
LiDAR	<i>Rugosidad</i>																					
	<i>Planaridad</i>																					
Humedad	-																					
Sales	<i>Cloruro</i>																					
	<i>Fosfato</i>																					
	<i>Nitrato</i>																					
	<i>Sulfato</i>																					
Termografía	-																					

Tabla 4-32 Síntesis de los resultados obtenidos mediante las distintas técnicas de inspección aplicadas en la Estación 3 (Elaboración propia)

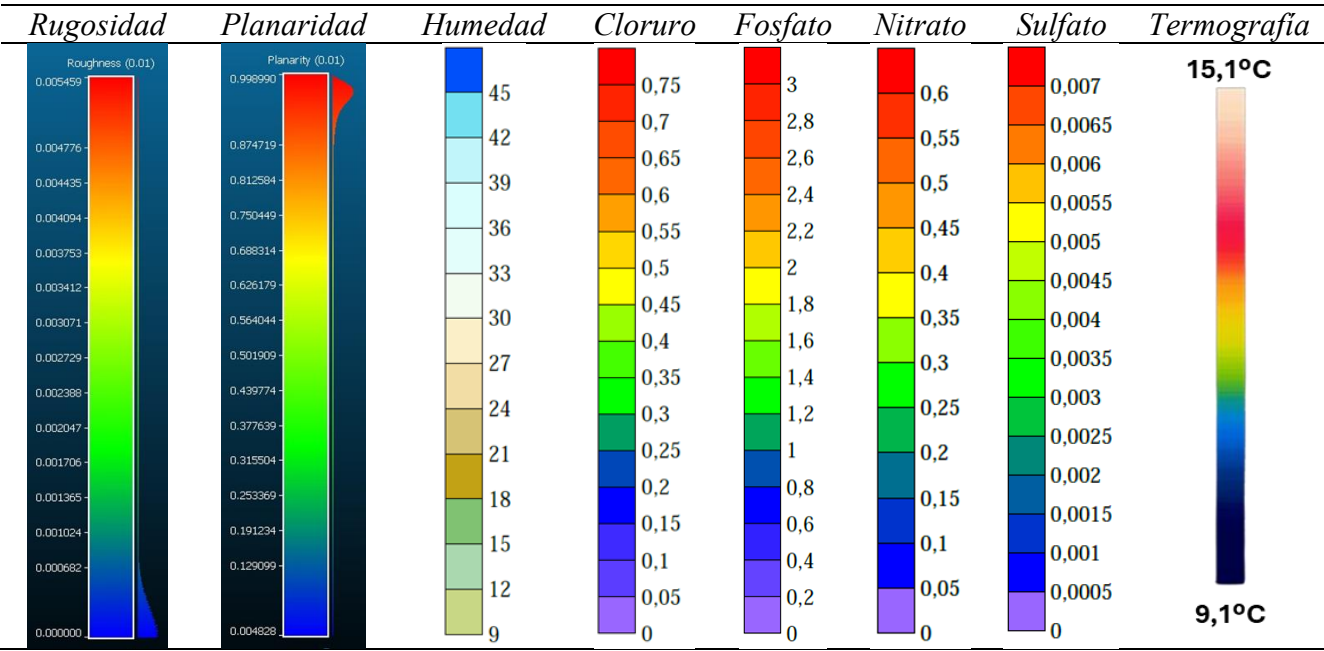


Tabla 4-33 Escalas cromáticas utilizadas para la representación de los resultados de la Estación 3 (Elaboración propia)

La Estación 3 constituye probablemente uno de los tramos donde el estado de alteración del paramento resulta más evidente, al observarse una coincidencia más clara entre los factores predisponentes al deterioro y sus manifestaciones físicas.

Por un lado, el mapa de humedad muestra varios focos con valores elevados, especialmente en los sectores correspondientes a los sillares 2–3 y en el tramo final de la estación, aproximadamente entre los sillares 16 y 18 así como al principio del tramo en el sillar 3, donde se alcanzan valores próximos a 30–35 %WME. Esta distribución se acompaña de picos muy marcados de sales, destacando especialmente los cloruros, fosfatos y nitratos, cuyos máximos se concentran en zonas que coinciden espacialmente con los focos de mayor humedad. Esta correspondencia refuerza la interpretación de que se trata de sectores donde la acumulación salina, la retención de humedad en el material es especialmente marcada.

Desde el punto de vista geométrico, el análisis LiDAR sigue mostrando una geometría general relativamente regular, pero se detectan irregularidades puntuales más significativas que en otras estaciones, especialmente en el tramo central y final del paramento, entre el sillar 8 y el 16, donde aumentan localmente la rugosidad y disminuye la uniformidad superficial. Estas variaciones son compatibles con procesos localizados de desgaste, alteración superficial o pequeñas pérdidas de material.

La termografía refuerza esta interpretación, ya que en esta estación se identificaron zonas concretas con un comportamiento térmico anómalo y con evidencias visibles de degradación. En particular, en la termografía activa se observaron procesos de arenización y desprendimiento superficial de material en la parte baja de sillares como el 3 y el 4, lo que indica que en este tramo el deterioro ya no solo se manifiesta a nivel potencial mediante humedad y sales, sino también de forma física sobre la superficie del granito.

En conjunto, la Estación 3 muestra una de las correlaciones más claras entre técnicas: las zonas con mayor contenido de humedad y mayores concentraciones de sales coinciden con aquellas donde se detectan manifestaciones materiales del deterioro, tanto en el análisis geométrico como en la respuesta

térmica. Esto permite considerar este tramo como uno de los más afectados del conjunto estudiado, al concentrar simultáneamente agentes de alteración y evidencias físicas de degradación ya desarrollada.

4.2.4 Estación 4

A continuación, en la **TABLA 4-34** se presentan los resultados de la Estación 4 en conjunto. Posteriormente en la **TABLA 4-35** se muestran las escalas cromáticas que siguen los resultados.

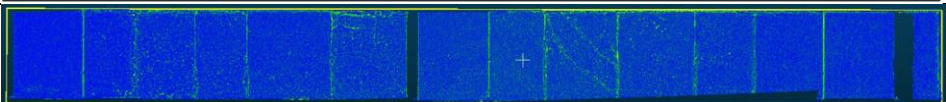
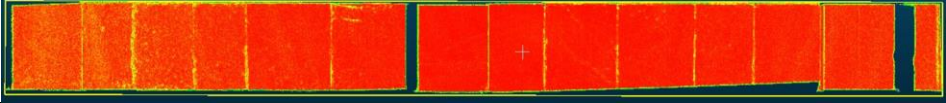
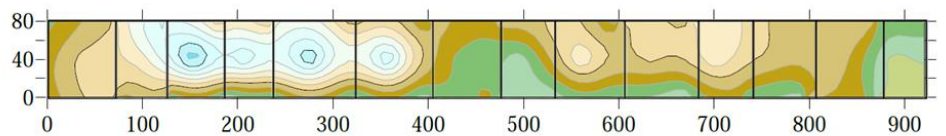
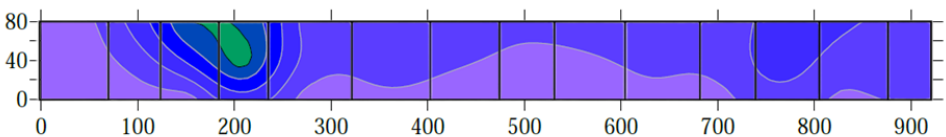
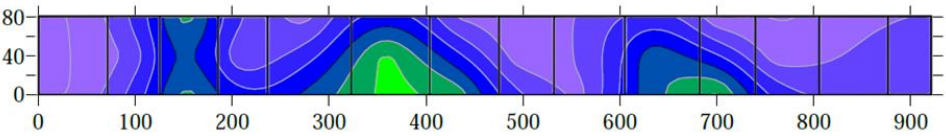
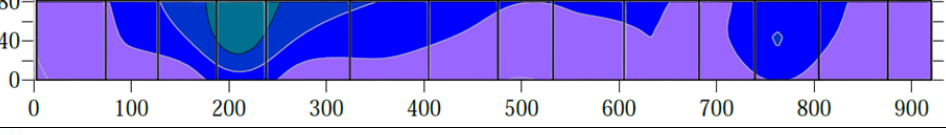
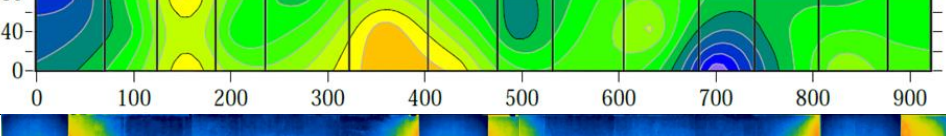
Referencia	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
LiDAR	<i>Rugosidad</i>														
	<i>Planaridad</i>														
Humedad	-														
Sales	<i>Cloruro</i>														
	<i>Fosfato</i>														
	<i>Nitrato</i>														
	<i>Sulfato</i>														
Termografía	-														

Tabla 4-34 Síntesis de los resultados obtenidos mediante las distintas técnicas de inspección aplicadas en la Estación 4 (Elaboración propia)

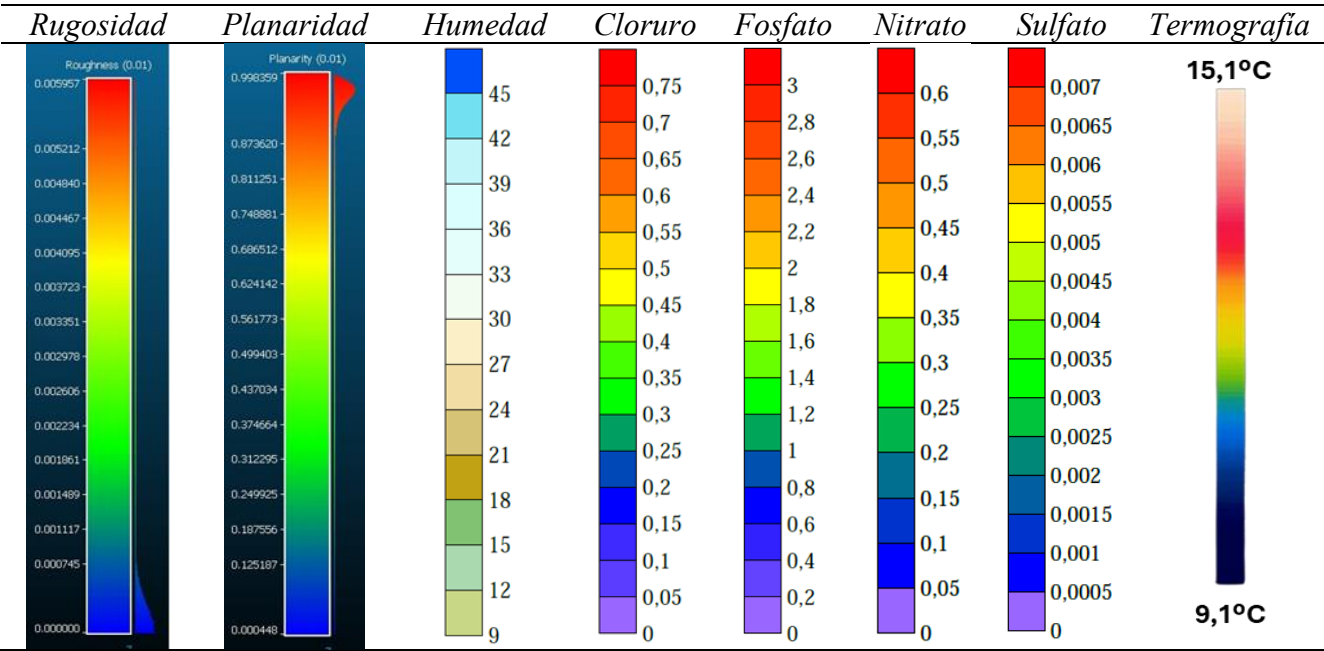


Tabla 4-35 Escalas cromáticas utilizadas para la representación de los resultados de la Estación 4 (Elaboración propia)

El análisis conjunto de las técnicas aplicadas en la Estación 4 sigue una tendencia similar al resto. El mapa de humedad revela una distribución irregular, con concentraciones relativamente elevadas en la zona inicial del tramo, especialmente en los sillares 2–6, donde se alcanzan valores próximos a 30–35 %WME. A partir de esta zona, los valores disminuyen progresivamente hacia el centro y el extremo final de la estación, donde predominan contenidos de humedad más moderados.

Los mapas de sales muestran igualmente acumulaciones localizadas, destacando especialmente los cloruros y nitratos en torno a los sillares próximos al inicio del tramo, así como ciertas concentraciones de fosfatos y sulfatos en sectores centrales. Estas zonas presentan una correspondencia espacial razonable con los focos de mayor humedad, lo que sugiere nuevamente la presencia de áreas donde se favorece la retención de agua y la acumulación de sales solubles en el material pétreo.

Desde el punto de vista geométrico, el análisis LiDAR indica que el paramento mantiene una geometría globalmente regular, con valores bajos de rugosidad y elevada planaridad. No obstante, se detectan pequeñas irregularidades puntuales, especialmente asociadas a juntas entre sillares y a algunos bloques concretos, como el sillar 9, donde aparecen estrías o discontinuidades superficiales que generan ligeros incrementos de rugosidad.

La termografía confirma la presencia de un gradiente térmico basal muy marcado, asociado al ascenso de humedad desde la base del paramento. El flujo térmico asciende desde el contacto con el terreno hacia el interior del material, generando contrastes térmicos acusados entre la parte inferior y superior de los sillares. Además, las juntas verticales muestran una respuesta térmica más intensa, actuando como discontinuidades donde el calor se transmite con mayor facilidad, lo que sugiere una posible degradación o pérdida de capacidad impermeabilizante del mortero de rejuntado, además del sillar 9.

En conjunto, la comparación entre técnicas indica que la Estación 4 presenta focos de humedad y acumulaciones de sales que coinciden con discontinuidades geométricas y térmicas del paramento. Aunque el LiDAR no detecta pérdidas de material significativas, la coincidencia de estos factores sugiere zonas con potencial activo de deterioro, especialmente en el inicio del tramo y en áreas asociadas a juntas

constructivas. Asimismo, en zonas afectadas por patologías ya poco activas, su efecto sigue siendo detectable mediante LiDAR y termografía, pese a presentar bajos contenidos de humedad y sales (como el sillar 9). De forma inversa, en el tramo inicial se observan altas concentraciones de humedad y sales sin detección por las otras técnicas, lo que indica una fase incipiente del deterioro.

4.2.5 Estación 5

A continuación, en la **TABLA 4-36** se presentan los resultados de la Estación 5 en conjunto. Posteriormente en la **TABLA 4-37** se muestran las escalas cromáticas que siguen los resultados.

Referencia	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
LiDAR	<i>Rugosidad</i>										
	<i>Planaridad</i>										
Humedad	-										
Sales	<i>Cloruro</i>										
	<i>Fosfato</i>										
	<i>Nitrato</i>										
	<i>Sulfato</i>										
Termografía	-										

Tabla 4-36 Síntesis de los resultados obtenidos mediante las distintas técnicas de inspección aplicadas en la Estación 5 (Elaboración propia)

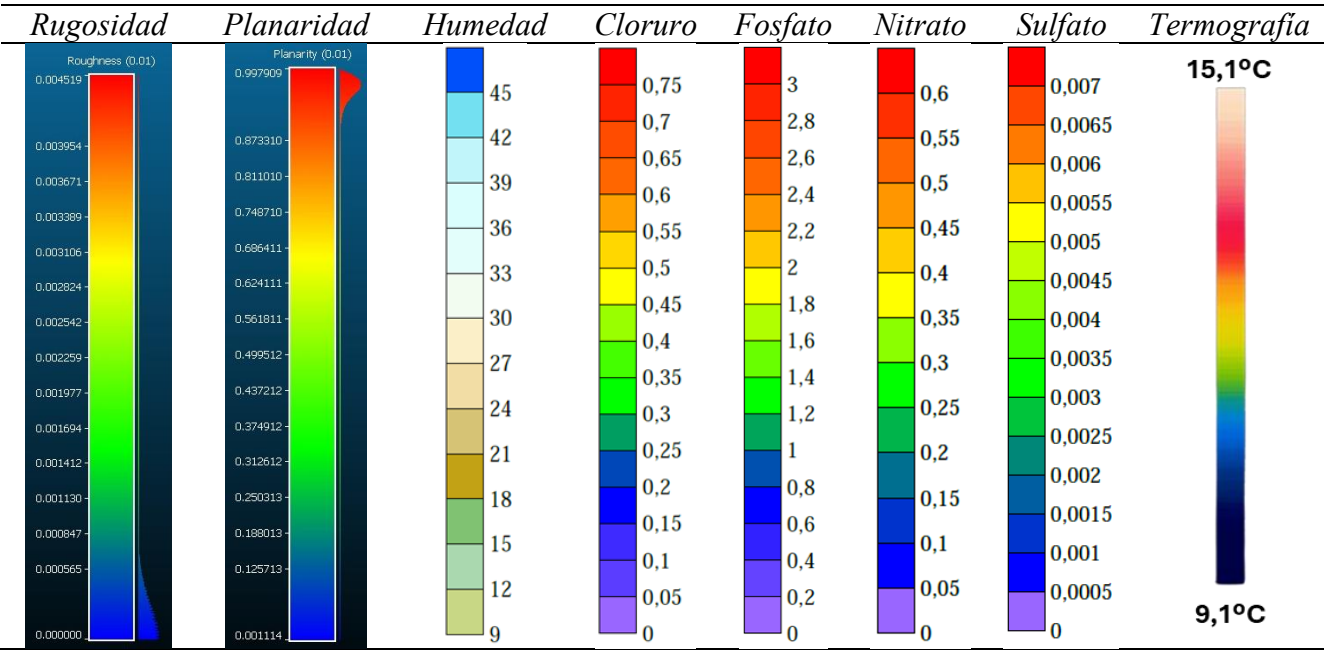


Tabla 4-37 Escalas cromáticas utilizadas para la representación de los resultados de la Estación 5 (Elaboración propia)

La Estación 5 presenta, en comparación con las anteriores, un estado general más favorable, observándose una menor coincidencia entre los factores de deterioro y sus manifestaciones físicas en el paramento.

El mapa de humedad muestra un patrón claramente decreciente a lo largo del tramo, con valores más elevados en la zona inicial, especialmente en los sillares 2 y 3, donde se alcanzan valores próximos a 30–35 %WME, y una disminución progresiva hacia el resto del paramento, donde predominan valores moderados o bajos. Esta distribución indica una presencia de humedad más localizada y menos persistente que en estaciones anteriores.

En cuanto a las sales, se identifican acumulaciones puntuales, destacando especialmente los fosfatos en la zona central y, en menor medida, ciertas concentraciones de nitratos y sulfatos. No obstante, estas acumulaciones no presentan una correspondencia tan clara ni tan extendida con los focos de humedad como en estaciones como la 3 o la 4, lo que sugiere una menor intensidad de los procesos de interacción agua–sales en este tramo.

Desde el punto de vista geométrico, el análisis LiDAR refleja un comportamiento muy homogéneo, con valores bajos de rugosidad y elevada planaridad en prácticamente toda la superficie. Las pequeñas irregularidades detectadas se concentran principalmente en juntas y en puntos muy localizados, como la estría observada en el sillar 4, sin que se identifiquen evidencias claras de pérdida de material significativa.

La termografía muestra un gradiente térmico basal similar al observado en otras estaciones, asociado al ascenso de humedad, aunque con menor intensidad. Las discontinuidades térmicas se concentran principalmente en las juntas entre sillares, sin evidenciar anomalías térmicas destacadas que indiquen procesos avanzados de degradación, a excepción del sillar 4.

En conjunto, la Estación 5 presenta una correlación más débil entre humedad, sales y manifestaciones físicas, lo que indica un estado de alteración menos avanzado. Las concentraciones de humedad y sales parecen actuar más como factores potenciales de deterioro que como causas de procesos

ya materializados, en contraste con lo observado en estaciones más afectadas como la Estación 3. A la inversa ocurre con el LiDAR y la termografía, técnicas más enfocadas al análisis de procesos patológicos ya materializados. Cuando las cuatro técnicas coinciden en la misma área detectada, se asocia a un proceso de deterioro intermedio.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

El presente Trabajo Fin de Grado ha permitido evaluar el estado de conservación de un paramento pétreo mediante la aplicación conjunta de distintas técnicas no destructivas, demostrando la utilidad de un enfoque multimétodo en el ámbito del diagnóstico constructivo.

Una de las principales conclusiones del trabajo es que las distintas técnicas empleadas no solo aportan información complementaria, sino que permiten abordar el problema desde perspectivas diferentes. Por un lado, técnicas como el escaneado láser terrestre (LiDAR) y la termografía infrarroja han demostrado ser especialmente eficaces en la detección de superficies deterioradas donde el efecto patológico ya se ha materializado o está en su fase final. En el caso del LiDAR, mediante el análisis de parámetros geométricos de la nube de puntos, se han podido identificar irregularidades superficiales y pérdidas de material. De forma análoga, la termografía ha permitido detectar anomalías térmicas asociadas a la presencia de discontinuidades internas, como capas de aire o zonas con pérdida de cohesión, de humedad y de acumulación de sales, que se manifiestan como diferencias de comportamiento térmico.

Por otro lado, técnicas como el análisis de sales solubles y el mapeo de humedad no evidencian directamente daños físicos, pero sí permiten identificar los procesos que los originan. En este sentido, la presencia de humedad y la acumulación de sales se han revelado como factores determinantes en el deterioro del material, actuando como indicadores tempranos de degradación antes de que se produzcan manifestaciones visibles. En el caso de que las cuatro técnicas empleadas coincidieran en espacio y tiempo indica un estado de deterioro intermedio, mientras que, si los contenidos de humedad y sales son inferiores y se detectan superficies dañadas, se considera que se encuentra en un estado de deterioro avanzado.

En conjunto, el trabajo pone de manifiesto que mientras algunas técnicas permiten detectar el daño ya desarrollado, otras permiten anticipar su aparición. La combinación de todas ellas proporciona una visión global del estado del paramento, facilitando no solo el diagnóstico, sino también la prevención de futuras patologías mediante fases de corrección a aplicar para evitar y mejorar las condiciones estructurales del paramento.

En resumen, el estudio confirma la idoneidad del uso de técnicas no destructivas en el análisis del patrimonio construido, permitiendo obtener información detallada sin alterar el material y facilitando la toma de decisiones en intervenciones de conservación.

5.2 Lecciones aprendidas

El desarrollo del trabajo ha permitido extraer una serie de aprendizajes que van más allá de los resultados obtenidos y que resultan relevantes para futuros estudios similares.

En primer lugar, se ha comprobado la importancia de no interpretar los resultados de forma aislada. En varias ocasiones, una técnica por sí sola podía llevar a conclusiones incompletas o incluso erróneas, mientras que su combinación con otras permitía entender correctamente el fenómeno observado y el estado de alteración en el que se encontraba.

También se ha puesto de manifiesto que no todas las técnicas detectan el mismo tipo de patología. Inicialmente, se podría asumir que todas permiten identificar directamente el deterioro, sin embargo, el trabajo ha evidenciado que algunas técnicas detectan causas (humedad, sales) mientras que otras detectan consecuencias (pérdidas de material, discontinuidades). Esta distinción resulta clave a la hora de interpretar los resultados. Puesto que en el caso de que solo se detecten altos contenidos de humedad y sales, pero no se detecten defectos geométricos indica que se encuentra en un estado temprano de deterioro. En el caso de que coincidan las cuatro técnicas indica un estado de deterioro intermedio y en el caso de detectarse defectos geométricos pero contenido de humedad y sales menores indica un estado de deterioro avanzado.

Por último, el trabajo ha puesto de manifiesto que los procesos de deterioro no responden a un único mecanismo, sino a la acción conjunta de distintos factores como la humedad, la presencia de sales y las condiciones ambientales. Esta interacción dificulta el diagnóstico si se aborda desde una única técnica, reforzando la necesidad de un enfoque combinado que permita interpretar correctamente el estado del material

5.3 Líneas futuras

A partir de los resultados obtenidos, se plantean las siguientes líneas de trabajo futuro:

- Realizar una evaluación cuantitativa de los resultados cruzados del paramento analizado.
- Ampliar el estudio a un mayor número de paramentos o zonas, con el fin de validar los resultados y establecer patrones de comportamiento más generalizables.
- Incorporar técnicas adicionales que permitan analizar capas más profundas del material, como georradar (*Ground Penetrating Radar*, GPR) u otros métodos no destructivos complementarios.
- Realizar campañas de monitorización a largo plazo para estudiar la evolución temporal de la humedad, las sales y los procesos de deterioro del paramento estudiado.
- Profundizar en el análisis cuantitativo de la correlación entre variables mediante herramientas estadísticas o modelos predictivos.
- Explorar la aplicación de técnicas de inteligencia artificial para el procesamiento automático de nubes de puntos y termografías, orientadas a la detección de anomalías.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. J. Carretero-Ayuso y M. T. Pinheiro-Alves, «Classification of the most common pathology processes in foundation slabs: Learning from failures», *Engineering Failure Analysis*, vol. 127, p. 105537, sep. 2021, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105537.
- [2] S. Ngah Abdul Wahab, N. Rusli, I. Mohammad Ali, y M. Y. Hamid, «Building Defects in the Coastal Environment of Malaysia: An Investigation of the Main Agents and Contributing Factors», *IJARBSS*, vol. 13, n.º 4, p. Pages 1488-1503, abr. 2023, doi: 10.6007/IJARBSS/v13-i4/16773.
- [3] B. Riveiro y M. Solla, Eds., *Non-Destructive Techniques for the Evaluation of Structures and Infrastructure*. London: CRC Press, 2016. doi: 10.1201/b19024.
- [4] Y. El Masri y T. Rakha, «A scoping review of non-destructive testing (NDT) techniques in building performance diagnostic inspections», *Construction and Building Materials*, vol. 265, p. 120542, dic. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120542.
- [5] M. del Egidio, D. Juanes, Spain, y Instituto del Patrimonio Cultural de España, Eds., *La ciencia y el arte. II: Ciencias experimentales y conservación del patrimonio histórico*. Madrid: Ministerio de la Cultura, Secretaría general técnica, Subdirección General de Publicaciones, Información y Documentación, 2010.
- [6] «Review on Lidar Technology | Request PDF», *ResearchGate*, doi: 10.2139/ssrn.3604309.
- [7] «A State-of-the-Art Report on Building Pathology». Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://iris.unibas.it/retrieve/dd9e0b51-3025-1e84-e053-3a05fe0aa940/_pub_393%20CIB%20W86_ridotto.pdf
- [8] F. Sitzia, C. Lisci, y J. Mirão, «Building pathology and environment: Weathering and decay of stone construction materials subjected to a Csa mediterranean climate laboratory simulation», *Construction and Building Materials*, vol. 300, p. 124311, sep. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124311.
- [9] A. G. Guida y A. Pagliuca, «Comparative diagnostic as an instrument for intervention's durability», *NLD*, 2013. Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://iris.unibas.it/handle/11563/64105>

- [10] «Microsoft Word - CTE DB SE-C-diciembre2019-limpio.doc». Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-C.pdf>
- [11] A. J. Tiberio, «Puentes térmicos ¿Qué son? ¿Cómo se calculan?», Arrebol Estudio. Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.arrebolstudio.com/puentes-termicos-que-son/>
- [12] J. Singh, C. W. F. Yu, y J. T. Kim, «Building Pathology, Investigation of Sick Buildings —Toxic Moulds», *Indoor and Built Environment*, vol. 19, n.º 1, pp. 40-47, feb. 2010, doi: 10.1177/1420326X09358808.
- [13] admin y W. Cabrero Christian, «Humedades por filtración en edificios», Hydrotec. Accedido: 10 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://hydrotec.es/consejos/como-afectan-las-humedades-por-filtracion-a-la-estructura-de-los-edificios-riesgos-signos-de-advertencia-y-soluciones-efectivas/>
- [14] «Grietas en los muros y paredes», GEOSEC. Accedido: 10 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.geosec.es/descubra-por-que/grietas-en-los-muros/>
- [15] «Microsoft Word - CTE DB SE-C-diciembre2019-limpio.doc». Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/SE/DBSE-C.pdf>
- [16] «Código Técnico de la Edificación (CTE, DB-SE)».
- [17] «Inspection and condition assessment of existing timber structures», *JCE*, vol. 69, n.º 9, pp. 861-873, oct. 2017, doi: 10.14256/JCE.1994.2017.
- [18] Redaccion, «Tipos de andamios para la rehabilitación de fachadas en Madrid: seguridad y normativa actualizada», Aislamiento y Rehabilitación de Edificios A.R.E. Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://arefachadas.es/andamios-rehabilitacion-fachadas-madrid/>
- [19] A. J. Tiberio, «TERMOGRAFÍA DE BARRIO PARA REHABILITACIÓN ENERGÉTICA», Arrebol Estudio. Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.arrebolstudio.com/termografia-de-barrio-para-rehabilitacion-energetica/>
- [20] «Tres formas de determinar la distancia con LiDAR - YellowScan». Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.yellowscan.com/es/knowledge/three-ways-to-determine-distance-using-lidar/>
- [21] «Humedad por capilaridad -¿Qué es? -Soluciones y tratamientos», deepEX. Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://deepex.net/humedad/capilaridad/>
- [22] G. Antón Martínez, I. (advisor) Garrido González, y L. (advisor) Pérez Rial, «Utilización de cámaras termográficas low cost para la búsqueda automatizada de defectos constructivos mediante técnicas de deep learning», abr. 2024, Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://calderon.cud.uvigo.es/handle/123456789/767>
- [23] «Staging - Polyisocyanurate Insulation Manufacturers Association (PIMA)». Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://staging-pima.site-ym.com/>

- [24] J. M. S. Lema, «Desalación del paño este de la Capilla de la Virgen de los Ojos Grandes de la Catedral de Santa María de Lugo». Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://cud.uvigo.es/trabajos-en-base-al-art-60-losu/>
- [25] «Moisture mapping benefits in moisture inspections», Tramex Meters. Accedido: 12 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://tramexmeters.com/learn/moisture-mapping-benefits-in-moisture-inspections>
- [26] I. Garrido, S. Lagüela, y P. Arias, «Infrared Thermography's Application to Infrastructure Inspections», *Infrastructures*, vol. 3, n.º 3, p. 35, sep. 2018, doi: 10.3390/infrastructures3030035.
- [27] «Infrared Thermography's Application to Infrastructure Inspections». Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2412-3811/3/3/35>
- [28] «Revisión de la Ley de Planck y su distribución». Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://geocities.ws/climmarsal/Ley_de_Planck.html
- [29] G. A. Martínez, I. G. González, y L. P. Rial, «Utilización de cámaras termográficas low cost para la búsqueda automatizada de defectos constructivos mediante técnicas de deep learning».
- [30] «Qué es la Emisividad? | Fluke Process Instruments». Accedido: 12 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.flukeprocessinstruments.com/es/service-and-support/knowledge-center/infrared-technology/what-emissivity%3F>
- [31] E. L. Ayala, «Humedad superficial en las fachadas», Soluciones Especiales. Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.solucionesespeciales.net/humedad-superficial-en-las-fachadas/>
- [32] «SurveyTEQ». Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: http://www.surveyteq.com/sub_product.php?id=39
- [33] T. Hackel, J. D. Wegner, y K. Schindler, «Contour Detection in Unstructured 3D Point Clouds», en *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, jun. 2016, pp. 1610-1618. doi: 10.1109/CVPR.2016.178.
- [34] «ClimaPilot - Ecoline Productos - UMAREX GmbH & Co. KG - Laserliner». Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://laserliner.com/es/ecoline-artikel-es/4021563735181-climapilot.html>
- [35] «Legend Brands | SurveyMaster». Accedido: 9 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.legendbrandseurope.com/es/productos/surveymaster/>
- [36] «Technically Speaking | How Does a Moisture Meter Work?» Accedido: 10 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.protimeter.com/how-does-a-moisture-meter-work>
- [37] «Tesis», Departamento de Mineralogía y Petrología. Accedido: 10 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://minpet.ugr.es/investigacion/tesis>
- [38] «Cámara térmica avanzada FLIR E85 | Flir». Accedido: 5 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.flir.com/es-es/products/e85/>

- [39] «ELECTRO URQUIZA», ELECTRO URQUIZA. Accedido: 10 de marzo de 2026. [En línea].
Disponible en: <https://tienda.maselectrourquiza.com/>

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El presente trabajo analiza el estado de conservación de determinados elementos constructivos de la Escuela Naval Militar mediante la aplicación de técnicas de diagnóstico no destructivo (NDT), como el análisis de nubes de puntos obtenidas mediante tecnología LiDAR, la evaluación de la humedad en materiales pétreos, el estudio de la presencia de sales solubles en los paramentos y la termografía infrarroja para el estudio térmico de estructuras. Este tipo de análisis presenta diversas implicaciones en el ámbito social, económico y ambiental, que se describen a continuación.

SEGURIDAD Y CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO

La identificación temprana de patologías en los materiales de construcción permite detectar procesos de deterioro antes de que evolucionen hacia daños estructurales más graves. La presencia de humedad, la cristalización de sales o la degradación superficial de los materiales pueden provocar fisuras, pérdida de material o alteraciones en el comportamiento mecánico de los elementos constructivos. En entornos costeros, como el de la Escuela Naval Militar, estos procesos pueden verse acelerados debido a la acción de aerosoles marinos y la acumulación de sales procedentes del ambiente, lo que hace especialmente relevante el seguimiento del estado de los edificios y su mantenimiento periódico.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO NO DESTRUCTIVO

El empleo de técnicas no destructivas constituye una herramienta fundamental en el estudio del estado de conservación de edificios e infraestructuras. A diferencia de los métodos tradicionales, que pueden requerir la extracción de muestras o la intervención directa sobre los materiales, estas técnicas permiten obtener información relevante sin alterar la integridad de los elementos analizados. Entre las ventajas de estas metodologías destacan la posibilidad de realizar inspecciones rápidas, la reducción de los daños asociados al propio proceso de análisis y la obtención de información detallada sobre el comportamiento de los materiales.

IMPACTO ECONÓMICO DEL MANTENIMIENTO DE EDIFICIOS

El diagnóstico adecuado de las patologías constructivas permite planificar de forma más eficiente las actuaciones de mantenimiento y rehabilitación. Detectar los problemas en fases tempranas evita que los daños evolucionen hacia estados más avanzados que requieran intervenciones más complejas y costosas. Por este motivo, el estudio sistemático de los procesos de deterioro en edificios constituye una herramienta clave para optimizar los recursos destinados al mantenimiento del parque edificatorio y prolongar la vida útil de las estructuras.

CONSIDERACIONES AMBIENTALES

La aplicación de técnicas no destructivas también presenta ventajas desde el punto de vista ambiental. Al no requerir intervenciones invasivas sobre los materiales, se reduce la generación de residuos y se evita la alteración innecesaria de los elementos constructivos. Además, el conocimiento detallado del comportamiento higrotérmico de los edificios puede contribuir a mejorar su eficiencia energética y favorecer estrategias de conservación más sostenibles a lo largo del tiempo.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El desarrollo del presente trabajo se ha realizado siguiendo criterios de rigor científico, objetividad y responsabilidad profesional. Las metodologías empleadas se basan en técnicas de diagnóstico no destructivo aplicadas al estudio del estado de conservación de elementos constructivos, lo que permite obtener información relevante sin alterar ni dañar los materiales analizados. Este enfoque resulta especialmente adecuado en el ámbito de la ingeniería y la conservación del patrimonio construido, ya que prioriza la mínima intervención sobre los elementos estudiados.

Asimismo, el trabajo se ha llevado a cabo respetando los principios de integridad académica y transparencia en el tratamiento de la información, citando adecuadamente las fuentes bibliográficas utilizadas y evitando cualquier forma de plagio o uso indebido de datos. Desde una perspectiva profesional, la correcta evaluación del estado de los edificios mediante técnicas de diagnóstico contribuye a mejorar la seguridad de las construcciones, optimizar los recursos destinados al mantenimiento y favorecer una gestión más responsable y sostenible del patrimonio edificado.

ANEXO III: DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

En el desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado se ha recurrido al uso de herramientas basadas en inteligencia artificial como apoyo en tareas de redacción y revisión lingüística del documento.

El uso de estas herramientas se ha limitado exclusivamente a la reformulación de textos, mejora de la claridad expositiva y corrección gramatical, con el objetivo de lograr una expresión más precisa y adecuada al contexto académico. En ningún caso se han empleado para la generación de contenido técnico, resultados, análisis o conclusiones.

Todos los contenidos desarrollados en este trabajo, incluyendo la metodología, el tratamiento de datos, la interpretación de resultados y las conclusiones, son fruto del trabajo personal del autor. Asimismo, se ha llevado a cabo una revisión crítica de todos los textos generados o modificados con apoyo de estas herramientas, garantizando su veracidad, coherencia y adecuación al ámbito de estudio.

El uso de inteligencia artificial se ha realizado, por tanto, como una herramienta de apoyo, manteniendo en todo momento la autoría, responsabilidad y control sobre el contenido final del documento.

ANEXO IV: ESPECIFICACIONES FLIR E85

Features By Camera	E75	E85	E95
IR Resolution	320 x 240	384 x 288	464 x 348
Object Temperature Range	-20°C to 120°C (-4°F to 248°F) 0°C to 650°C (32°F to 1200°F) Optional 300°C to 1000°C (572°F to 1830°F)	-20°C to 120°C (-4°F to 248°F) 0°C to 650°C (32°F to 1200°F) 300°C to 1200°C (572°F to 2192°F)	-20°C to 120°C (-4°F to 248°F) 0°C to 650°C (32°F to 1200°F) 300°C to 1500°C (572°F to 2732°F)
Time-lapse (Infrared)	No	No	10 sec to 24 hours
Measurement Features by Camera			
Area Measurement Information	No	Yes	Yes
Spotmeter	1 in live mode	3 in live mode	3 in live mode
Area	No	3 in live mode	3 in live mode
Common Features	Exx-Series		
Detector Type and Pitch	Uncooled microbolometer, 17 µm		
Thermal Sensitivity/NETD	< 0.03°C @ 30°C (86°F)		
Spectral Range	7.5 - 14.0 µm		
Image Frequency	30 Hz		
Field of View (FOV)	24° x 18° (17 mm lens), 42° x 32° (10 mm lens), 14° x 10° (29 mm lens)		
F-Number	f/1.3, f/1.1		
Lens Identification	Automatic		
Focus	Continuous, one-shot laser distance meter (LDM), one-shot contrast, manual		
Digital Zoom	1-4x continuous		
Image Presentation and Modes			
Display	4", 640 x 480 optically-bonded PCAP touchscreen, with 400 cd/m² surface brightness		
Digital Camera	5 MP, 53° x 41° FOV		
Color Palettes	Iron, Gray, Rainbow, Arctic, Lava, Rainbow HC		
Image Modes	Infrared, visual, MSX®, Picture-in-Picture		
Picture-in-Picture	Resizable and movable		
MSX®	Embosses visual details on full resolution thermal image		
UltraMax™	Super-resolution process quadruples pixel count, activated in FLIR Tools+		
Measurement and Analysis			
Accuracy	±2°C (±3.6°F) or ±2% of reading for ambient temperature 15°C to 35°C (59°F to 95°F) and object temperature above 0°C (32°F)		
Alarms	Moisture alarm, insulation alarm, measurement alarms		
Color Alarm (Isotherm)	Above/below/interval/condensation/insulation		
Laser Distance Measurement	Yes, on-screen		
Measurement Presets	No measurement, center spot, hot spot, cold spot, User Preset 1, User Preset 2		
Compass, GPS	Yes; automatic GPS image tagging		
METERLiNK®	Yes; several readings		
Image Storage			
Storage Media	Removable SD card (8 GB)		
Image File Format	Standard radiometric JPEG, measurement data included		
Video Recording and Streaming			
Radiometric IR Video Recording	Real-time radiometric recording (.csq)		
Non-Radiometric IR or Visual Video	H.264 to memory card		
Radiometric IR Video Streaming	Yes, over UVC or Wi-Fi		
Non-Radiometric IR Video Streaming	H.264 or MPEG-4 over Wi-Fi MJPEG over UVC or Wi-Fi		
Communication Interfaces	USB 2.0, Bluetooth, Wi-Fi		
Video Out	DisplayPort over USB Type-C		
Additional Data			
Battery Type	Li-ion battery, charged in camera or on separate charger		
Battery Operating Time	Approx. 2.5 hours at 25°C (77°F) ambient temperature and typical use		
Operating Temperature Range	-15°C to 50°C (5°F to 122°F)		
Storage Temperature Range	-40°C to 70°C (-40°F to 158°F)		
Shock/Vibration/Encapsulation; Safety	25 g / IEC 60068-2-27, 2 g / IEC 60068-2-6, IP 54 / IEC 60529; EN/UL/CSA/PSE 60950-1		
Weight/Dimensions w/o Lens	1 kg (2.2 lbs), 27.8 x 11.6 x 11.3 cm (11.0 x 4.6 x 4.4 in)		
Box Contents			
Packaging	Infrared camera with lens, battery (2 ea), battery charger with power supply, front lens and light protection, straps (hand and wrist), lanyards, lens caps (front and rear), lens cleaning cloth, 15 W3 A power supply, printed documentation, 8 GB SD card, Torx screwdriver, cables (USB 2.0 A to USB Type-C, USB Type-C to HDMI, USB Type-C to USB Type-C)		

Figura Anexo III-1 Especificaciones FLIR Serie EXX