



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

CENTRO DE CIENCIAS DE DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS

TESIS

EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE DETECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE
HUMEDADES EN EDIFICIOS HISTÓRICOS

PRESENTA

ARQ. MICHELLE IVONNE LÓPEZ ESCOBAR

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON
ESPECIALIDAD EN CONSTRUCCIÓN

TUTOR:

DR. MIGUEL ÁNGEL SOTO ZAMORA

COTUTOR:

DR. RAUDEL PADILLA CENICEROS

ASESOR:

M.R.S.M. ARQ. JORGE GUADALUPE VILLANUEVA CLAVEL

AGUASCALIENTES, AGS., 27 DE NOVIEMBRE DEL 2023.

CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL

MTRA. EN ING. AMB. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA
DECANO (A) DEL CENTRO DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **TUTOR** designado del estudiante **MICHELLE IVONNE LÓPEZ ESCOBAR** con ID **339271** quien realizó la tesis titulado: **EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE DETECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE HUMEDADES EN EDIFICIOS HISTÓRICOS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 27 de noviembre de 2023.



DR. MIGUEL ÁNGEL SOTO ZAMORA
Tutor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-07
Actualización: 01
Emisión: 17/05/19

UNIVERSIDAD DE AGUASCALIENTES
FACULTAD DE INGENIERÍA

MTRA. EN ING. AMB. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA
DECANO (A) DEL CENTRO DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **COTUTOR** designado del estudiante **MICHELLE IVONNE LÓPEZ ESCOBAR** con ID **339271** quien realizó la tesis titulado: **EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE DETECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE HUMEDADES EN EDIFICIOS HISTÓRICOS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 27 de noviembre de 2023.


DR. RAUDEL PADILLA CENICEROS
Cotutor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaria Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-07
Actualización: 01
Emisión: 17/05/19

CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL

**MTRA. EN ING. AMB. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA
DECANO (A) DEL CENTRO DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN**

PRESENTE

Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **MICHELLE IVONNE LÓPEZ ESCOBAR** con ID **339271** quien realizó la tesis titulado: **EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE DETECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE HUMEDADES EN EDIFICIOS HISTÓRICOS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 27 de noviembre de 2023.

M.R.S.M. ARQ. JORGE GUADALUPE VILLANUEVA CLAVEL
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión de Calidad.
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.



Código: 00-SEE-FO-07
Actualización: 01
Emisión: 17/05/19



DICTAMEN DE LIBERACIÓN ACADÉMICA PARA INICIAR LOS TRÁMITES DEL EXAMEN DE GRADO



Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 27 de noviembre de 2023

NOMBRE: Michelle Ivonne López Escobar **ID:** 339271

PROGRAMA: Maestría en Ingeniería Civil **LGAC (del posgrado):** Área de Construcción

TIPO DE TRABAJO: () Tesis () Trabajo Práctico

TÍTULO: Evaluación de técnicas de detección y caracterización de humedades en edificios históricos

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): El trabajo se considera de importancia para instituciones encargadas de preservar los edificios históricos con el fin de determinar estudios preliminares antes de su intervención.

INDICAR	SI	NO	N.A.	(NO APLICA)	SEGÚN CORRESPONDA:
<i>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</i>					
SI					El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI					La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI					Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI					Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI					Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI					El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI					Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
N.A.					Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI					Cumple con la ética para la Investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<i>El egresado cumple con lo siguiente:</i>					
SI					Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI					Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI					Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
SI					Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI					Coincide con el título y objetivo registrado
SI					Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI					Tiene el CVU del Conacyt actualizado
N.A.					Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
<i>En caso de Tesis por artículos científicos publicados</i>					
N.A.					Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.					El estudiante es el primer autor
N.A.					El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.					En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
N.A.					Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
N.A.					La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado: SI No

Elaboró:

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

FIRMAS

Dr. Miguel Ángel Soto Zamora

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

Dr. Martín Hernández Marín

* En caso de conflicto de intereses, firmas un revisor miembro del NAR de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial asignado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

Dr. Mario Ernesto Espinosa Díaz de León

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

M. en C. Ms. Guadalupe Lara Peralta

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 109C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ... Cuidar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

Elaborado por: D. Apoyo al Posg.
Revisado por: D. Control Escolar/D. Gestión de Calidad.
Aprobado por: D. Control Escolar/ D. Apoyo al Posg.

Código: DO-SEE-FO-15
Actualización: 01
Fecha: 28/04/20

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma de Aguascalientes y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada y por darme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente y académicamente.

Al Dr. Miguel Ángel Soto Zamora agradezco las asesorías brindadas durante mi estancia.

Quiero expresar mi gratitud sincera al Dr. Raudel Padilla Ceniceros por ser un gran mentor, su dedicación y su disposición para compartir sus conocimientos han hecho una diferencia significativa en mi formación académica y por brindarme su apoyo en todo momento. Estoy segura de que las lecciones aprendidas continuarán guiándome en mi trayectoria profesional.

Al M.R.S.M ARQ. Jorge Guadalupe Villanueva Clavel por darme la oportunidad de realizar mis prácticas en el INAH donde adquirí gran conocimiento sobre patrimonio edificado, así como pasión por la historia alrededor de un edificio y sobre todo al apoyo incondicional en mi formación como hacia mi persona.

Agradezco infinitamente a mis padres Gladys Escobar Macías y J. Jesús López Ramírez por ser mi principal motivación e inspiración. Por darme esa fuerza y aliento para enfrentar los desafíos, que en conjunto con su paciencia, comprensión y amor incondicional es lo que me hace ser hoy en día. También agradezco a mis hermanos Tanya y Jhonatan que con sus pláticas y consejos me inspiran a seguir adelante y en jamás desistir. Gracias por ser mis pilares siempre.

Agradezco al Dr. Jesús Pacheco por sus palabras de motivación e interés sobre mi trabajo, que junto con sus observaciones me permitieron comprender el tema con mayor profundidad. Al Dr. Hugo Luna Villavicencio por los momentos de sencillas, por sus palabras de aliento y en especial por su amistad.

A mis amigos Carlos y Josué por haberme ayudado a pelar pencas de nopal y por cada momento que compartimos. También a Omar y Lupita con quienes pase momentos de goce, pláticas y trabajo, por eso y más, gracias.

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

DEDICATORIA



Con dedicación especial a mis padres Gladys Escobar Macías y Jesús López Ramírez por ser mi apoyo incondicional, mi inspiración y mi motor del día a día.

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN 21

1. INTRODUCCIÓN..... 21

1.1. PROTOCOLO 21

1.2. OBJETIVO GENERAL..... 22

1.3. OBJETIVOS PARTICULARES..... 23

1.4. JUSTIFICACIÓN..... 23

1.5. ALCANCES 25

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE 27

2. ESTADO DEL ARTE..... 27

2.1. MATERIALES Y SISTEMAS CONSTRUCTIVOS..... 27

2.2. APLICACIÓN DE GEOFÍSICA COMO TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS 28

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO 41

3. MARCO TEÓRICO..... 41

3.1. ANTECEDENTES 41

3.1.1. CONCEPTOS GENERALES 41

3.2. PATRIMONIO HISTÓRICO Y SU IMPORTANCIA EN EL ESTUDIO..... 41

3.3. HUMEDADES 42

3.3.1. RELACIÓN DE PUNTO DE ROCÍO, HUMEDAD RELATIVA, HUMEDAD ABSOLUTA Y ESPECÍFICA..... 42

3.3.2. TIPOS DE HUMEDADES Y SUS CARACTERÍSTICAS 43

3.4. HUMEDAD DE ABSORCIÓN O DE CAPILARIDAD 43

3.4.1. EFECTOS Y MANIFESTACIONES DE LA HUMEDAD CAPILAR 44

3.4.2. CAUSAS QUE PRODUCEN LA HUMEDAD CAPILAR 44

3.5. HUMEDAD INFILTRADA 45

3.5.1. PUNTOS MÁS VULNERABLES A LA INFILTRACIÓN..... 45

3.5.2. CIRCUNSTANCIAS QUE CONCURREN POR INFILTRACIÓN 46

3.6. HUMEDAD POR CONDENSACIÓN 46

3.6.1. CARACTERÍSTICAS DE HUMEDAD POR CONDENSACIÓN 47

3.7. HUMEDAD ACCIDENTAL 47

3.8. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE MATERIALES..... 48

3.8.1. POROSIDAD..... 48

3.8.2. ABSORCIÓN..... 49

3.8.3.	PERMEABILIDAD	49
3.9.	MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA EL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO.....	50
3.9.1.	GRAVIMETRÍA	50
3.9.2.	RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.....	50
3.9.3.	DESCRIPCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MUESTREO	50
3.9.4.	PROCEDIMIENTO DE LABORATORIO.....	51
3.9.5.	PERMEÁMETRO.....	51
3.10.	MÉTODOS NO DESTUCTIVOS	52
3.11.	CLASIFICACIÓN DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS	52
3.12.	TECNICAS E INSTRUMENTOS NO DESTRUCTIVOS PARA LA DETECCIÓN DE HUMEDADES	53
3.12.1.	MAPEO DE DAÑOS.....	53
3.12.2.	HIGRÓMETRO	54
3.12.2.1.	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL HIGRÓMETRO	54
3.12.3.	TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA (ERT)	55
3.12.3.1.	PRINCIPIOS BÁSICOS	55
3.12.3.1.1.	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	55
3.12.3.1.2.	CONDUCTIVIDAD DE LOS MATERIALES.....	56
3.12.3.1.3.	CONFIGURACIONES DE LA TÉCNICA ERT	57
3.12.4.	TERMOGRAFÍA INFRARROJA (IT).....	60
3.12.4.1.	PRINCIPIOS DE LA TERMOGRAFÍA	60
3.12.4.1.1.	RADIACIÓN INFRARROJA	60
3.12.4.1.2.	LUZ VISIBLE Y RADIACIÓN INFRARROJA.....	61
3.12.4.1.3.	PROCESOS DE RADIACIÓN INFRARROJA EN CUERPOS	61
3.12.4.1.4.	ENERGÍA	62
3.12.4.1.5.	TEMPERATURA.....	62
3.12.4.1.6.	MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	62
3.12.4.1.7.	EMISIVIDAD.....	63
3.12.4.2.	ASPECTOS IMPORTANTES PARA MEDICIONES CON CÁMARAS TERMOGRÁFICAS.....	63
3.12.4.2.1.	ENFOQUE	63
3.12.4.2.2.	NIVEL E INTERVALO.....	64
3.12.4.2.3.	MEDIDA FUERA DEL RANGO DE TEMPERATURA	64
3.12.4.2.4.	EFFECTOS DE LA DISTANCIA Y EL TAMAÑO	64

3.12.4.3. NORMATIVA APLICABLE.....	65
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA.....	67
4. METODOLOGÍA.....	67
4.1. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	67
4.1.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	67
4.1.2. ESTRATEGIAS PARA RECABAR INFORMACIÓN	67
4.1.3. INSTRUMENTOS PARA ANALIZAR INFORMACIÓN.....	67
4.1.4. HIPÓTESIS.....	67
4.1.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	68
4.2. TERMOGRAFÍA INFRARROJA.....	69
4.2.1. DESCRIPCIÓN DE EQUIPO CÁMARA TÉRMICA FLIR C3-X.....	69
4.2.1.1. CARACTERÍSTICAS	70
4.2.2. SOFTWARE FLIR TOOLS.....	70
4.2.2.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES SOFTWARE FLIR TOOLS+	70
4.2.2.2. PROCESAMIENTO	71
4.3. HIGRÓMETRO	72
4.3.1. DESCRIPCIÓN DE EQUIPO FLIR MR55	72
4.3.1.1. CARACTERÍSTICAS	72
4.3.1.2. ESPECIFICACIONES	72
4.3.1.3. MEDICIONES	73
4.3.2. SOFTWARE SIGMAPLOT.....	73
4.3.2.1. CARACTERÍSTICAS	74
4.3.2.2. PROCESAMIENTO	74
4.4. TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA (ERT)	76
4.4.1. RESISTIVÍMETRO SYSCAL JUNIOR R2PLUS.....	76
4.4.1.1. CARACTERÍSTICAS	76
4.4.1.2. APLICACIONES.....	77
4.4.1.3. ESPECIFICACIONES DE CORRIENTE DE SALIDA	77
4.4.1.4. ESPECIFICACIONES GENERALES	77
4.4.2. SOFTWARE PROSYS II	77
4.4.3. SOFTWARE RES2DINV	78
4.4.4. SOFTWARE ZONDRES2D.....	81
4.4.5. SOFTWARE SURFER 16	84

4.4.6. VOXLER.....	85
CAPÍTULO V: CAMPAÑA EXPERIMENTAL	87
5. CAMPAÑA EXPERIMENTAL	87
5.1. DISEÑO DE PROBETA.....	87
5.1.1. PROPORCIONAMIENTO	90
5.1.2. PRUEBA PILOTO.....	90
5.1.3. EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO.....	92
5.1.4. RECUBRIMIENTO	95
5.1.5. SECADO DE MUROS	97
5.1.6. PRUEBA PILOTO EN MUROS SECOS	98
CAPÍTULO VI: RESULTADOS.....	100
6. RESULTADOS.....	100
6.1. PRUEBAS EN SECO (CALIBRACIÓN).....	100
6.1.1. TERMOGRAFÍA INFRARROJA.....	100
6.1.2. HIGRÓMETRO	102
6.1.3. TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	105
6.1.3.1. CALIBRACIÓN EN MURO DE ADOBE	105
6.1.3.2. CALIBRACIÓN EN MURO DE MAMPOSTERÍA DE PIEDRA.....	106
6.2. HUMEDAD POR CAPILARIDAD	107
6.2.1. MURO DE ADOBE CON RECUBRIMIENTO	107
6.2.1.1. TERMOGRAFIA INFRARROJA.....	107
6.2.1.2. HIGRÓMETRO	110
6.2.1.3. TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	115
6.2.2. MURO DE ADOBE SIN RECUBRIMIENTO.....	116
6.2.2.1. TERMOGRAFÍA INFRARROJA.....	116
6.2.2.2. HIGRÓMETRO	119
6.2.2.3. TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	124
6.2.3. MURO DE MAMPOSTERÍA DE PIEDRA.....	125
6.2.3.1. TERMOGRAFÍA INFRARROJA.....	125
6.2.3.2. HIGRÓMETRO	129
6.2.3.3. TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	133
6.3. HUMEDAD ACCIDENTAL	134
6.3.1. MURO DE ADOBE CON RECUBRIMIENTO	134

6.3.1.1.	TERMOGRAFÍA INFRARROJA.....	134
6.3.1.2.	HIGRÓMETRO	137
6.3.2.	MURO DE ADOBE SIN RECUBRIMIENTO.....	140
6.3.2.1.	TERMOGRAFÍA INFRARROJA.....	140
6.3.2.2.	HIGRÓMETRO	142
6.3.3.	MURO DE MAMPOSTERIA DE PIEDRA.....	146
6.3.3.1.	TERMOGRAFÍA INFRARROJA.....	146
6.3.3.2.	HIGRÓMETRO	148
6.4.	HUMEDAD POR FILTRACIÓN	149
6.4.1.	MURO DE ADOBE CON RECUBRIMIENTO	149
6.4.1.1.	TERMOGRAFÍA INFRARROJA.....	149
6.4.1.2.	HIGRÓMETRO	151
6.4.2.	MURO DE ADOBE SIN RECUBRIMIENTO.....	154
6.4.2.1.	TERMOGRAFÍA INFRARROJA.....	154
6.4.2.2.	HIGRÓMETRO	156
6.4.3.	MURO DE MAMPOSTERÍA DE PIEDRA.....	159
6.4.3.1.	TERMOGRAFÍA INFRARROJA.....	159
6.4.3.2.	HIGRÓMETRO	161
CAPITULO VII DISCUSIÓN.....		166
7.	DISCUSIÓN.....	166
7.1.	CALIBRACIÓN EN MURO DE ADOBE	166
7.2.	CALIBRACIÓN EN MURO DE MAMPOSTERÍA DE PIEDRA	166
7.3.	HUMEDAD POR CAPILARIDAD EN MURO DE ADOBE.....	169
7.4.	HUMEDAD POR CAPILARIDAD EN MURO DE MAMPOSTERÍA DE PIEDRA 175	
7.5.	HUMEDAD ACCIDENTAL EN MURO DE ADOBE.....	179
7.6.	HUMEDAD ACCIDENTAL EN MURO DE MAMPOSTERÍA DE PIEDRA.....	181
7.7.	HUMEDAD POR FILTRACIÓN EN MURO DE ADOBE	181
7.8.	HUMEDAD POR FILTRACIÓN EN MURO DE MAMPOSTERIA DE PIEDRA 183	
CAPITULO VIII: CONCLUSIONES.....		186
8.	CONCLUSIONES.....	186
8.1.	CONCLUSIONES GENERALES	186
8.2.	CONCLUSIONES PARTICULARES	189

8.3. NICHOS DE INVESTIGACIÓN 189
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 190



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Valores de resistividad y conductividad en diferentes tipos de piedras. Tabla adaptada de (Loke, 2001).*..... 56

Tabla 2 *Operacionalización de variables. Elaboración propia.*..... 68

Tabla 3 *Rangos de medición y configuración del Higrómetro, adaptación del (FLIR MR55 USER MANUAL, s/f).*..... 73

Tabla 4 *Proporcionamiento para muestra de adobe en junta y recubrimiento. Tabla del autor.*90

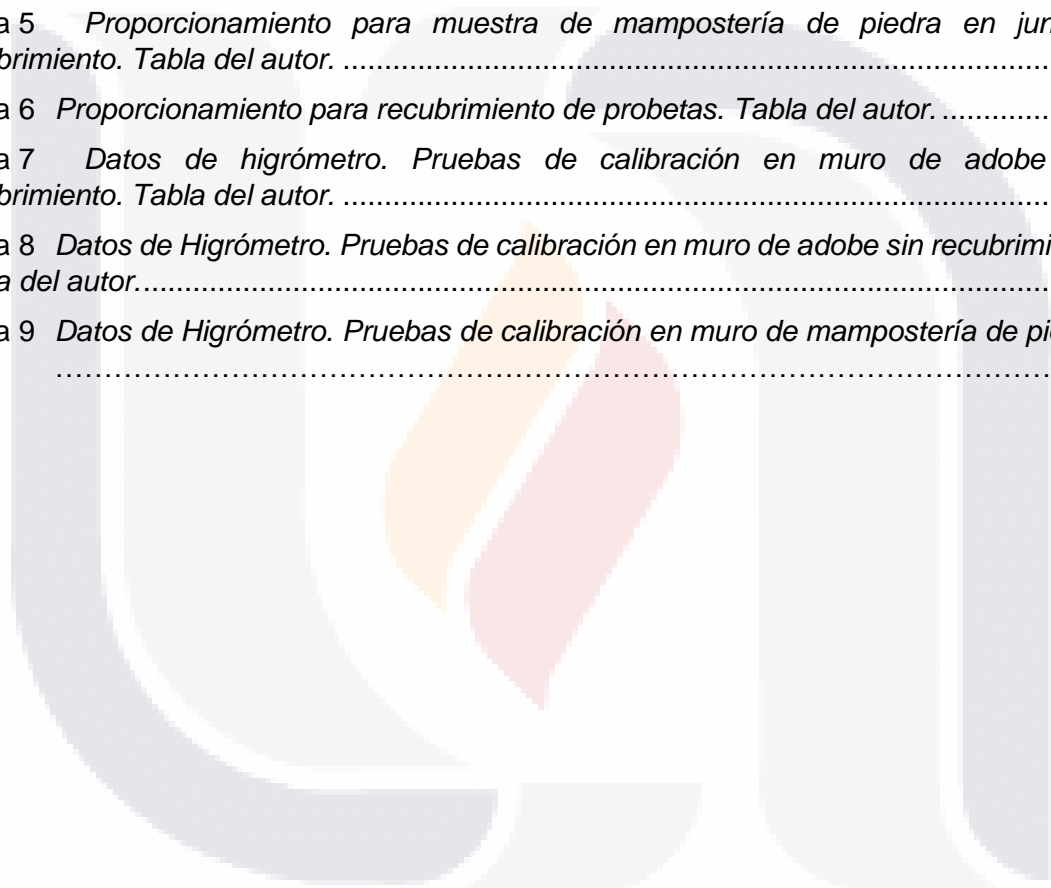
Tabla 5 *Proporcionamiento para muestra de mampostería de piedra en junta y recubrimiento. Tabla del autor.* 90

Tabla 6 *Proporcionamiento para recubrimiento de probetas. Tabla del autor.*..... 96

Tabla 7 *Datos de higrómetro. Pruebas de calibración en muro de adobe con recubrimiento. Tabla del autor.* 102

Tabla 8 *Datos de Higrómetro. Pruebas de calibración en muro de adobe sin recubrimiento. Tabla del autor.*..... 103

Tabla 9 *Datos de Higrómetro. Pruebas de calibración en muro de mampostería de piedra.*104



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Casas con elevado deterioro en muros debido a la humedad. A) Casa el Rosal 102 de adobe y chapa de cantera. Imagen de Raudel Padilla Ceniceros. b) Imagen de Casa Terán obtenida en el año de 1991, zona de caballerizas, Aguascalientes. Imagen obtenida del archivo fotográfico del centro INAH Aguascalientes. 24

Figura 2: Iglesia de San Juan Bautista en Talamanca de Jarama en España (Apggeo 2017). 28

Figura 3: Caso de estudio, muros interiores en casas (Cuevas 2014). 29

Figura 4: Monitorización de la cámara de Drenaje-Aireación de la Iglesia de Santa Cruz la Real de Segovia (Gil Muñoz & Lasheras Merino, 2018). 30

Figura 5: Esquema de disposición de las secciones virtuales (Argandoña et al., 2008). ... 31

Figura 6: Mosaico de imágenes 3D mostrando volumen de muestra afectado por agua a lo largo del ensayo de capilaridad (Argandoña et al., 2008). 32

Figura 7: Casa antigua de Fritzlahr, Alemania (Kuenzel & Holm, 2009). 33

Figura 8: Daño por humedad en Sala Turca de la Villa Medici en Roma (Barone & Ferrara, 2018). 34

Figura 9: Radar de Penetración Terrestre, técnica utilizada para el caso de estudio de la bóveda de la Sala Turca (Barone & Ferrara, 2018). 34

Figura 10: Estudio GPR en dirección Norte-Sur, evaluando el área de estudio e interpretación de datos de la composición del sistema constructivo de la bóveda (Barone & Ferrara, 2018). 35

Figura 11: Superposición de datos GPR en área de estudio (Barone & Ferrara, 2018). ... 35

Figura 12: Detección de anomalías causadas por humedad (Barone & Ferrara, 2018). ... 36

Figura 13: Relación punto de rocío y humedad relativa. Imagen tomada de (Rosales, 2021). 43

Figura 14: Pérdida de sección en el arranque de un muro de adobe por ascensión de humedad capilar: 1a. Muro de adobe carente de cimentación en Fuerteventura, Las Palmas. 1b. Muro de adobe con cimentación de mampostería en Poza de la Sal, Burgos (Mileto & López Manzanares, s/f). 44

Figura 15: Huella de filtración de agua y suelo mojado en atrio de la Catedral de Zamora (Gil Muñoz & Lasheras Merino, 2018). 45

Figura 16: Presencia de humedad por condensación en cuarto de vivienda (Vega & Camargo, 2023). 47

Figura 17: Presencia de humedad accidental en Museo Aguascalientes. A) humedad a metro y medio debido a tubería fracturada, B) localización de humedad en plafón y muro, C) humedad y patologías presentes en techo. Imágenes tomadas de informe técnico: “Estudio de bajadas pluviales del Museo de Aguascalientes”-ICA. 48

Figura 18: Permeámetro Tri-Flex 2. Imagen propia. 51

Figura 19: Clasificación de NDT. Imagen propia basada en información de González & de Montes (2007). 53

Figura 20: Mapeo de daños en fachada sur de Iglesia de Carmo en Olinda, Pernambuco (Rocha E.A. et al., 2018). 54

Figura 21: Fases del Suelo (Gabarrón Sánchez, 2013). 57

Figura 22: Configuración Wenner (Gabarrón Sánchez, 2013). 58

Figura 23: Configuración Schlumberger (Gabarrón Sánchez, 2013). 59

Figura 24: Configuración Dipolo-Dipolo (Gabarrón Sánchez, 2013)..... 60

Figura 25: Espectro Infrarrojo (Rodríguez & Rodríguez, 2017). 61

Figura 26: Energía Infrarroja de un objeto (Rodríguez & Rodríguez, 2017)..... 62

Figura 27: Enfoque y calibración de la cámara infrarroja (Rodríguez & Rodríguez, 2017).
..... 63

Figura 28: Rangos de calibración para la obtención de una buena imagen (Rodríguez & Rodríguez, 2017)..... 64

Figura 29: Cámara termográfica FLIR C3-X. Imagen del autor. 69

Figura 30: Software FLIR TOOLS para procesamiento de datos. 70

Figura 31: Procesamiento de datos con ayuda del software por medio de la recopilación de datos de la cámara. Imagen del autor. 71

Figura 32: Higrómetro FLIR MR55. Imagen del autor..... 72

Figura 33: Software SigmaPlot para la obtención de gráficos y procesamiento de datos. 73

Figura 34: Procesamiento de datos con puntos de referencia y coordenadas de los puntos deseados. Software sigmaplot Imagen del autor..... 74

Figura 35: Obtención de mapa de contorno por medio del software sigmaplot. Imagen del autor. 75

Figura 36: Resistivímetro SYSCAL JUNIOR R2PLUS. Imagen del autor. 76

Figura 37: Procesamiento en Software PROSYS II: (1) Descarga de datos; (2) Abrir archivos; (3) Obtención de datos y filtrado y (4) Filtrado final. Imagen del autor. 78

Figura 38: Software RES2DINV: Carga de archivos. Imagen del autor. 79

Figura 39: Calibración para obtención de modelo con mayor precisión. Imagen del autor.
..... 80

Figura 40: Obtención de modelo 2D, valores de RMSE y resistividades. Imagen del autor.
..... 81

Figura 41: Software ZONDRES2D, segundo filtrado dentro del procesamiento. 81

Figura 42: Configuración del software y reconfiguración para edición. Imagen del autor. 82

Figura 43: Obtención de inversiones necesarias para la reducción del factor RMSE. Imagen del autor..... 83

Figura 44: Procedimiento para la creación de contornos de la sección deseada y suavizar el perfil. Imagen del autor. 83

Figura 45: Exportación de modelos en ZondRes2D. Imagen del autor. 84

Figura 46: Exportación de modelo a Surfer para mejorar la calidad de edición. Imagen del autor. 84

Figura 47: Modelo 3D por medio de datos numéricos en Voxler. Imagen del autor..... 85

Figura 48: Bloque de adobe de dimensiones 0.40x0.20x0.09 m. Imagen del autor..... 87

Figura 49: Diseño de probeta para campaña experimental. Imagen del autor..... 88

Figura 50: Sección del diseño de probeta. Imagen del autor..... 88

Figura 51: Tubería de PVC de 1", perforado para la simulación de humedad accidental donde se colocará al centro del muro. Imagen del autor. 89

Figura 52: Alzado y secciones de las probetas de adobe y mampostería de piedra (dimensiones en metros). Plano del autor..... 91

Figura 53: Construcción de muros: (Izq) Muro de Adobe, (Der) Muro de mampostería de piedra. Imagen del Autor..... 91

Figura 54: Corte con disco en muro de adobe para la colocación de tubería de PVC. Imagen del autor..... 92

Figura 55: Área de cultivo de nopal ubicado en el municipio de Pabellón de Arteaga, Ags. Imagen del autor..... 93

Figura 56: Registro de pencas de nopal para su clasificación de acuerdo con la edad. Imagen del autor..... 93

Figura 57: Medición de pencas para su clasificación. Imagen del autor..... 94

Figura 58: Proceso de corte y extracción de pulpa. Imagen del autor..... 94

Figura 59: Corte y pesaje de tara para el proporcionamiento adecuado. Imagen del autor..... 95

Figura 60: Mezcla para recubrimiento con proporcionamiento adecuado. Imagen del autor..... 96

Figura 61: Repellado en muros. Imagen del autor..... 97

Figura 62: Mojado de ladrillos de adobe con mucílago para su correcta colocación y adherencia. Imagen del autor..... 97

Figura 63: Retícula de 0.05 m en muro de adobe por ambas caras. Imagen del autor..... 98

Figura 64: Retícula de 0.05 m en muro de piedra únicamente por la cara de recubrimiento. Imagen del autor..... 98

Figura 65: Imágenes de termografía infrarroja. Prueba de Calibración en muro de adobe con recubrimiento. Procesamiento en Flir Tools. Imagen del autor..... 100

Figura 66: Imágenes de termografía infrarroja. Prueba de calibración en muro de adobe sin recubrimiento. Procesamiento en Flir tolos. Imagen del autor..... 101

Figura 67: Imágenes de termografía infrarroja. Prueba de calibración en muro de mampostería de piedra. procesamiento en Flir tolos. Imagen del autor..... 101

Figura 68: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Etapa de calibración en muro de adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor..... 105

Figura 69: Prueba de calibración de ERT en muro de adobe. Perfiles 2D. Procesamiento en ProsysII, Zondres2D, Surfer 16. Elaboración propia..... 105

Figura 70: Prueba de calibración de ERT en muro de mampostería de piedra. Procesamiento en ProsysII, Zondres2D, Surfer 16. Elaboración propia..... 106

Figura 71: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor..... 107

Figura 72: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor..... 108

Figura 73: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor..... 108

Figura 74: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor..... 109

Figura 75: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor..... 109

Figura 76: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor..... 109

Figura 77: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor..... 110

Figura 78: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor..... 110

Figura 79: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 111

Figura 80: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 111

Figura 81: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 112

Figura 82: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 113

Figura 83: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 113

Figura 84: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 114

Figura 85: Humedad por capilaridad. Prueba de ERT en muro de adobe con recubrimiento. Procesamiento en ProsysII, Zondres2D, Surfer 16. Elaboración propia. 115

Figura 86: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 116

Figura 87: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 116

Figura 88: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 117

Figura 89: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 117

Figura 90: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 118

Figura 91: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 118

Figura 92: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 119

Figura 93: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 119

Figura 94: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 120

Figura 95: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 121

Figura 96: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 121

Figura 97: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 122

Figura 98: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 123

Figura 99: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 123

Figura 100: Humedad por capilaridad. Prueba de ERT en muro de adobe sin recubrimiento. Procesamiento en ProsysII, Zondres2D, Surfer 16. Elaboración propia. 124

Figura 101: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 125

Figura 102: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 126

Figura 103: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 126

Figura 104: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 127

Figura 105: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 127

Figura 106: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 128

Figura 107: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 128

Figura 108: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 129

Figura 109: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 129

Figura 110: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 130

Figura 111: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 131

Figura 112: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 131

Figura 113: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 132

Figura 114: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 133

Figura 115: Humedad por capilaridad. Prueba de ERT en muro de mampostería de piedra. Procesamiento en ProsysII, Zondres2D, Surfer 16. Elaboración propia. 133

Figura 116: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 134

Figura 117: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 135

Figura 118: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 135

Figura 119: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 136

Figura 120: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 136

Figura 121: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en sigmaplot. Imagen del autor. 137

Figura 122: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 137

Figura 123: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 138

Figura 124: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 139

Figura 125: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 139

Figura 126: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 140

Figura 127: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 140

Figura 128: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 141

Figura 129: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 141

Figura 130: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 142

Figura 131: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Sigmaplot. Imagen del autor. 142

Figura 132: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 143

Figura 133: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor. 144

Figura 134: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor..... 144

Figura 135: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor..... 145

Figura 136: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor..... 146

Figura 137: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor..... 146

Figura 138: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor..... 147

Figura 139: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor..... 147

Figura 140: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor..... 148

Figura 141: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Sigmaplot. Imagen del autor..... 148

Figura 142: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor..... 149

Figura 143: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor..... 149

Figura 144: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor..... 150

Figura 145: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor..... 150

Figura 146: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor..... 151

Figura 147: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor..... 151

Figura 148: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor..... 152

Figura 149: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor..... 152

Figura 150: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor..... 153

Figura 151: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor..... 154

Figura 152: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor..... 154

Figura 153: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 155

Figura 154: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 155

Figura 155: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 156

Figura 156: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor..... 156

Figura 157: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor..... 157

Figura 158: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor..... 157

Figura 159: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor..... 158

Figura 160: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 159

Figura 161: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 159

Figura 162: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 160

Figura 163: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 160

Figura 164: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor. 161

Figura 165: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro de mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor..... 161

Figura 166: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro de mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor..... 162

Figura 167: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro de mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor..... 162

Figura 168: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro de mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor..... 163

Figura 169: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro de mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor..... 164

Figura 170: Modelo 3D de Tomografía de Resistividad Eléctrica del muro de adobe. Modelo de calibración. Procesamiento en Voxler. Imagen del autor..... 167

Figura 171: Modelo 3D de tomografía de resistividad eléctrica en muro de mampostería de piedra. Modelo de calibración. Procesamiento en Voxler. Imagen del autor. 168

Figura 172: Modelo 3D de tomografía de resistividad eléctrica en el muro de adobe. Modelo de humedad por capilaridad. Procesamiento en Voxler. Imagen del autor..... 171

Figura 173: a) Diagrama esquemático de un muro de mampostería que muestra el equilibrio entre el ascenso por capilaridad y la evaporación. b) Esquema de los tres factores que determinan la altura de la humedad ascendente. Combinación de diagramas de Franzoni y Giaccone (Franzoni, 2014; Franzoni, 2018; Giaccone et al., 2020). 172

Figura 174: Eflorescencias en muro de adobe debido a la humedad por capilaridad. Imagen del autor..... 174

Figura 175: Modelo 3D de Tomografía de Resistividad Eléctrica de muro de mampostería de piedra. Modelo de humedad por capilaridad. Procesamiento en Voxler. Imagen del autor. 178



ACRÓNIMOS

NDT	Non Destructive Test
IT	Infrared Thermography
ERT	Electric Resistivity Tomography
ASTM	American Society of Testing Materials
INAH	Instituto Nacional de Antropología e Historia
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.



RESUMEN

La preservación de edificios históricos enfrenta desafíos únicos, y entre ellos, la detección y caracterización de humedades se erige como un aspecto crucial. En este contexto, el presente documento se enfoca en la evaluación de técnicas no destructivas y mínimamente invasivas diseñadas para discernir la presencia y características de humedades en estructuras históricas. El enfoque metodológico involucra la construcción de muros a escala, utilizando materiales representativos como adobe y mampostería de piedra, con el objetivo de recrear condiciones realistas de humedad capilar, accidental y filtración.

La investigación no solo se limita a la reproducción de diversos escenarios de humedad, sino que avanza hacia la implementación de tecnologías especializadas. Entre las técnicas exploradas se encuentran la Termografía Infrarroja, el Higrómetro y la Tomografía de Resistividad Eléctrica. Estas herramientas son aplicadas para analizar el comportamiento de la humedad, la porosidad y el frente húmedo en cada material de prueba, comprendiendo así la compleja dinámica del fenómeno.

El objetivo principal de este estudio es evaluar la eficacia relativa de las técnicas utilizadas frente a la presencia de humedad en edificaciones históricas. A medida que se avanza en la evaluación, se identifican factores importantes que inciden en el análisis de la humedad, tales como el tipo de material, sus propiedades intrínsecas y el espesor de las probetas utilizadas en las simulaciones.

Las conclusiones extraídas revelan que, si bien las técnicas de termografía e higrómetro proporcionan datos valiosos, estos se limitan a la superficie de los materiales. En cambio, la tomografía de resistividad eléctrica destaca ya que ofrece un análisis integral del comportamiento del fenómeno dentro de los muros. Este enfoque, incluso, permite la generación de modelos tridimensionales, proporcionando una comprensión profunda y detallada de la distribución de la humedad en las estructuras históricas. De esta manera, el estudio contribuye significativamente al campo de la preservación efectiva del patrimonio arquitectónico.

ABSTRACT

The preservation of historic buildings faces unique challenges, and among them, the detection and characterization of dampness stands out as a crucial aspect. In this context, this paper focuses on the evaluation of non-destructive and minimally invasive techniques designed to discern the presence and characteristics of dampness in historic structures. The methodological approach involves the construction of scaled walls, using representative materials such as adobe and stone masonry, with the objective of recreating realistic conditions of capillary moisture, incidental and seepage.

The research is not only limited to the reproduction of various moisture scenarios, but is moving towards the implementation of specialized technologies. Among the techniques explored are Infrared Thermography, Hygrometer and Electrical Resistivity Tomography. These tools are applied to analyze the behavior of moisture, porosity and Surface water in each test material, thus understanding the complex dynamics of the phenomenon.

The main objective of this study is to evaluate the relative effectiveness of the techniques used against the presence of moisture in historic buildings. As the evaluation progresses, important factors affecting the moisture analysis are identified, such as the type of material, its intrinsic properties and the thickness of the specimens used in the simulations.

The conclusions drawn reveal that, although thermography and hygrometer techniques provide valuable data, these are limited to the surface of the materials. In contrast, electrical resistivity tomography stands out as it provides a comprehensive analysis of the behavior of the phenomenon inside the walls. This approach even allows the generation of three-dimensional models, providing a deep and detailed understanding of the distribution of moisture in historic structures. In this way, the study contributes significantly to the field of effective preservation of architectural heritage.



**CAPÍTULO I:
INTRODUCCIÓN**

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN 1.1. PROTOCOLO

El conocimiento y aprecio por nuestro pasado y legado histórico son fundamentales para comprender y preservar la riqueza de una sociedad. A través de elementos como la historia, descendencia, el paso de los años y las vivencias, podemos adentrarnos en la profundidad de nuestras raíces. La UNESCO reconoce la importancia de este patrimonio cultural, que engloba una amplia gama de elementos desde monumentos y conjuntos arquitectónicos hasta lugares con un valor simbólico, histórico, artístico, estético, etnológico, antropológico, científico y social (Hierro & Fernández, 2013, p.5).

La Carta de Venecia, por el contrario, es una declaración escrita que afirma la idea de que un monumento histórico comprende no solo el logro arquitectónico singular, sino también el entorno urbano o natural adyacente que refleja una civilización distintiva, una evolución notable o un acontecimiento histórico trascendental. Este concepto abarca no solo los grandes logros, sino también los modestos que han adquirido importancia cultural con el paso del tiempo (Carta de Venecia, 1964).

Sin embargo, si se presta atención al Patrimonio Cultural, se podrá observar que el paso del tiempo, es uno de los factores importantes para este tipo de edificaciones, debido a que son dañados por situaciones climatológicas (lluvias, cambios bruscos de temperatura, humedades, etc.), si bien es parte del proceso, también debe de existir una manera de contrarrestar los efectos que causa en ellos, a su vez protegerlos, rehabilitarlos y sobre todo darles el mantenimiento que requieren para que la historia no desaparezca y se preserve. Para esto, existen organizaciones encargadas de dicho cuidado como lo es el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), Junta de Monumentos, entre otras instancias.

Por consiguiente, para poder intervenirlos de manera correcta es necesario un reconocimiento del inmueble y monitoreo constante de las condiciones en las que se realice un levantamiento de daños tanto estructurales como patologías, así como el reconocimiento de las características del edificio como son: dimensiones de los elementos, materiales constituyentes, sistemas constructivos, entre otros detalles de interés.

En la mayoría de los casos el agua es el principal y más complejo problema en el patrimonio arquitectónico (Price et al., 1984), por lo tanto, el estudio de humedad en muros es de suma importancia para la preservación y conservación de los inmuebles. La humedad en

edificaciones puede presentarse en las formas siguientes: a) capilaridad, b) condensación, c) fugas de tuberías, d) filtración de lluvia y e) inundaciones (Barreira et al., 2016). La humedad capilar se presenta como el ascenso del agua subterránea o superficial en muros porosos. Este fenómeno puede generarse debido a algún drenaje deficiente, una mala impermeabilización del sótano o la falta de cimentación. Existen otros fenómenos que muestran patrones de humedad similares a la humedad ascendente. Por ejemplo: si la pared está contaminada con sales, lo cual es un problema frecuente en los edificios históricos, puede haber una cantidad sustancial de humedad en la pared debido al aumento de higroscopicidad resultante de las propiedades hidrofiliadas de los cristales de sal. Otra razón para la aparición de humedad ascendente puede ser la condensación superficial en enormes edificios durante el verano (Kuenzel & Holm, 2009).

Por tal motivo, el tema del presente trabajo de investigación será la caracterización de humedades, así como la evaluación de las técnicas de detección de las mismas, planteando como objetivo la detección y caracterización de patologías existentes debido a la humedad, mediante la aplicación de métodos no destructivos y mínimamente invasivos. Así mismo, se desarrollará un análisis para definir los mecanismos de detección de humedad.

Debido a las limitaciones o restricciones que presentan los edificios patrimoniales que se tiene en cuanto a alterar o dañar, se decidió implementar métodos que no generen alteraciones físicas al inmueble y permitan generar un diagnóstico oportuno para su correcta intervención.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar y evaluar una metodología que permita la detección y caracterización de la humedad en Edificios Patrimoniales, empleando métodos no destructivos o mínimamente invasivos, de acuerdo con los criterios y especificaciones de los organismos Nacionales e Internacionales responsables en la materia.

1.3. OBJETIVOS PARTICULARES

- a) Analizar de manera documental los distintos métodos existentes para la detección de humedades en edificios patrimoniales centrándose para ello en su efectividad y en el grado de invasión o deterioro que producen sobre el elemento analizado.
- b) Seleccionar los métodos considerados como más eficientes para la detección de humedades, poniéndolos a prueba por medio de un ensayo piloto en condiciones controladas en laboratorio utilizando materiales característicos de los edificios patrimoniales de la región.
- c) Realizar una comparativa entre los distintos métodos analizados determinando efectividad para cada material de humedad analizado.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Existen autores que definen el patrimonio cultural como un conjunto de bienes, ya sean, muebles e inmuebles que se han ido pasando de generación en generación, y estos a su vez representan indicios de la identidad social de un lugar. Es por ello la importancia de preservar este tipo de bienes (Querol, 2010).

En el contexto de la preservación del patrimonio arquitectónico, es de suma importancia realizar un análisis exhaustivo antes de llevar a cabo cualquier intervención en una estructura o monumento. Este análisis resulta indispensable para determinar la viabilidad de algunos métodos, teniendo en cuenta en todo momento la normativa pertinente. En este proceso, es fundamental estudiar minuciosamente los materiales y técnicas disponibles, con el objetivo de garantizar una eficiencia óptima en la ejecución de la tarea en cuestión.

La restauración y conservación de edificios históricos genera un impacto directo en la sostenibilidad. La eliminación de humedades no solo asegura la integridad del edificio, sino que también reduce la necesidad de reconstrucción, lo que ahorra recursos y energía (figura 1).

Por medio de evaluación de técnicas de detección y caracterización de humedades en edificios históricos se fomenta la innovación en el campo de la restauración y la construcción. Esto puede resultar en métodos más efectivos y menos invasivos para tratar problemas de humedad.

El control de la humedad se ha convertido en un problema mundial porque las operaciones y las prácticas de construcción han ido cambiando. Sin embargo, un buen diseño de control de la humedad depende de una variedad de parámetros como las condiciones climáticas y el tipo de construcción que cambia de una región a otra (Kuenzel & Holm, 2009).



Figura 1: Casas con elevado deterioro en muros debido a la humedad. A) Casa el Rosal 102 de adobe y chapa de cantera. Imagen de Raudel Padilla Ceniceros. b) Imagen de Casa Terán obtenida en el año de 1991, zona de caballerizas, Aguascalientes. Imagen obtenida del archivo fotográfico del centro INAH Aguascalientes.

Las paredes de los edificios de importancia histórica se construyen utilizando un componente fundamental (como la piedra de sillería, la piedra de mampostería, los bordes, el ladrillo), al que se une un mortero (normalmente compuesto de cal y arena, particularmente en las estructuras históricas) (Kuenzel & Holm, 2009).

Teniendo en cuenta, los materiales que se componen dichos edificios, “los mecanismos de penetración del agua considerados en el cimiento o muro son: presión hidráulica (en suelo saturado), filtración (lateral o descendente), succión capilar (ascendente), y absorción y difusión de vapor procedente del ambiente o condensación y posterior difusión capilar” (Gil Muñoz, 2019).

La categorización de la humedad varía según la fuente del agua y, como resultado, los diversos mecanismos por los cuales el agua se infiltra en los componentes y sistemas de los edificios. Estas variaciones dan lugar a una serie de procesos patológicos que dependen de los materiales utilizados y de la forma en que estén dispuestos dentro de las paredes (Gil Muñoz, 2019).

“La aplicación más inmediata en la determinación de patologías en los edificios antiguos es la causada por la humedad de cualquier tipo” (Esteve, 2016). Con el uso de productos no destructivos o técnicas mínimamente invasivas, el daño se puede detectar en una etapa incipiente y se pueden tomar acciones específicas. Esto mejora el mantenimiento de

activos, previniendo el deterioro o pérdida de estructuras emblemáticas o necesidad de una restauración costosa y extensa (Appgeo, 2017).

Por otro lado, las técnicas de detección de humedades desarrolladas y aprobadas en edificios históricos pueden ser aplicadas en otros contextos, como la conservación de obras de arte, la arqueología, la ingeniería civil, la restauración de edificios modernos. Esto aplica la relevancia y la utilidad de la investigación.

1.5. ALCANCES

- A. La revisión de dichos documentos se hará en la base de datos de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, así como por medio de buscadores convencionales y metabuscadores, de los cuales se pueda encontrar información referente a artículos, publicaciones científicas de validez aceptada de los cuales existan diferentes métodos.
- B. Se utilizarán únicamente aquellos métodos con los que se cuente el equipo necesario en el laboratorio de materiales de la Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- C. Se limitará a los materiales de construcción con lo que se harán pruebas de laboratorio a los más comunes en la edificación de obras patrimoniales en la región del Bajío.



**CAPITULO II:
ESTADO DEL ARTE**

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. MATERIALES Y SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

Para la intervención adecuada de los bienes inmuebles catalogados como patrimonio cultural, es necesario conocer los materiales con los que fueron elaborados, así como de sus procesos constructivos que eran característicos de la época y es por eso que dentro de la investigación desarrollada por Sánchez Silva, existe un capítulo en el cuál, habla acerca de los sistemas constructivos y materiales implementados en los edificios de carácter patrimonial y nos dice que: “Toda la ciudad está construida de adobes (ladrillo únicamente secado al sol) que en un clima tan seco ofrece bastante solidez, como lo denotan las casas y monumentos viejos que hay en él” (Sanchez Silva, 2021).

No obstante, habla acerca de los tipos de cubiertas, pisos, y otros elementos que se utilizaban como el impermeabilizante, el enladrillado para que esta fuera permeable. Así mismo, habla de la arquitectura característica el cual se diferencia por el marco tanto de las ventanas como de las puertas, alturas y la herrería que con el paso del tiempo se fue adecuando a la época en la que se vivía.

Otro material empleado en la construcción de los edificios históricos es la piedra de mampostería en el cual Fort González (2009), menciona en su artículo que “los materiales utilizados en el patrimonio monumental de una ciudad o pueblo son reflejo de la geología de su entorno lo que enriquece aún más la actividad didáctica al conectar el estudio del material en el edificio con el entorno geológico”.

Mendiola Germán et al., (2014) menciona que la piedra cuenta con características tales como resistencia a la flexión, absorción al agua, densidad aparente, porosidad abierta, absorción de agua por capilaridad abierta, resistencia al fuego, abrasión, deslizamiento, a la compresión, a altas temperaturas, a presencia de afloramientos y patologías como cristalización, así como a la resistencia a las sales.

Así mismo, la piedra es un material que se ha implementado desde la antigüedad, mejorando los procesos constructivos acorde a la época, permitiendo seguir conservando algunas edificaciones elaboradas con dicho material.

2.2. APLICACIÓN DE GEOFÍSICA COMO TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS

Existen autores como los que abajo se mencionan que comparten su experiencia interviniendo este tipo de edificios, detectando anomalías causadas por los diferentes tipos de humedades, así como intervenciones que han realizado para combatirlos.

La utilización de técnicas específicas para observar la representación de los niveles de humedad en la iglesia de San Juan Bautista en Talamanca de Jarama, España (figura 2), una provincia situada en Madrid, implicó la implementación de metodologías precisas para adquirir datos que coincidan con las observaciones visuales (Appgeo, 2017).



Figura 2: Iglesia de San Juan Bautista en Talamanca de Jarama en España (Appgeo 2017).

Los estudios que desarrolló en dicho caso de estudio fueron: mediciones de resistividad eléctrica, termografía infrarroja, sensores registrados y sensores de redes inalámbricas, tomografía de resistividad eléctrica y radar de penetración terrestre. En donde gracias a este primer método se pudo determinar la distribución de la humedad, con la termografía infrarroja se determinó los materiales e hiladas por las cuales estaba construido el muro, además de las superficies donde se le eran atribuidos fugas de agua pluvial a través de las juntas y grietas de entre la mampostería. Además, gracias a este estudio, se confirmó la existencia de humedad en la pared sur de la iglesia.

Mediante sensores registradores e inalámbricos colocados en la pared norte y sur, se obtuvo la humedad relativa que presentaba cada uno de los muros y todo debido a la variación de temperaturas en las cuales el estudio fue tomado.

Cuando se implementó la Tomografía de Resistividad Eléctrica ya se tenía de donde partir gracias a los estudios anteriores (medidor de conductividad eléctrica), tomando en cuenta únicamente los valores altos. Con ayuda de los estudios, se concluyó que la humedad que presentaban estos muros era porque la iglesia se encontraba por debajo del nivel de la calle y a un costado un pavimento exterior ligeramente inclinado hacia abajo.

Cuevas (2014) en un análisis de diversas soluciones de humedad por capilaridad, realizó un estudio en tres viviendas donde según la evaluación dada se determinó una sentencia dictada se decidió que en el 2009 se intervendría por medio de la termografía y colocación de otros métodos invasivos para que dichas casas dejaran de tener problemas de humedades.

El estudio fue realizado en los semisótanos de dichas casas, ya que eran lugares que presentaban dichas patologías y sobre todo no eran habitables por lo que en ese entonces pudieron intervenir. La intervención constaba de impermeabilización vertical y horizontal de muros además de otra intervención invasiva mediante un corte en los muros que eran de materiales de termo arcilla (figura 3).



Figura 3: Caso de estudio, muros interiores en casas (Cuevas 2014).

Se procedió a realizar una zanja donde aproximadamente de unos 80 cm de profundidad, se decidió revestir la cimentación que por cierto lado influía a la filtración de humedad por capilaridad, sin embargo, también se optó por realizar el corte de la termoarcilla con el fin de colocar la membrana impermeabilizante.

Una vez que finalizó el trabajo, se observó que las viviendas intervenidas mejoraron, desapareciendo las humedades en las bases de los muros, por lo que al paso del tiempo se pudo restaurar las paredes (pintura), ya no existía olor a humedad y otros factores como la sensación térmica mejoraron.

Existen técnicas alternativas no destructivas, incluida la utilización de cámaras de aireación, como las expuestas por Gil Muñoz & Lasheras Merino (2018), que emplean mecanismos pasivos con el fin de contrarrestar la humedad capilar que impacta en las fachadas de los edificios. Dependiendo de la naturaleza específica del contenido de humedad, se pueden implementar distintos métodos de construcción formales y funcionales. Para aliviar la humedad del subsuelo, se suelen emplear cámaras longitudinales, que se fijan a la base de las paredes o a los cimientos de estructuras históricas.

El estudio fue realizado in situ en la iglesia de Santa Cruz la Real de Segovia (figura 4), en donde no solo se presentó el análisis de dichas cámaras si no que se ayudaron de distintos recursos gráficos como lo son: gráficos de curvas, gráficos de caja y bigotes, diagramas psicométricos y más. Así mismo, nos comenta que por medio de la implementación de estas gráficas pudo obtener datos de temperatura y humedades registrados cada hora hasta obtener las mediciones necesarias a un día completo de trabajo. Por otro lado, los gráficos de caja y bigotes registran una concentración de datos distribuidas en los diferentes cuartiles, pero dejando en los extremos los valores más bajos dejando la media en el centro de la muestra. En los diagramas psicométricos se obtuvieron tres variables de las cuales fueron la temperatura, humedad relativa y la humedad del aire (Gil Muñoz & Lasheras Merino, 2018).



Figura 4: Monitorización de la cámara de Drenaje-Aireación de la Iglesia de Santa Cruz la Real de Segovia (Gil Muñoz & Lasheras Merino, 2018).

Como resultado del recorrido se determinó que la salida de una chimenea de 0.2x0.5 m2 es la zona de mayor evaporación lo que permite el paso de corrientes de aire que facilitan su afloración. También se dijo que la galería presenta huellas de humedad debido a posibles escenarios como la filtración de conductos pluviales, filtración de drenaje, entre otras.

Durante los períodos de precipitación, las cámaras de aireación que reciben suministros de agua pueden ser capaces de evaporar el agua en la estación seca, siempre que el flujo retenido, las dimensiones de las aberturas de ventilación y el diseño faciliten el movimiento del aire (Gil Muñoz & Lasheras Merino, 2018).

Se encontró otro método que es parecido al ERT, que es una Tomografía Axial computarizada de Rayos X (TAC RAYOS X), el cual nos describe Argandoña (2008) “que es una técnica no destructiva muy útil tanto para estudiar la estructura como el espacio poroso de la roca con movimiento de fluidos”.

Gracias a la aportación que realizó al estudio de humedad por capilaridad, se obtuvo información acerca de cómo es que se distribuye el agua en el interior del elemento al paso del tiempo y relacionando la información con el procesamiento de las imágenes da hincapié a poder observar a profundidad la composición del mismo elemento estudiado y el comportamiento del agua a través de él (Argandoña et al., 2008).

Por medio del modelado 3D, se puede estimar el volumen de la muestra saturada a lo largo del tiempo, con mediciones constantes y así observar el avance de la humedad por capilaridad dentro del material (figura 5 y 6).

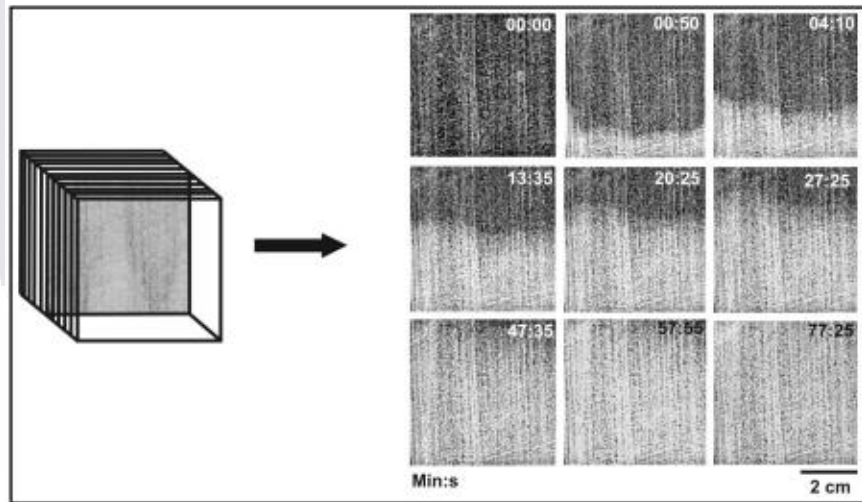


Figura 5: Esquema de disposición de las secciones virtuales (Argandoña et al., 2008).

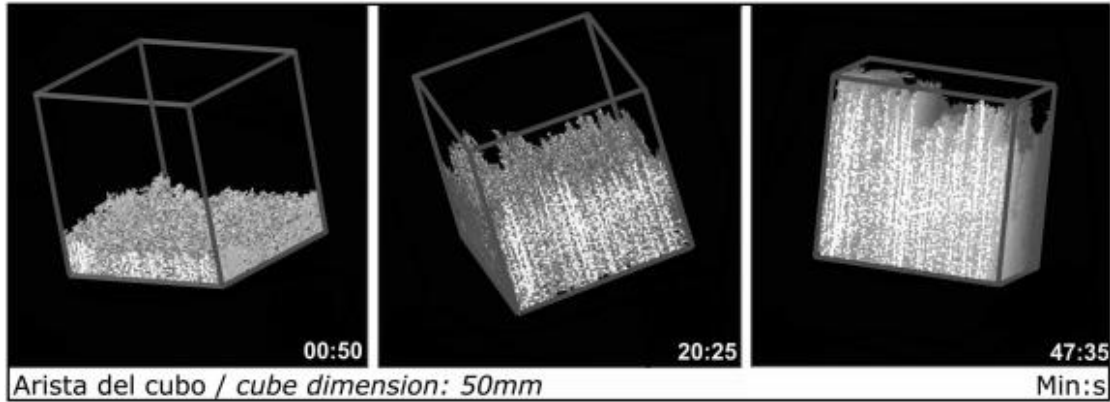


Figura 6: Mosaico de imágenes 3D mostrando volumen de muestra afectado por agua a lo largo del ensayo de capilaridad (Argandoña et al., 2008).

En el 2009, Kuenzel y Holm describen que: “el hormigón, el estuco, el yeso, el aislamiento de fibra aplicada en aerosol y la madera verde son ejemplos de materiales que contienen mucha humedad cuando se aplican. Otros materiales de construcción porosos, como ladrillos de arcilla o piedra natural, pueden absorber la precipitación o el agua subterránea cuando se dejan desprotegidos durante el almacenamiento o cuando el edificio tiene fugas”.

Así mismo, explica que “El flujo de aire a través de grietas y juntas también puede transportar agua de lluvia al interior del edificio. Para evitar la humedad, el flujo de aire dañado a través de la envolvente del edificio debe evitarse al menos una capa continua hermética (barrera de aire)” (Kuenzel & Holm, 2009).

De hecho, existe “la necesidad de mejores herramientas de cálculo higrotérmico que han sido provocadas por numerosas fallas relacionadas con la humedad” (Kuenzel & Holm, 2009).

Para la ejecución de simulaciones higrotérmicas se requerirán datos como orientación e inclinación del edificio, además se requerirá que dichos parámetros estén en constante investigación. A su vez, se deberán de seleccionar materiales las cuales cumplan con ciertas características lo cuales serán aptos para el estudio dijo Kuenzel & Holm (2009).

Los cuales son:

- a) Densidad aparente ρ en kg / m^3 , sirve para convertir el calor específico en masa en volumen;
- b) Capacidad calorífica específica C en $\text{kJ} / (\text{kgK})$;
- c) Conductividad térmica λ en $\text{W} / (\text{mK})$ del material seco y su dependencia de la humedad;

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- d) Porosidad ϵ en m^3 / m^3 , que determina el contenido máximo de agua W_{max} ;
 - e) Almacenamiento de humedad, es decir, isothermas de absorción y succión $w = f(\varphi)$ en kg / m^3 , que dan el contenido de humedad de equilibrio de los materiales en función de la humedad relativa tanto en el rango higroscópico como en el capilar (sobre higroscópico) del agua.
 - f) Permeabilidad al vapor en $\text{kg} / (\text{m}^2\text{sPa})$ que puede depender de la humedad del aire ambiente
 - g) Difusividad del líquido D_w en m^2 / s tanto para la captación como para la redistribución del agua secado de materiales en función del contenido de humedad. Multiplicar D_w por la derivada de la curva de retención de agua da el coeficiente de conducción de líquido D_φ .

Con el fin de obtener una simulación realista del rendimiento higrotérmico de los componentes del edificio expuestos a la intemperie natural, se deben proporcionar los siguientes parámetros climáticos (Kuenzel & Holm, 2009). Temperatura del aire exterior, humedad relativa exterior, radiación de onda corta, radiación de onda larga, precipitación, velocidad y dirección del viento, temperatura del aire interior y humedad relativo interior.

El impacto de las condiciones climáticas exteriores e interiores en la envolvente del edificio también se rige por la denominada transferencia de superficie que describe los procesos de transporte en las superficies exteriores e interiores. Por lo general, hay una película de aire en la superficie que actúa como resistencia al calor y al vapor (figura 7).



Figura 7: Casa antigua de Fritzlahr, Alemania (Kuenzel & Holm, 2009).

Barone & Ferrara (2018), comentan que “la humedad es uno de los temas más relevantes dentro de la hidrogeofísica”. El caso de estudio fue la sala Turca de la Villa Medici ubicada

en el cerro Pincio en Roma, Italia el cual dicho monumento es sagrado para la antigua Roma (figura 8).



Figura 8: Daño por humedad en Sala Turca de la Villa Medici en Roma (Barone & Ferrara, 2018).

El GPR, en particular, puede evaluar con precisión el nivel de humedad en el subsuelo. Este tipo de técnica geofísica no destructiva se puede utilizar para determinar con precisión la humedad contenido debajo de la superficie de la tierra (Barone & Ferrara, 2018).

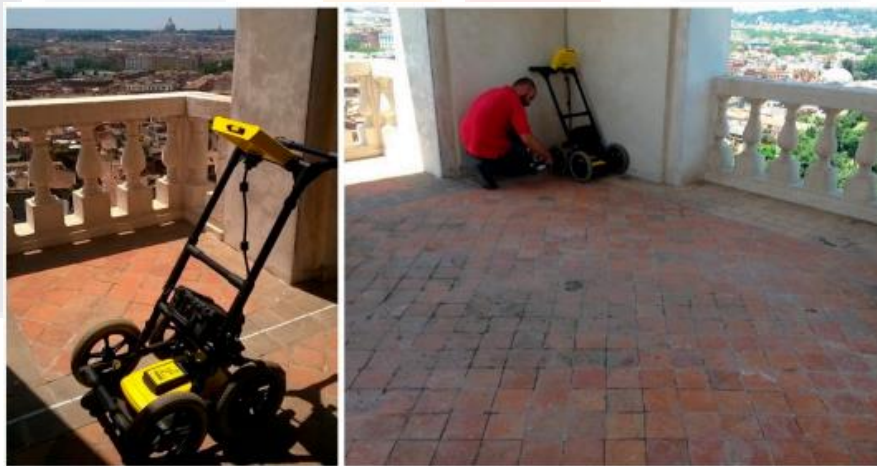


Figura 9: Radar de Penetración Terrestre, técnica utilizada para el caso de estudio de la bóveda de la Sala Turca (Barone & Ferrara, 2018).

De acuerdo con Barone & Ferrara (2018) “Gracias a su alta sensibilidad a la humedad, la investigación de GPR fue necesaria para localizar las posibles presencias de humedad dentro del techo de la habitación y comprender el nivel de daño estructural que conlleva la presencia de humedad. Esto fue necesario para planificar un plan de restauración adecuado y enfocado de la bóveda de la Sala Turca”.

En la figura 9, Barone y Ferrara (2018), comenta que colocaron un radargrama centrado en la bóveda con una dirección norte sur. En donde al realizar el estudio les arroja el espesor y geometría de la bóveda, así mismo, como la composición del pavimento de la terraza el cual es una capa casi homogénea de ladrillos y diferentes materiales para la lechada. Por otro lado, el radargrama arrojo un evento hiperbólico a profundidad y esto se debe a que existe un cabe eléctrico que pasa justamente en esa zona y por eso fue detectado. Sin embargo, señala que el espesor de la bóveda varía desde 1.1 m hasta 0.70 m.

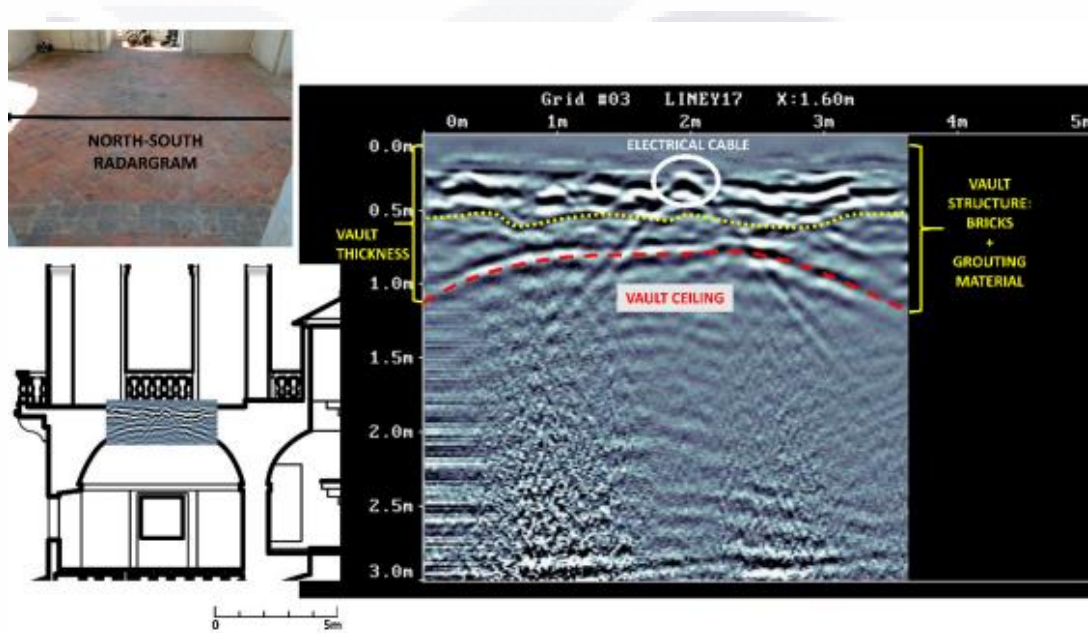


Figura 10: Estudio GPR en dirección Norte-Sur, evaluando el área de estudio e interpretación de datos de la composición del sistema constructivo de la bóveda (Barone & Ferrara, 2018)

Para la figura 10, Barone & Ferrara (2018), detecta dos anomalías el cual uno detectado anteriormente y el otro a una profundidad de 0.20 m.

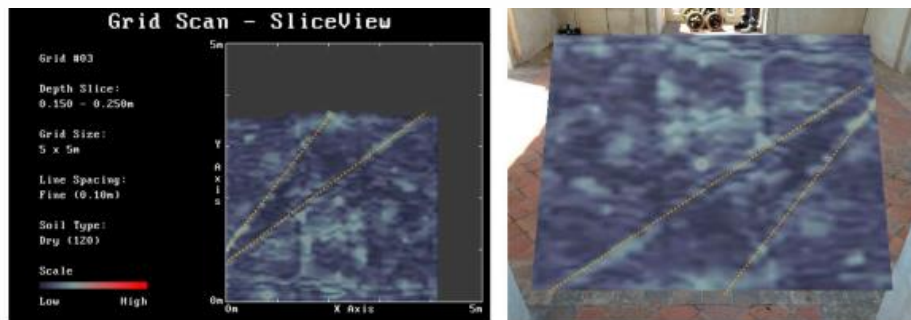


Figura 11: Superposición de datos GPR en área de estudio (Barone & Ferrara, 2018).

En la Figura 11, los resultados resaltan claramente la presencia de una fuerte anomalía relacionada con la alta presencia de humedad en una parte específica de la bóveda interna debajo. La intensidad y definición de la anomalía nos permite comprender el nivel de daño y planificar una restauración enfocada sin desmantelando por completo el techo de esta preciosa habitación (Barone & Ferrara, 2018).

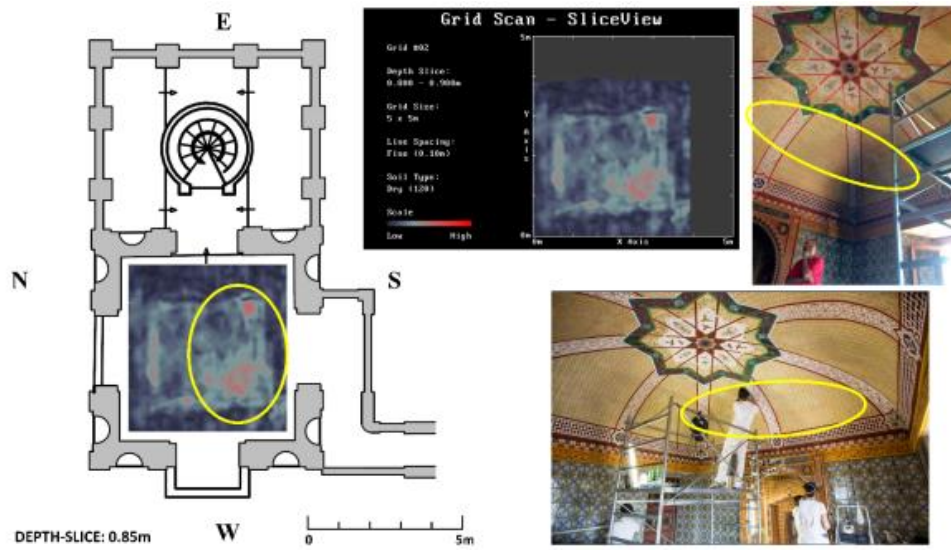


Figura 12: Detección de anomalías causadas por humedad (Barone & Ferrara, 2018).

Se concluyó del estudio realizado por Barone y Ferrara (2018), que “Los resultados destacados en este documento demuestran la capacidad de un NDT, como el GPR, para localizar y estimar el alcance de la entrada de agua para desarrollar planes de restauración al mismo tiempo de las investigaciones del GPR antes de que ocurra un daño permanente” (figura 12).

Así mismo, Mesanza (2011), implementó y caracterizó en su tesis algunos métodos no destructivos como los que georradar, termografías, laser escáner, en el cual explican cómo se adquieren los datos, cuáles son sus fundamentos y demás características de los métodos que engloban cada una de las características de los métodos que entran en dichas categorías.

Cotic et al., (2013) determina que el uso complementario de técnicas como GPR y tomografía de resistividad eléctrica, contribuyen a una mejor interpretación de estructuras internas complejas. Asume que la tomografía de resistividad es una técnica confiable

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

incluso en niveles de humedad bajos, pero tiene una resolución de profundidad más baja y se ve afectada por un acoplamiento deficiente de los electrodos. Reitera que el radar es una técnica que brinda resultados concisos al evaluar oquedades tanto en mampostería seca como húmeda.

Debido al problema que presentaron los muros históricos de Oxford, Reino Unido, Sass & Viles (2009), utilizaron la técnica de ERT con ayuda de electrodos médicos para análisis de resistividad por medio de perfiles 2D como técnica no invasiva y no destructiva. Aplicó calibraciones donde le permitió convertir los valores de resistividad arrojadas en contenido de humedad. Para la evaluación de los muros se realizaron simulaciones de condiciones climáticas determinando el comportamiento de humedad y secado de la mampostería mostrando evidencia de frentes húmedos y secados definidos. Así mismo, afirma que, debido a las piedras erosionadas por la lluvia, las piedras tienden a absorber el agua de manera inmediata, pero a la vez se seca de manera acelerada por la porosidad presente lo que permite que los daños sean mayores. Resalta que los datos proporcionan información realista y confiable sobre la distribución de la humedad en la mampostería.

Rymarczyk et al., (2018) determina que la técnica no destructiva basada en la tomografía eléctrica y con ayuda de procesadores de aprendizaje automático puede analizar de manera eficaz la humedad de los edificios proporcionando imágenes de alta precisión, bajos costos y alta velocidad de procesamiento. Por otra parte, establece que con ayuda de los algoritmos de aprendizaje automático como *Least Angle Regression* (LARS) y *ElasticNet*, ayuda a disminuir el indicador del error cuadrático medio de predicción (RMSE) obteniendo un modelo con mayor confiabilidad debido al bajo porcentaje de error.

Otro caso de estudio fue en un edificio romano Casa di Diana donde Cardarelli et al., (2016) integró un análisis geofísico y geoquímico para determinar valores de humedad elevados y fenómenos de eflorescencia que se presentaban en las paredes de mampostería del edificio. En donde por medio de ERT detectó un acuífero de agua dulce a poca profundidad, correspondiente a los muros con deterioro, mientras que la presencia de agua salada probablemente estaba por debajo, lo que infirieron que existía relación entre los fenómenos observados y la interacción del agua subterránea. Debido a la correlación de ambas técnicas se demostró que es una buena herramienta innovadora para evaluar la relación entre la evidencia observada y los fenómenos presentados, ayudando a planificar acciones de recuperación del sitio arqueológico.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Padilla Ceniceros et al., (2023) estudió el fenómeno capilar en dos casos de estudio en el estado de Aguascalientes donde aplicó planos horizontales y verticales para estudiar el comportamiento de la humedad, reconocer la geometría interna de los elementos y detectar anomalías de resistividad por medio de la técnica ERT. Por medio de los diferentes planos, obtuvo un modelo 3D definiendo con precisión el origen de la humedad, el flujo de distribución y las zonas de mayor concentración. Para conocer el subsuelo utilizó 24 electrodos de varilla de 12 pulgadas en el suelo con una configuración dipolo-dipolo. No obstante, confirmó que los resultados de la técnica de ERT son importantes para tomar decisiones en futuras intervenciones destinadas a mitigar la humedad ascendente y reducir el deterioro de las paredes.

Spodek & Rosina (2009), concluyen que la termografía infrarroja se implementa para la creación de termogramas de superficies a partir de datos obtenidos. Plantean que el enfoque que expresa la técnica es de carácter cuantitativo. Sin embargo, plantean que para una correcta aplicación y desempeño del método es necesario conocer las características de los materiales ya que de acuerdo con sus propiedades es posible visualizarlos.

Barreira & De Freitas (2005) evalúan la influencia de parámetros como la emisividad, las condiciones ambientales, el color y la reflectividad en los materiales de construcción por medio de la termografía infrarroja. No obstante, el estudio consistió en evaluar las condiciones de humedad y secado de los materiales y demostró que la evaporación del agua induce el enfriamiento local de la superficie. Otro de los criterios a evaluar fue la sensibilidad donde se demuestra que la variación de la emisividad indujo cambios en las imágenes térmicas durante la absorción y el secado de los materiales, y que las condiciones ambientales influyeron en las imágenes térmicas obtenidas.

Barreira et al., (2016) observó que la termografía infrarroja es más precisa en superficies de baja reflectancia y en especial durante la noche, debido a la humedad invisible dada por la radiación solar que impacta en las paredes del edificio.

Barreira & Almeida (2020), determinó que la IT es una herramienta de diagnóstico válida para evaluar la humedad en los elementos de los edificios, en particular para detectar humedad creciente y las infiltraciones de agua de lluvia. Así mismo, la IT se comparó con otras técnicas de medición de la temperatura de la superficie y reveló que no es precisa con ciertos materiales como metálicos de baja emisividad especialmente bajo radiación solar directa. Durante el análisis también concluye que es necesario que la termografía infrarroja

se combine con otros dispositivos como el higrómetro que nos detecta la humedad contenida y así evitar interpretaciones erróneas y lograr resultados confiables.





CAPÍTULO III
MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

3. MARCO TEÓRICO

3.1. ANTECEDENTES

3.1.1. CONCEPTOS GENERALES

Para dar comienzo con una introducción de acuerdo con lo que se verá en el presente trabajo se definirán algunos conceptos importantes basados en diccionarios, glosarios, cartas (cartas de Atenas y otras) y artículos relacionados con el patrimonio edificado y su conservación. De acuerdo al glosario ICOMOS (1999), el patrimonio tradicional son rasgos característicos de los pueblos proyectando sentimiento y resalta la belleza del lugar en especial. Así mismo, esto conlleva una historia “es tanto el trabajo del hombre como creación del tiempo”.

De igual manera, otro concepto importante es el patrimonio vernáculo, que así mismo nos dice que, es un camino trazado y construido que se toma debido a las circunstancias tanto ambientales, sociales, con el único fin de desarrollar su propio entorno (ICOMOS, 1999).

3.2. PATRIMONIO HISTÓRICO Y SU IMPORTANCIA EN EL ESTUDIO

Autores como Garré (2021), coincide con la UNESCO definiendo el patrimonio cultural como una serie de conjuntos de bienes inmuebles y muebles que pertenezcan al sector público o privado el cual este a su vez aporte un punto de vista de diferentes ámbitos ya sea Arte, Historia, Ciencias o Cultura.

Es importante resaltar que el patrimonio se debe salvaguardar debido que es el vestigio de fenómenos culturales de la época, la consolidación y el cómo se fueron desarrollando y adaptando durante el transcurso del tiempo (Azkarate, 2003).

Siguiendo con Azkarate (2003), menciona que existen normativas fundamentales generadas por la legislación internacional para la defensa, preservación, conservación, restauración de dichos edificios. En la carta de Atenas (1931), se prioriza los pasos a seguir para una correcta restauración. En la carta de Venecia (1964) se destaca los valores artísticos y formales frente a los documentales e históricos. La carta de Ámsterdam (1975), se destaca por los conceptos de restauración integral e intervención mínima detallando una serie de pasos básicos que trabajan en conjunto con la reutilización y funcionalidad para así asegurar la no desaparición de los valores históricos. La carta internacional para la

conservación de las poblaciones y áreas urbanas históricas (1987) se especializa en verificar y defender los edificios cuya integridad sea amenazada debido a un desarrollo urbano de la zona.

Estas consideraciones en la conservación del patrimonio construido son de gran relevancia ya que una alteración sustancial en su estilo repercute directamente en la sociedad, debido a que se considera como un signo de identidad y soporte de la memoria histórica de la humanidad (Carta de Atenas, 1931).

3.3. HUMEDADES

El diccionario de la Real academia española dice que la humedad proviene de Haplogía del latín tardío humiditas, -ātis. Donde presenta tres definiciones como cualidad e húmedo; agua de que está impregnando un cuerpo o que, vaporiza, se mezcla con el aire; y por último, mancha producida en la pared por impregnación de agua (ASALE & RAE, s/f).

“La humedad es una propiedad que describe el contenido de vapor de agua presente en un gas, el cual se puede expresar en términos de varias magnitudes. Algunas de ellas se pueden medir directamente y otras se pueden calcular” (Martines L., 2007). La humedad se localiza en la mayor parte de la atmósfera cercana a la superficie del planeta. No es algo que se pueda ver, pero sí es posible sentirla e incluso olerla indirectamente (Tejeda Martínez, 2018).

El hombre encontró la manera de protegerse de agentes atmosféricos como la lluvia, viento, nieve y demás cambios de clima drásticos que pudieran dañar la salud, pero desafortunadamente ya no es suficiente debido a que existen otras exigencias que complementan como el confort de un hábitat deseable humano.

3.3.1. RELACIÓN DE PUNTO DE ROCÍO, HUMEDAD RELATIVA, HUMEDAD ABSOLUTA Y ESPECÍFICA.

Existen conceptos por definirse que son de interés para tener el contexto completo y el cómo influye en la humedad y es por lo que el autor Martines L. (2007) explica que la temperatura de punto de rocío es la condensación del vapor de agua cuando un gas se enfría a una presión constante, por lo que depende de una presión del gas específica (figura 13).

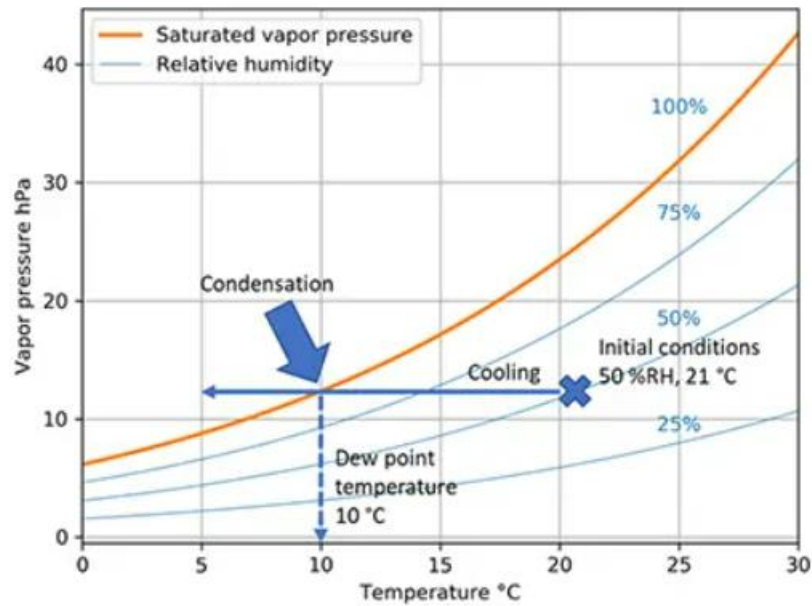


Figura 13: Relación punto de rocío y humedad relativa. Imagen tomada de (Rosales, 2021).

Por el contrario, la humedad relativa difiere de la humedad absoluta o específica en el cual no se define la cantidad de vapor de agua por unidad, ya que solo indica la proporción de vapor que se disuelve en un volumen particular de aire (Tejeda Martínez, 2018).

3.3.2. TIPOS DE HUMEDADES Y SUS CARACTERÍSTICAS

Las humedades se clasifican con base a sus distintas características y efectos que provocan a los inmuebles, las cuales son capilaridad, infiltración, condensación y accidental.

3.4. HUMEDAD DE ABSORCIÓN O DE CAPILARIDAD

La capilaridad (figura 14) es un fenómeno que se basa en la existencia de la tensión superficial, propiciando la disgregación de los morteros existentes en la planta baja o sótanos de cualquier inmueble debido a la presencia de humedad en la cimentación y esto conlleva a acelerar la vejez de los edificios, y a su vez deteriorando la estructura y estabilidad del mismo (Matarredonda Terol, 1964).



Figura 14: Pérdida de sección en el arranque de un muro de adobe por ascensión de humedad capilar: 1a. Muro de adobe carente de cimentación en Fuerteventura, Las Palmas. 1b. Muro de adobe con cimentación de mampostería en Poza de la Sal, Burgos (Mileto & López Manzanares, s/f).

3.4.1. EFECTOS Y MANIFESTACIONES DE LA HUMEDAD CAPILAR

De acuerdo con los autores, las humedades que ascienden por capilaridad se manifiestan principalmente al nivel del suelo, en los paramentos interiores de los arranques de los muros, paredes maestras y tabiques.

Estudios resaltan que las zonas que presentan dichas condiciones van desde los 0.40-0.60 m por debajo del suelo, aunque en algunas ocasiones llegan a alcanzar más de un metro y esto se debe al tipo de cimentación, materiales empleados en la misma y la orientación que llegase a tener el inmueble a la hora de desplantarlo. De acuerdo Matarredonda Terol (1964), la capilaridad se verá afectada por la orientación ya que si esta es orientada al Norte se propagará más debido a la ausencia de factores climáticos como el sol, ya que este presentará una evaporación al mínimo que si se encuentra al sur. En muchos de los edificios, el volumen de agua contenido en el muro debido a la capilaridad llega hasta el 30% de su altura.

3.4.2. CAUSAS QUE PRODUCEN LA HUMEDAD CAPILAR

Matarredonda Terol (1964), menciona que los factores que pueden propiciar la capilaridad son: la existencia de mantos acuíferos, grietas en las tuberías de redes de saneamiento, fugas en la línea de distribución de agua potable, presencias de encharcamiento de agua de lluvia, colindancia con jardines, etc. De igual manera, algunos de los materiales no tienen características impermeables siendo propensos a cualquier deterioro debido a la humedad.

Existe en el mercado pocos materiales que son exentos de desarrollar este fenómeno debido a sus características permiten inhibir la humedad de un lado a otro evitando su ascensión (p.29).

3.5. HUMEDAD INFILTRADA

La humedad por filtración (figura 15) es aquella que se presenta en los cerramientos ya sea en paredes y ventanas o cubiertas, entre otros debido a la ausencia de las pendientes necesarias constructivas que se deben de tener para evitarlo. Por lo tanto, al no contar con un sellado correcto, el agua del exterior pasa y penetra en el interior los edificios en forma de lluvia, vapor e incluso nieve. Esta humedad se manifiesta por la presencia de grandes manchas en los paramentos exteriores (Matarredonda Terol, 1964).

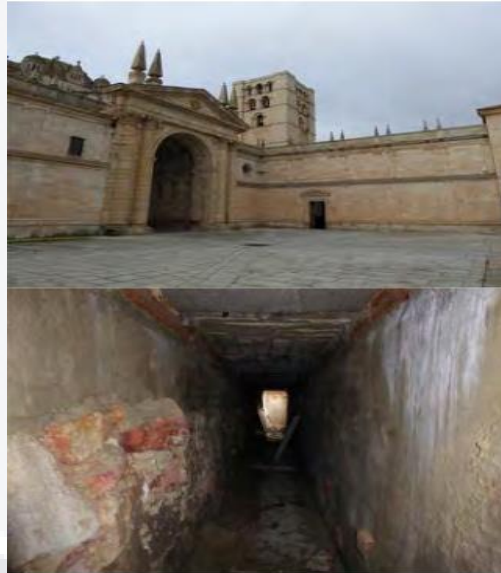


Figura 15: Huella de filtración de agua y suelo mojado en atrio de la Catedral de Zamora (Gil Muñoz & Lasheras Merino, 2018).

3.5.1. PUNTOS MÁS VULNERABLES A LA INFILTRACIÓN

Los principales elementos afectados son las paredes y muros exteriores, la carpintería localizada en ventanas, balcones y cubiertas. Dentro de cada elemento anterior, existen factores que los hace más vulnerables como materiales de baja calidad y una colocación inadecuada. Del mismo modo, existen elementos que evidencian el daño como la junta del ladrillo y mortero debido a la poca adherencia y tiempo de fraguado, así mismo, las juntas

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

verticales propician la penetración de humedad fácilmente. No obstante, también existe el riesgo en las aristas de unión tanto verticales y horizontales entre elementos de distintas naturalezas, elementos anclados que atraviesan paredes y cubiertas, remates de antepecho de ventanas con ladrillo a sardinel, los marcos de ventanas enrasados al paramento exterior del muro, entre otras más (Matarredonda Terol, 1964).

3.5.2. CIRCUNSTANCIAS QUE CONCURREN POR INFILTRACIÓN

La principal causa de la infiltración son los agentes atmosféricos que se presentan en forma de lluvia, nieve y niebla. Además de lo anterior, existen otros factores adicionales como:

- a) La poca pendiente que, con viento intermitente, permite el paso de agua de lluvia por debajo de las tejas; en otros casos, el exceso de pendiente permite el deslizamiento de las tejas debido al poco traslape entre ellas; la escasa sección de canalones y bajantes, que hacen que el agua desborde sobre los paramentos.
- b) En cubiertas de terraza, los embalsamientos producidos por un defectuoso trazado de las pendientes; insuficiente cantidad de material impermeabilizante por metro cuadrado.
- c) En muros; el empleo de aparejos con gran número de hiladas a tizón; empleo de morteros muy pobres de cemento; excesivo espesor de las juntas verticales y horizontales; falta de protección superior a cornisas y voladizos que eviten la detención del agua; así como de no disponer de goterón en elementos volados para que expulsen el agua de lluvia en lugar de que resbale por el paramento; por la presencia de sales higroscópicas en el inferior del muro y empleo de ladrillos con un alto coeficiente de succión.

3.6. HUMEDAD POR CONDENSACIÓN

La humedad por condensación (figura 16) se presenta cuando hay una alta humedad ambiental y vapor de agua que existe en el aire, y esto al entrar en contacto con una superficie a baja temperatura se convierte en gota de agua que éstas a su vez se acumulan y propician un ambiente para los malos olores, deterioro de materiales y presencia de moho (Matarredonda Terol, 1964).



Figura 16: Presencia de humedad por condensación en cuarto de vivienda (Vega & Camargo, 2023).

3.6.1. CARACTERÍSTICAS DE HUMEDAD POR CONDENSACIÓN

La condensación tiene lugar cuando la superficie interior de los paramentos alcanza el punto de rocío que coincide con la saturación total del ambiente para una determinada temperatura. La parte fundamental de la condensación es la acumulación del vapor de agua. Durante las épocas frías, habrá presencia de humedad, así como en todos aquellos inmuebles que se localicen cerca de mares, ríos, etc., debido a que hay una humedad constante en el ambiente. Así mismo, la manera en que se presentarán son manchas aisladas en los muros donde la humedad es superficial, mientras que en su interior se encuentra en estado seco (Matarredonda Terol, 1964).

3.7. HUMEDAD ACCIDENTAL

Respecto a la humedad accidental (figura 17), se consideran todas aquellas que no son asociadas a las anteriores, debido a que el principal factor se basa en la grietas, rupturas o deterioro de tuberías asociadas con el edificio como las bajadas pluviales, saneamiento, hidráulicas, etc. Y esto debido a una falta de mantenimiento constante del edificio (Pipiraite, 2017).



Figura 17: Presencia de humedad accidental en Museo Aguascalientes. A) humedad a metro y medio debido a tubería fracturada, B) localización de humedad en plafón y muro, C) humedad y patologías presentes en techo. Imágenes tomadas de informe técnico: "Estudio de bajadas pluviales del Museo de Aguascalientes"-ICA.

3.8. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE MATERIALES

El suelo cuenta con características especiales que provocan que el agua se filtre y se distribuya por los estratos de este, por lo que se considera necesario definir conceptos para poder entender el fenómeno y sus implicaciones.

3.8.1. POROSIDAD

La porosidad de los materiales de construcción afecta sus propiedades, tales como permeabilidad, resistencia y durabilidad. En esta última propiedad, la porosidad es considerada un factor fundamental (Bernavente et al., 2004).

Este parámetro se determina calculando la relación entre el volumen total de los poros y el volumen total de la pieza de prueba o roca. Para determinar la porosidad, porcentaje de absorción y densidad se emplea la norma *ASTM C-642*.

La clasificación de la porosidad de la roca depende del grado de su interconexión con el exterior. La porosidad abierta de la roca se caracteriza por el volumen de poros que poseen un cierto nivel de interconexión con el exterior, y esto está estrechamente relacionado con la durabilidad de la roca. Por el contrario, la porosidad cerrada se refiere al volumen de poros de la roca que no tienen comunicación alguna con el exterior. La suma de la porosidad

interconectada y no interconectada se conoce como la porosidad total de la roca, que se usa como un parámetro general crucial que rige sus propiedades mecánicas. En consecuencia, no es posible obtener directamente la porosidad no interconectada, sino que se obtiene calculando la diferencia entre la porosidad total y la porosidad interconectada (Bernavente et al., 2004).

3.8.2. ABSORCIÓN

La absorción se define con precisión como el aumento de masa de un agregado seco después de la inmersión en agua durante un período de 24 horas a temperatura ambiente. Este aumento de masa se produce como resultado de la infiltración del agua en los intersticios de la sustancia y no abarca el agua que se adhiere al exterior de las partículas. La representación cuantitativa de este fenómeno, expresada como proporción de la masa desecada, sirve como indicador de la porosidad del material (IMCYC, 2011). Este parámetro se determina mediante la norma NMX-C-165-ONNCCE-2004.

3.8.3. PERMEABILIDAD

Un material se clasifica como permeable si permite el paso de un flujo sin alterar su configuración interna. La permeabilidad de un material se confirma cuando permite que una cantidad sustancial de fluido lo atraviese en un periodo de tiempo específico, mientras que se considera impermeable si la cantidad de fluido es insignificante (García Gómez, 2017).

La velocidad con la que el fluido atraviese el material dependerá de tres factores básicos: porosidad del material, densidad del fluido y presión a que está sometido el fluido.

Autores como (Fierro Losada et al., 2017; Angelone et al., 2006) determinan que para medir la permeabilidad de un material o suelo existen dos formas: en laboratorio o "in situ". Sin embargo, al realizar las pruebas en el laboratorio es posible conocer características como la relación de vacíos de la muestra. Para poder determinar y analizar la permeabilidad en un laboratorio existen ensayos de carga constante, ensayos de carga variable, así como de manera directa e indirecta mediante la prueba edométrica. Aunado a las pruebas anteriores, es posible emplear el coeficiente de permeabilidad, el cual permite analizar en un corto tiempo cuando se trata de agregados o suelos finos. En el caso de agregados o suelos gruesos se emplea un permeámetro de cabeza constante.

3.9. MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA EL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

3.9.1. GRAVIMETRÍA

La gravimetría es un método directo de medición de la humedad del suelo, esto por medio de un proceso en el cual se recolecta una muestra del suelo a analizar, pasa por un proceso de pesaje antes y después de ponerlo a secar ya sea a temperatura ambiente o por medio de un horno para al final ver cuál es la cantidad de humedad que se tenía almacenada en esa muestra al momento de ser extraída. No obstante, este método no es recomendable implementar para tener un registro continuo de humedad en el suelo ya que para generar dicha información se tendría que obtener constantes muestras para llegar a un resultado satisfactorio (Sevruk, 2014).

3.9.2. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

La extracción de la muestra puede llegar a dificultarse debido a las características del terreno como lo es si está seco o en su defecto muy húmedo o contiene piedras u otros materiales.

Para realizar una extracción adecuada de las muestras, se debe evitar que dichas sufran cualquier alteración como pierdan o ganen humedad, o que se les asocie cualquier contaminante y es por eso que se debe de tener e implementar medidas protocolarias necesarias tanto de extracción como de transporte (Sevruk, 2014). En la NMX-416-2003 se establece el procedimiento para la obtención de muestras alteradas e inalteradas.

3.9.3. DESCRIPCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MUESTREO

El equipo para la extracción de muestras es el barreno de mano el cual consiste en un mecanismo de tubos de aluminio que alcanzan una profundidad de hasta 17 m. Sin embargo, uno de los barrenos más utilizados son los cilindros de diámetro de 76 mm y una longitud de 230 mm y con un tubo de 1.4 m en la parte superior y dos dientes cortadores curvos e la parte inferior. No obstante, debido a la composición del cilindro es difícil que al momento de la extracción se contamine la muestra debido al cilindro solido en su interior. Por otro lado, si existen terrenos en el cual se deban hacer muestreos mayores a 1.5 m de profundidad es necesario añadir tubos de aluminio de 19 mm de diámetro y 0.9 m de longitud. Una vez recolectada la muestra, se extrae con un golpe por medio de un martillo de goma y se procede a guardarla hasta llegar al laboratorio (Sevruk, 2014).

3.9.4. PROCEDIMIENTO DE LABORATORIO

Para el procedimiento del laboratorio plantea como primer paso: “Las muestras individuales de suelo húmedo se miden en sus respectivos contenedores de transporte. Posteriormente, estos recipientes se abren y se colocan dentro de un horno secador, que tiene la capacidad de mantener una temperatura de $105 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ” (Sevruk, 2014, p.2).

Sin embargo, Sevruk afirma, qué si las muestras están compuestas de turba o contienen cantidades considerables de yeso, es imprescindible que el horno se mantenga a una temperatura de $50 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$. En tales casos, puede ser necesario prolongar la duración del proceso de secado hasta que las muestras hayan alcanzado un estado completamente seco. En el caso de que las muestras estén compuestas de gravas y piedras, es posible modificar el procedimiento antes mencionado determinando el peso o el volumen de las gravas y/o piedras por separado (Sevruk, 2014).

3.9.5. PERMEÁMETRO

Para establecer con que características debe contar el permeámetro a utilizar, la función de sus partes y en que consiste cada una, con ayuda de la Norma internacional *ASTM D2434-68* y su artículo *Standar Test Method for Permeability of Granular Soils*, se dan a conocer cantidades, muestras y proceso para desarrollar el proceso de permeabilidad de una muestra (figura 18).



Figura 18: Permeámetro Tri-Flex 2. Imagen propia.

3.10. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

Para Bosiljkov et al., (2010) al intervenir un edificio es necesario determinar las pruebas que se harán y de que categoría serán, debido a esto existen ensayos no destructivos, otras como las Técnicas de Destrucción Secundaria o Menor y las Técnicas Destructivas (NDT, MDT y DT, respectivamente, por sus siglas en ingles).

En el estudio realizado por Orbán & Gutermann (2009), se menciona que el método más implementado en los últimos años es la inspección visual, que en conjunto con las NDT y MDT, se ha tenido un avance significativo en las evaluaciones in situ debido a la tecnología que se implementa.

Sin embargo, Mesanza Moraza, (2011) postula que la utilización de tales metodologías ya existía en 1868, cuando se iniciaron los esfuerzos para emplear campos magnéticos con el fin de identificar fisuras y grietas en las ruedas y ejes de los ferrocarriles. Posteriormente, en 1941, se creó la Sociedad Americana para Ensayos No Destructivos (ASNT), que estableció las pautas a seguir en la implementación de estas metodologías, consolidando así su condición de la sociedad más especializada en el campo de los Ensayos No Destructivos (NDT) durante esa época. En la actualidad, forma parte del ámbito de competencia del Comité Internacional de Ensayos No Destructivos (ICNDT).

De igual manera Mesanza Moraza agrega que los métodos no destructivos son ensayos que no producen cambios permanentes en las características físicas, químicas, mecánicas o de dimensión del material que se examina. Estas técnicas tienen un impacto mínimo en el objeto bajo investigación (Mesanza Moraza, 2011).

3.11. CLASIFICACIÓN DE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS

De acuerdo con (González & de Montes, 2007), los métodos que se clasifican a continuación son con base en la estimación de las propiedades de los materiales por lo que se deriva de acuerdo a su implementación.

Los métodos mecánicos aplican fuerza y miden la deformación, además de otras acciones mecánicas, por lo que dentro de este grupo se encuentran las pruebas de carga, clasificación mecánica, sondeo con resistógrafo, entre otras. Por otro lado, existen los métodos electromagnéticos, las cuales consisten en mediciones por medio de corriente

eléctrica o campos magnéticos, por lo que en este grupo se encuentra la resistencia eléctrica, microondas y la termografía (figura 19).

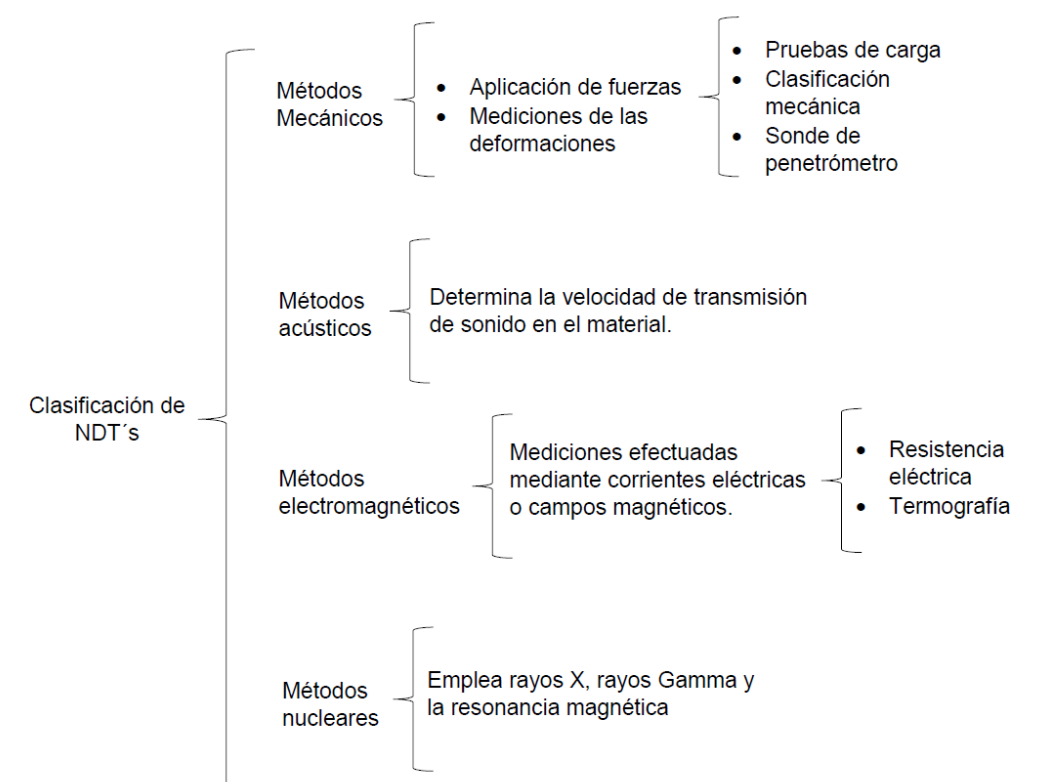


Figura 19: Clasificación de NDT. Imagen propia basada en información de González & de Montes (2007).

3.12. TECNICAS E INSTRUMENTOS NO DESTRUCTIVOS PARA LA DETECCIÓN DE HUMEDADES

3.12.1. MAPEO DE DAÑOS

Para el mapeo de daños se consulta el glosario del ICOMOS (2011), donde por medio de las observaciones en campo es posible reconocer las afectaciones y sus características, utilizando una bitácora en el cual se realizarán las anotaciones pertinentes para posteriormente poder determinar el método no destructivo más eficaz para la detección y caracterización de las humedades (figura 20).

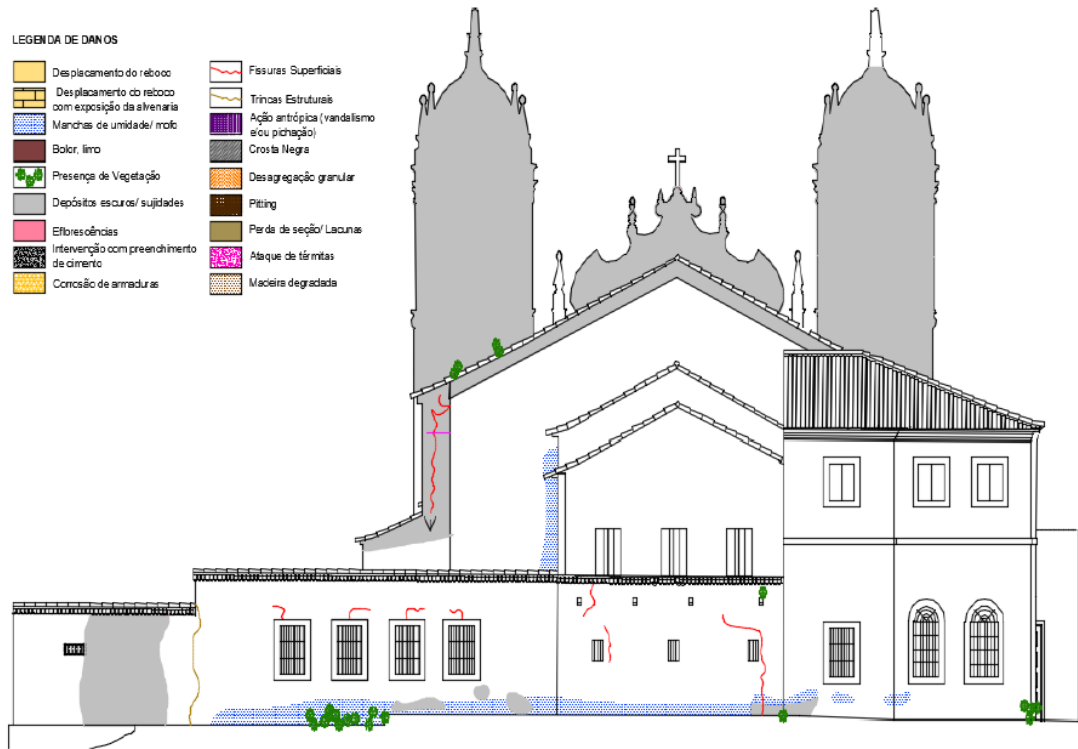


Figura 20: Mapeo de danos en fachada sur de Igreja de Carmo en Olinda, Pernambuco (Rocha E.A. et al., 2018).

3.12.2. HIGRÓMETRO

Los sensores de humedad son instrumentos que se utilizan para medir el contenido de humedad del ambiente. El aparato empleado para medir los niveles de humedad en la atmósfera se denomina higrómetro. Los sensores de humedad se pueden clasificar en dos formas: por el tipo de humedad y por parámetros de humedad. La primer clasificación está dado por los sensores de humedad absoluta y de humedad relativa, mientras que la segunda clasificación son los sensores de humedad capacitivos, por conductividad eléctrica (o resistiva) y conductividad térmica (Jimenez et al., 2013).

“El higrómetro es una técnica no destructiva que analiza de manera superficial el porcentaje de humedad contenida en el suelo u objeto” (Salas-García et al., 2010).

3.12.2.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL HIGRÓMETRO

Sensores de humedad resistivos: estos sensores en particular se utilizan con el fin de cuantificar la resistencia (impedancia) o la conductividad eléctrica. El principio fundamental en el que se basa esta categoría de sensores de humedad resistivos es en la idea de que

la conductividad eléctrica de los conductores no metálicos depende de su contenido de agua (Fray & Jafferson, 2016).

Fray & Jafferson (2016) y Kouro (2001) explican que los sensores de humedad resistivos operan al centrarse en una resistividad inicialmente baja, la cual experimenta cambios significativos en respuesta a las variaciones en la humedad. La relación entre la resistencia y la humedad sigue una tendencia exponencial inversa. En este proceso, se deposita un material de baja resistividad sobre dos electrodos, dispuestos en un patrón interdigital para ampliar la superficie de contacto. La resistividad entre los electrodos varía conforme la capa superior absorbe agua, y esta variación se puede medir mediante un sencillo circuito eléctrico. Algunos de los materiales comúnmente empleados incluyen sal, sustratos especialmente tratados, polielectrolitos sólidos y polímeros conductores. Para proporcionar una capa adicional de protección, los sensores de humedad resistivos modernos suelen estar recubiertos con una sustancia cerámica, y los electrodos están fabricados con metales como oro, plata o platino.

3.12.3. TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA (ERT)

La Tomografía de Resistividad Eléctrica es un método que consiste en introducir corriente eléctrica directamente al suelo. Dicha corriente modificará el campo potencial del subsuelo, que esta a su vez permitirá medir la resistencia existente (Gabarrón Sánchez, 2013).

3.12.3.1. PRINCIPIOS BÁSICOS

El objetivo de aplicar estudios eléctricos es determinar el cómo se distribuye las resistividades eléctricas que existen en el subsuelo por medio de las mediciones que se realizan desde la superficie, por lo que, es necesario abordar parámetros para mayor comprensión.

3.12.3.1.1. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Para determinar la Resistividad eléctrica que existe en un determinado medio (Gabarrón Sánchez, 2013), explica que por medio de las leyes de la física, en específico de la Ley de Ohm se establece que mientras exista una relación entre la corriente aplicada y la diferencia de potencial esta definirá la resistencia del elemento, de tal manera que si se combinan estos factores se obtiene el producto de la resistencia y la distancia, obteniendo así la resistividad eléctrica.

3.12.3.1.2. CONDUCTIVIDAD DE LOS MATERIALES

Para determinar la conductividad de los materiales se debe tener en cuenta que ésta es la capacidad que tiene un material por sí solo de transmitir la corriente eléctrica, lo que se deberá a las características propias del material. Sin embargo Reynolds (2011), argumenta que para determinar la conductividad del material se deben de conocer las tres clasificaciones que existen: electrolítica, electrónica y dieléctrica. La primera de ellas depende de muchos factores debido al movimiento de los electrones en un medio electrolítico es lento relativamente además este depende del tipo de iones y su conformación; la segunda, se observa principalmente en los metales debido al rápido movimiento de los electrones; y la tercera, se da en materiales poco conductores y aislantes.

En la tabla 1 se muestran rangos de resistividad y de conductividad de diferentes tipos de rocas, así como de suelos, agua y químicos, que servirán de referencia para la interpretación de resultados.

Tabla 1 Valores de resistividad y conductividad en diferentes tipos de piedras. Tabla adaptada de (Loke, 2001).

Material	Resistividad ($\Omega\cdot m$)	Conductividad (S/m)
Roca ígnea y metamórfica		
Granito	$5 \times 10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 2 \times 10^{-4}$
Basalto	$10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 10^{-3}$
Pizarra	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$	$2.5 \times 10^{-8} - 1.7 \times 10^{-3}$
Mármol	$10^2 - 2.5 \times 10^8$	$4 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Cuarcita	$10^2 - 2 \times 10^8$	$5 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Roca sedimentaria		
Arenisca	$8 - 4 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4} - 0.125$
Esquisto	$20 - 2 \times 10^3$	$5 \times 10^{-4} - 0.05$
Caliza	$50 - 4 \times 10^2$	$2.5 \times 10^{-3} - 0.02$
Suelos y agua		
Arcilla	1 - 100	0.01 - 1
Aluvión	10 - 800	$1.25 \times 10^{-3} - 0.1$
Agua subterránea dulce	10 - 100	0.01 - 0.1
Agua de mar	0.2	5
Químicos		
Acero	9.074×10^{-8}	1.102×10^7
Cloruro de Potasio	0.708	1.413
Cloruro de Sodio	0.843	1.185
Ácido Acético	6.13	0.163
Xileno	6.998×10^{16}	1.429×10^{-17}

Los poros del suelo constituyen un aspecto esencial del comportamiento del mismo, ya que la cantidad, dispersión y morfología de dichos huecos afectan de manera crucial al contenido de aire y agua del suelo (figura 21) (Gabarrón Sánchez, 2013, p.17).

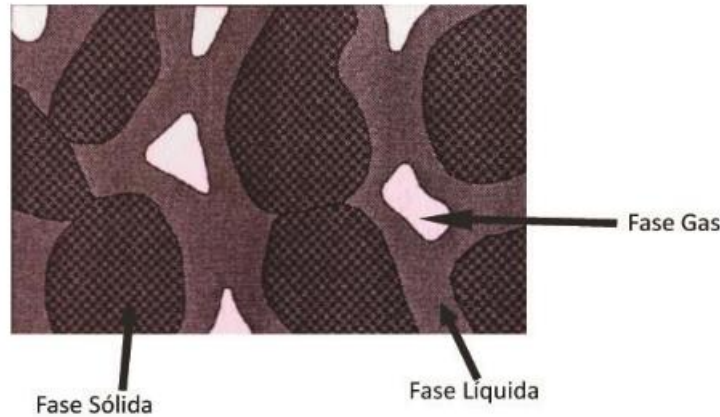


Figura 21: Fases del Suelo (Gabarrón Sánchez, 2013).

Por consiguiente, debido a que los suelos presentan poros y estos a su vez contienen agua, se puede determinar que los suelos en su mayoría son electrolíticos, por lo que es un factor en el cual, al contener partículas de agua este facilita la movilización de iones y la transmisión de corriente. Además, otro factor importante para lograr una correcta conductividad, son las sales disueltas contenidas en el agua, lo que favorece la propagación conductiva (Gabarrón Sánchez, 2013).

Así mismo, Gabarrón Sánchez (2013), explica que la temperatura es un factor crítico que puede alterar la conductividad debido a que existe un comportamiento en cualquier fluido, como la viscosidad, la cual se puede llegar a alterar; es decir, si la temperatura es baja, aumenta la viscosidad y en consecuencia aumenta los valores de resistividad.

3.12.3.1.3. CONFIGURACIONES DE LA TÉCNICA ERT

En la aplicación de la Tomografía de Resistividad Eléctrica existe una serie de arreglos que consisten en colocar los electrodos de una forma en específico, y estos de acuerdo con la configuración determinan una medición basada en sus características. A continuación, se presentan algunos arreglos:

Configuración tipo Wenner. La configuración conocida como tipo Wenner (figura 22) presenta una separación simétrica entre los electrodos. Dentro de la formación, se colocan

los electrodos de corriente y potencial. La ecuación $FA= 2\pi Ar$ proporciona la resistividad aparente. Si bien esta configuración en particular suele ofrecer una resolución vertical excelente, tiende a ser menos eficaz para detectar cambios en la resistividad horizontal. En términos de profundidad de la investigación, esta configuración normalmente arroja un valor de aproximadamente 0.5 veces el espaciado de A , lo que limita el arreglo en comparación con otras configuraciones (Gabarrón Sánchez, 2013, p.22).

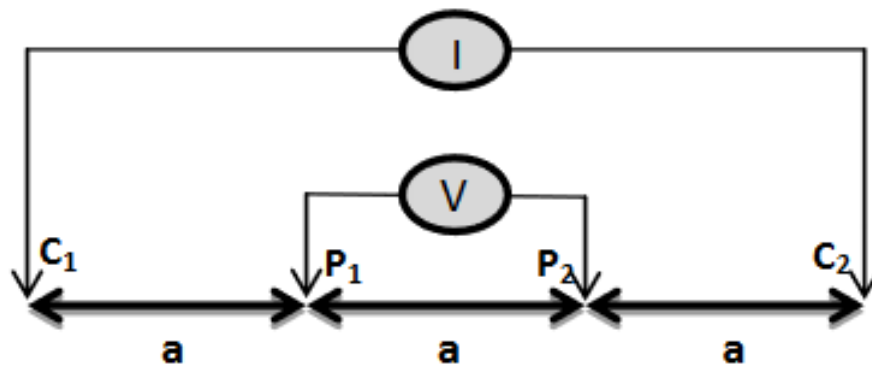


Figura 22: Configuración Wenner (Gabarrón Sánchez, 2013).

Configuración tipo Schlumberger. En este arreglo, la distancia entre los electrodos de potencial permanece constante (figura 23), mientras que los electrodos de corriente se separan progresivamente hasta que la medición de la tensión se vuelve extremadamente difícil. Por lo general, la separación entre los electrodos de potencial no es más de una quinta parte de la mitad de la distancia entre los electrodos de corriente. A medida que la medición de voltaje disminuye significativamente, los electrodos de potencial se separan aún más, lo que permite repetir las operaciones hasta alcanzar la profundidad de muestreo deseada. Esta configuración, proporciona una profundidad promedio que supera en un 10% a la alcanzada con la configuración de Wenner para el mismo intervalo entre los electrodos C1 y C2 (Gabarrón Sánchez, 2013, p.23).

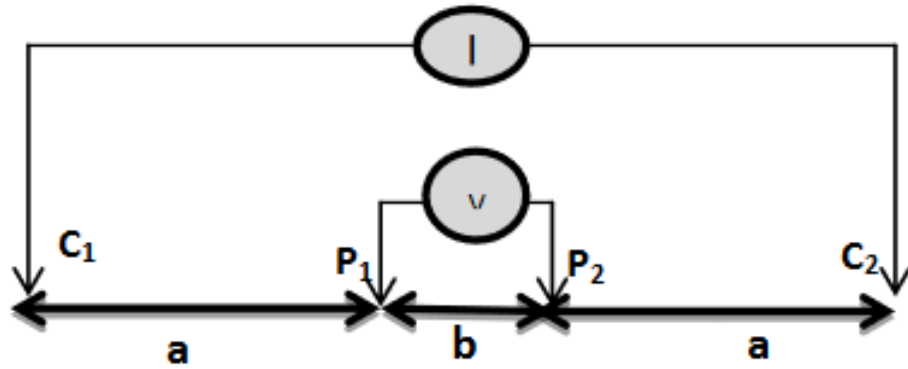


Figura 23: Configuración Schlumberger (Gabarrón Sánchez, 2013).

Configuración Polo-polo. La configuración polo-polo consiste en un único electrodo de corriente (C1) y un único electrodo de potencial (P1). Los electrodos de corriente y potencial restantes (C2 y P2) deben colocarse a una distancia mínima de 20 veces la distancia máxima entre C1 y P1. Esta configuración particular se emplea habitualmente en levantamientos con distancias entre electrodos de menos de 10 metros. Sin embargo, un inconveniente de esta configuración es el alto nivel de ruido presente en las mediciones, que puede atribuirse a la gran separación entre los electrodos (Gabarrón Sánchez, 2013, p.23).

Configuración Dipolo-dipolo. La configuración conocida como dipolo-dipolo (figura 24) se emplea con frecuencia en investigaciones que implican una distancia significativa entre los electrodos de corriente y de potencial. Presenta un alto nivel de sensibilidad a las alteraciones de resistividad que se producen en una dirección horizontal, mientras que muestra una sensibilidad relativamente limitada a los cambios en la dirección vertical. La profundidad a la que normalmente se llevan a cabo las investigaciones depende tanto del parámetro denominado «n» como del factor denominado «a». La resistividad aparente, puede determinarse empleando la ecuación $\rho_a = \pi n(n + 1)(n + 2)aR$ (Gabarrón Sánchez, 2013, p.23).

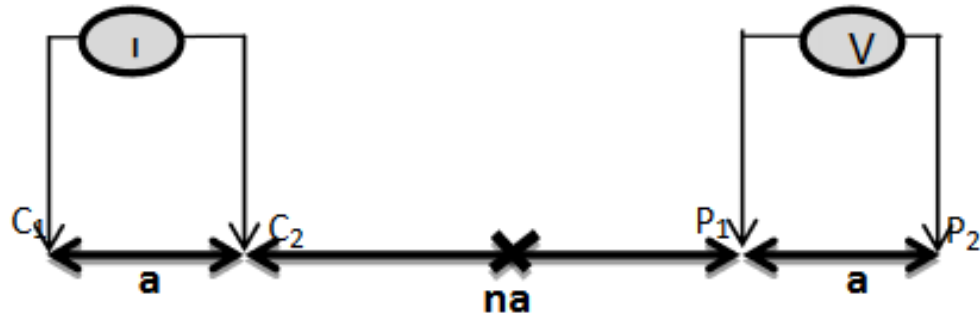


Figura 24: Configuración Dipolo-Dipolo (Gabarrón Sánchez, 2013).

3.12.4. TERMOGRAFÍA INFRARROJA (IT)

De acuerdo con de Prada Pérez de Azpeitia (2016), la IT es una técnica por el cual la radiación infrarroja es detectada con el uso de cámaras térmicas, mostrando temperaturas superficiales de cualquier cuerpo sin necesidad que haya luz visible, haciéndolo visible al ojo humano. A través de la cámara se pueden calcular las temperaturas observadas.

3.12.4.1. PRINCIPIOS DE LA TERMOGRAFÍA

3.12.4.1.1. RADIACIÓN INFRARROJA

En la parte visible del espectro, existe una forma de radiación electromagnética conocida como radiación infrarroja (IR, por sus siglas en inglés), que abarca longitudes de onda que van de 760 a 780 nm, adyacentes a la región roja. Además, se extiende a longitudes de onda de entre 10,000 y 15,000 nm, lo que se acerca al ámbito de las microondas (Rodríguez & Rodríguez, 2017, p.28).

Rodríguez & Rodríguez (2017), menciona que:

La radiación infrarroja (IR) es generada por cuerpos calientes, ya que surge de las fluctuaciones en los niveles de energía de los electrones que orbitan alrededor de los átomos o de los estados vibratorio y rotacional de los enlaces moleculares. Cuando la temperatura de un objeto supera el cero absoluto (-273 °C), emite radiación IR. La cantidad y la longitud de onda de la radiación emitida dependen de la temperatura y la composición del objeto en cuestión (p.28).

3.12.4.1.2. LUZ VISIBLE Y RADIACIÓN INFRARROJA

Rodríguez & Rodríguez (2017) y Esteve (2016) resaltan que:

Es la parte del espectro electromagnético que es detectable por el ojo humano y la radiación infrarroja es otra parte del espectro con longitudes de ondas no detectables al ojo humano y emitido por cualquier objeto cuya temperatura sea mayor al cero absoluto (p.29).

En la figura 25 se muestra la escala de radiaciones electromagnéticas en la que se detalla el rango del espectro infrarrojo visible e invisible.

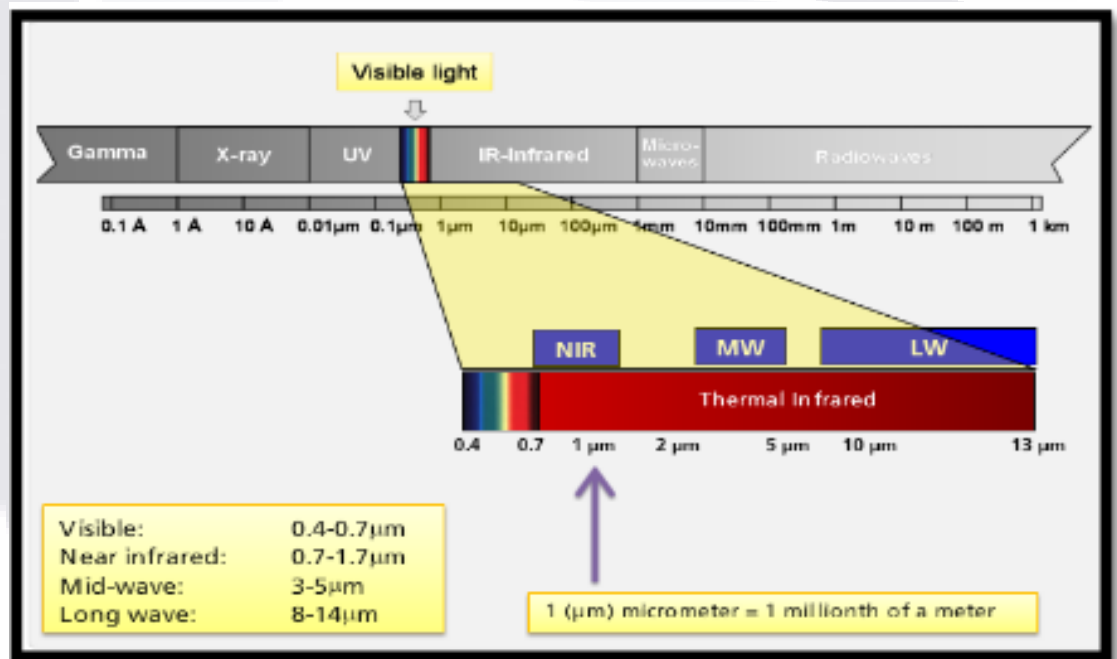


Figura 25: Espectro Infrarrojo (Rodríguez & Rodríguez, 2017).

3.12.4.1.3. PROCESOS DE RADIACIÓN INFRARROJA EN CUERPOS

Algunas de las propiedades que presentan los cuerpos cuando interactúan con la radiación infrarroja son la absorción, transmisión o reflexión. Por otro lado, los materiales de un cuerpo irradian energía infrarroja debido a la temperatura, la cual es percibida en la cámara como emisiones superficiales de los materiales, ver figura 26. Otras características de la

radiación en cuerpos son: la reflexión, el reflector especular, el reflector difuso, la absorción y la transmisión que dejan cada uno de los objetos que se pudiera analizar (Rodríguez & Rodríguez, 2017).

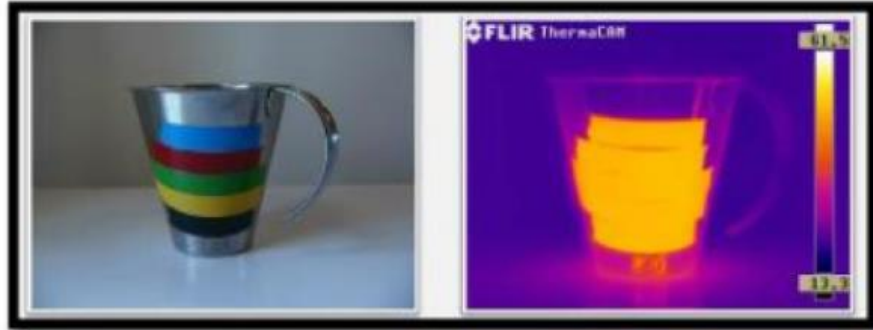


Figura 26: Energía Infrarroja de un objeto (Rodríguez & Rodríguez, 2017).

3.12.4.1.4. ENERGÍA

La energía como concepto elemental este definido como la capacidad para hacer trabajo, esta energía puede tomar varias formas tales como energía eléctrica, química, mecánica y de calor. Sin embargo, cada objeto u elemento genera energía radiada lo cual por medio de las cámaras se convierte en imágenes visibles a partir de la temperatura superficial de los objetos captados por la cámara (Rodríguez & Rodríguez, 2017, p.34).

3.12.4.1.5. TEMPERATURA

Los cuerpos están constituidos por medio de átomos y moléculas en movimiento en el cual aumentan o disminuyen según la energía que generan una mayor o menos velocidad en su actividad. La medida de la velocidad se le denomina temperatura mientras que a la energía producida se le llama calor. La unidad de medida de la temperatura es grados Celsius, Fahrenheit o Kelvin (Rodríguez & Rodríguez, 2017).

Dicho lo anterior, cuando un cuerpo aumenta o disminuye su temperatura esta es reciproco con la energía, es decir, si la temperatura aumenta, la energía aumenta y provoca lo que se denomina como caliente. Mientras si es, al contrario, si la temperatura baja y la energía también, tenemos un cuerpo frío.

3.12.4.1.6. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor es con base en la interacción de dos cuerpos, cuando existe el caso de que uno de los dos cuerpos presenta mayor temperatura y el otro no, al unirse, la diferencia de temperatura que presentaban hace que fluya el calor espontáneamente de un

cuerpo al otro. Cuando los dos cuerpos alcanzan la misma temperatura, se dice que se encuentran en un equilibrio térmico (Neita Duarte & Peña Rodríguez, 2011).

El calor se transfiere de un objeto a otro de 3 maneras diferentes: conducción, convección y radiación. La primera lo conduce por medio del contacto; la segunda por el movimiento que tiene; y la tercera es producida por medio de las ondas electromagnéticas (Rodríguez & Rodríguez, 2017).

3.12.4.1.7. EMISIVIDAD

“La emisividad es la capacidad que tiene un cuerpo para radiar energía infrarroja”(Rodríguez & Rodríguez, 2017, p.39). Cada material genera un valor de emisividad propio, sin embargo, existen factores como el recubrimiento o algún acabado, que influye en ese valor. Por otro lado, existen características particulares que determinan si la emisividad es baja como: las superficies pulidas, brillantes y suaves; o alta como: entre más rugoso sea la superficie y si las superficies están sometidas en contacto con arena y/o superficies arañadas.

3.12.4.2. ASPECTOS IMPORTANTES PARA MEDICIONES CON CÁMARAS TERMOGRÁFICAS

3.12.4.2.1. ENFOQUE

La consecuencia de un mal enfoque, es la falta de claridad que impide determinar con facilidad el objeto analizado, resaltando las características erróneas y poco confiables para la extracción y procesamiento de datos, obteniendo así un error elevado, ver figura 27. Por otro lado, si el enfoque no es el adecuado en diversas ocasiones pudiera atribuirse a fallas en el equipo (Neita Duarte & Peña Rodríguez, 2011).

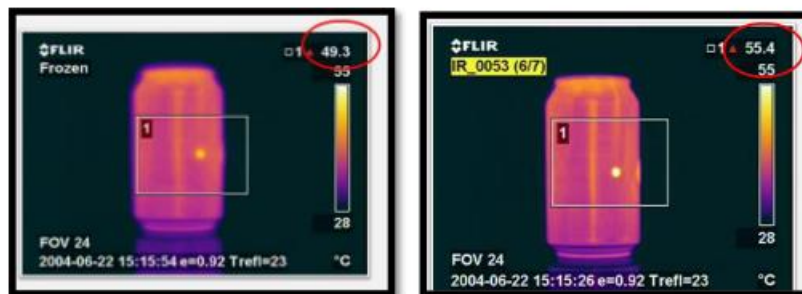


Figura 27: Enfoque y calibración de la cámara infrarroja (Rodríguez & Rodríguez, 2017).

3.12.4.2.2. NIVEL E INTERVALO

El rango de temperatura se emplea para fijar los límites de los valores mínimo y máximo que la cámara de infrarrojos puede medir. Cada cámara tiene su propio rango específico de temperatura, y es esencial que el objeto medido se encuentre dentro de dicho rango. El intervalo, que representa una fracción del rango de temperatura, puede ajustarse manualmente en la cámara o mediante el software, influyendo en el contraste térmico de la imagen. Por otro lado, el nivel actúa como el punto medio del intervalo y determina el brillo general de la imagen. Este proceso de ajuste, que involucra tanto el intervalo como el nivel, se conoce comúnmente como calibración. Si los ajustes térmicos de la cámara no se calibran adecuadamente, el usuario podría pasar por alto ciertas anomalías o discontinuidades (Rodríguez & Rodríguez, 2017, p.46).

3.12.4.2.3. MEDIDA FUERA DEL RANGO DE TEMPERATURA

Si la cámara no cuenta con un enfoque, posición y distancia correcta hacia el objeto que vaya a analizar, la cámara obtiene una imagen saturada, es decir, presencia de colores predominantes en toda la sección de la imagen sin ser reales (Rodríguez & Rodríguez, 2017, p.47). En la figura 28 se muestra el ajuste del rango de calibración para obtener el efecto de la temperatura de forma correcta.

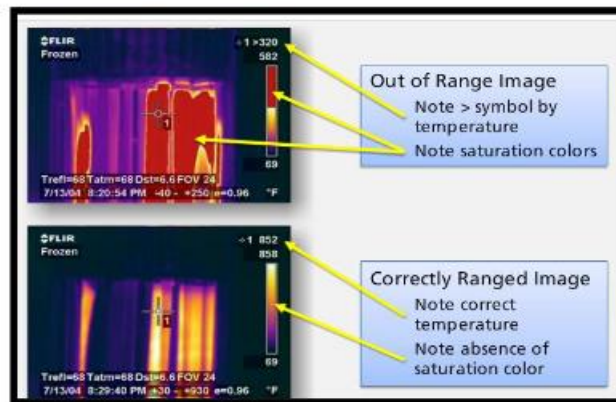


Figura 28: Rangos de calibración para la obtención de una buena imagen (Rodríguez & Rodríguez, 2017).

3.12.4.2.4. EFECTOS DE LA DISTANCIA Y EL TAMAÑO

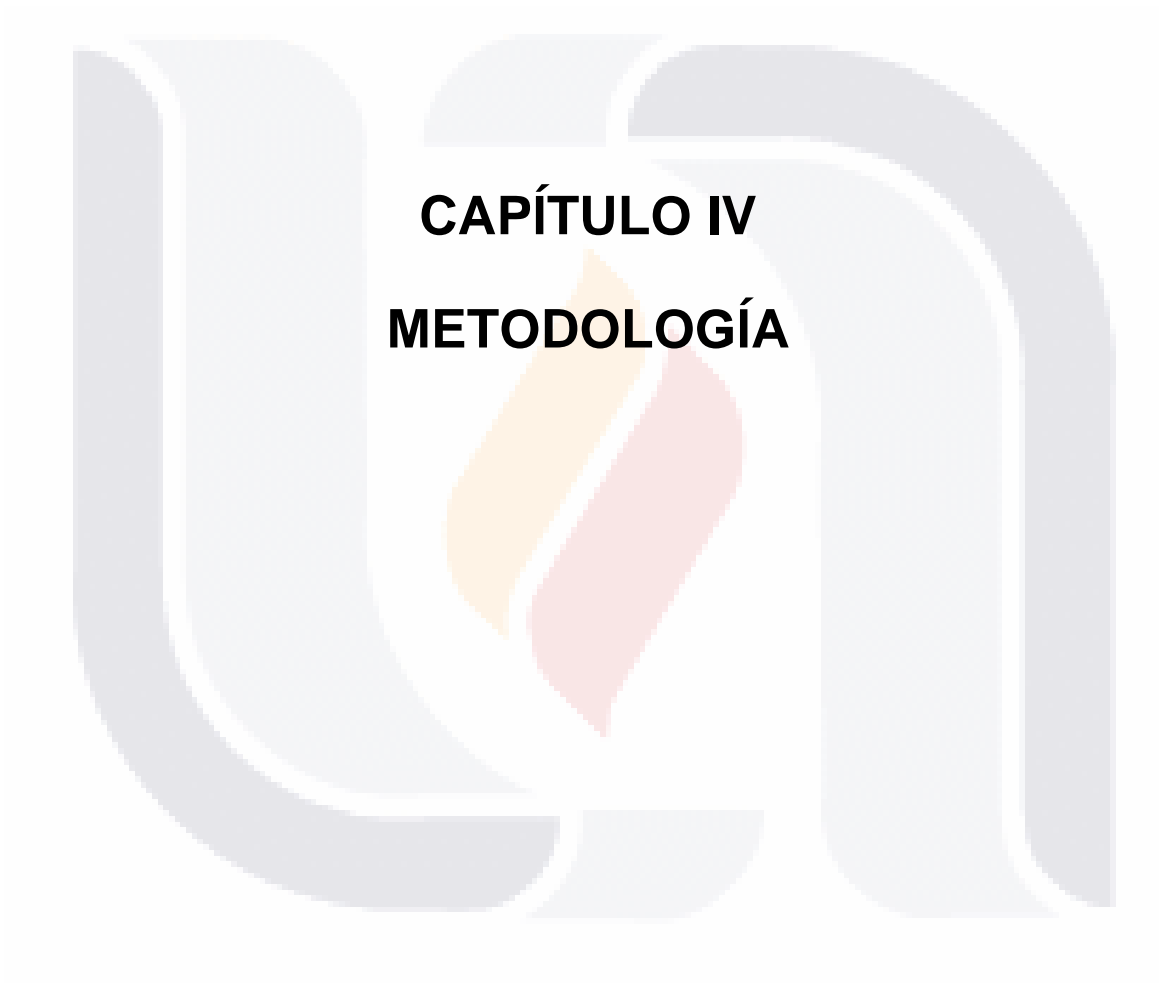
Las cámaras termográficas tienen un comportamiento similar a las cámaras digitales o telescopios, sin embargo, si se analiza un objeto a distancia, este no dará resultados

precisos, por lo que es necesario ajustar la distancia para poder realizar la medición (Rodríguez & Rodríguez, 2017).

3.12.4.3. NORMATIVA APLICABLE

Existen organizaciones Internacionales encargadas de brindar normas que consisten en establecer la técnica, definir el proceso de aplicación y el equipo a emplear, entre otras características. No obstante, sirve para que personas alrededor del mundo tengan la certeza del proceso para la obtención de resultados satisfactorios. Algunas de ellas es *American Society for Testing and Materials (ASTM)* y la *International Organization for Standarization (ISO)*, el cual consta de:

- *Estándar ASTM E1316 - 16a5 Standard Terminology for Nondestructive Examinations*
- *Estándar ASTM C1934-99a6 (Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography)*
- *Estándar ASTM E1862-977 Standard Practice for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers (ASTM)*
- *Estándar ASTM E1933 – 99a8 Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers (ASTM)*
- *Norma ISO 18434-1 Condition monitoring and diagnostics of machines Thermography (ISO 18434-1, 2008).*



CAPÍTULO IV
METODOLOGÍA

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA

4. METODOLOGÍA

4.1. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo se considera una investigación descriptiva debido a que conforme a las observaciones de las diferentes patologías encontradas se dará a la tarea de describirlas y, en su defecto, describir por medio de los estudios a implementar por qué se está presentando.

4.1.2. ESTRATEGIAS PARA RECABAR INFORMACIÓN

La primera recolección de información estará dada por los buscadores convencionales y meta buscadores para poder procesar información precisa de cómo es que dichas patologías son detectadas, porqué se presenta y por medio de qué estudios se ha obtenido mejores resultados y posteriormente ponerlos en práctica.

Habiendo procesado la información se procederá a realizar probetas donde con la información leída se haga un modelo a pequeña escala de los diferentes tipos de humedades y sometiéndolos al ambiente en cuestión y posteriormente serán cotejados y comparados los datos obtenidos con la teoría utilizando los métodos no destructivos pertinentes según sea el caso.

4.1.3. INSTRUMENTOS PARA ANALIZAR INFORMACIÓN

En la implementación de los métodos no destructivos, se ejecutarán solo aquellos con los que cuente en la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Además, se utilizarán Software como FLIR TOOLS, SIGMAPLOT y SURFER 16 para el procesamiento de datos de las técnicas superficiales mientras que para la extracción de datos referente al comportamiento interior se apoyará de software como PROSYS II, RES2DIND, ZONDRES2D, SURFER 16 y VOXLER para el procesamiento tridimensional.

4.1.4. HIPÓTESIS

Mediante la implementación de NDT adecuados será posible la detección y caracterización de las humedades ascendentes y descendentes en edificios históricos.

4.1.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 2 Operacionalización de variables. *Elaboración propia.*

Variable nominal	Descripción de la variable	Dimensiones	Indicadores	Técnicas e instrumentos	Autores
Efectividad de los métodos	Evaluar los Métodos No Destructivos y Mínimamente Invasivos para ver la efectividad que se tiene tomando en cuenta datos como el nivel de daño hasta el costo que representa implementar dicha técnica.	Nivel de afectación	Daño volumétrico	Mapeo de daños, medición convencional	(ICOMOS, 2011), (Rosado, 2014).
		Precisión de las mediciones	Contenido de humedad	Higrómetro, resistividad eléctrica, termografía infrarroja.	(Gabarrón Sánchez, 2013), (Reynolds, 2011), (H. M. González & Coronado, 2007)
			Área Afectada	Termografía, mapeo, Higrómetro	(D. A. Rodríguez & Rodríguez, 2017), (ICOMOS, 2011)
		Tiempo requerido	Tiempo de aplicación de la técnica	Bitácora de avance	Formato establecido
			Precio de equipos utilizados	Cotización	((Li et al., 2021).
		Costos de equipo y capacitación	Tiempo invertido en la capacitación	Bitácora o entrevista a personal que aplica el método	Formato establecido
Materiales y procesos constructivos	Análisis de características de los materiales y procesos constructivos mediante me	Comportamiento o hidráulico de los materiales	Porosidad	Gravimetría	(Sevruk, 2014).
			Absorción	Gravimetría	(Sevruk, 2014).
			Permeabilidad	Permeámetro	(D 2434 – 68, 1993), (Angelone et al., 2006), (M. G. Rodríguez, 2013)
		Configuración geométrica	Forma y tamaño de los elementos	Medición y registro	Formato establecido
			Combinación y Proporción de materiales	Medición y registro	Formato establecido
Contexto ambiental	Ambiente físico mediante el cual se origina la humedad y que determina las condiciones y el comportamiento de la misma, tales como el origen, la presencia, cantidad y comportamiento	Fuente de humedad	Origen y ubicación de la fuente	Observación y Mapeo	(Martines L., 2007), (Tejeda Martínez, 2018)
		Tipos de humedad	Filtración, capilaridad, Condensación, Accidental	Patologías visibles, presencia de la humedad, observación	(<i>Humedades en la construcción</i> , 1964) (<i>libro icomos web.pdf</i> , s. f.)
			Humedad en el Ambiente y temperatura ambiental	Termómetro, Higrómetro	(H. M. González & Coronado, 2007), (Salas-García et al., 2010)

Habiendo analizado el marco teórico y las técnicas no destructivas y mínimamente invasivas se determinó que se utilizará la Termografía Infrarroja IT, el Higrómetro y la Tomografía de Resistividad Eléctrica. A continuación, se presenta la descripción de las técnicas, los equipos empleados y los softwares utilizados en el procesamiento.

4.2. TERMOGRAFÍA INFRARROJA

Para desarrollar el método de la termografía infrarroja, se necesitará una cámara termográfica Flir C3-X (figura 29) que cuenta con una interface sencilla que consta de tomar la fotografía adecuada y ésta a su vez genera una fotografía infrarroja, la cual arroja una imagen con un rango de temperaturas asociadas a una gama de colores en tonos morados, rojos, amarillos, verdes y azules.

4.2.1. DESCRIPCIÓN DE EQUIPO CÁMARA TÉRMICA FLIR C3-X



Figura 29: Cámara termográfica FLIR C3-X. Imagen del autor.

La cámara térmica compacta FLIR C3-X (figura 29) es una herramienta de inspección profesional, utilizada para el mantenimiento de instalaciones, HVAC/R, reparación eléctrica y otras aplicaciones para la resolución de problemas. De acuerdo con el proveedor, la cámara cuenta con un lente térmico, cámara de inspección visual y una linterna LED. La conectividad en la nube FLIR Ignite integrada permite la transferencia directa de datos, el almacenamiento y la copia de seguridad, por lo que las imágenes siempre están disponibles (Final test, 2023).

4.2.1.1. CARACTERÍSTICAS

De acuerdo con (Final test, 2023), la cámara FLIR C3-X tiene 128x96 (12288 píxeles), cámara visual de 5 megapíxeles, la conectividad en la nube FLIR Ignite integrada permite la transferencia directa de datos, el almacenamiento y la copia de seguridad y pantalla táctil integrada de 3.5 pulgadas implementado para inspeccionar y documentar cualquier tipo de trabajo como encontrar fusibles calientes, fugas de aire y problemas de plomería.

4.2.2. SOFTWARE FLIR TOOLS



Figura 30: Software FLIR TOOLS para procesamiento de datos.

FLIR Tools+ (figura 30) es un software de termografía diseñado específicamente para proporcionar de manera fácil las actualizaciones de la cámara termográfica y crear informes de inspecciones (Apliter termografía, s.f.).

4.2.2.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES SOFTWARE FLIR TOOLS+

Apliter termografía (s.f.) hace hincapié en que el software FLIR Tools+ abarca todas las características de FLIR Tools, entre las que se incluyen las siguientes: la capacidad de combinar imágenes IR de FLIR en panoramas radiométricos, independientemente de la secuencia en la que se hayan capturado. La capacidad de grabar y reproducir secuencias de vídeo térmicas radiométricas, así como de generar gráficos temporales. Una función que permite la creación rápida de informes personalizados en Microsoft Word.

4.2.2.2. PROCESAMIENTO

El procesamiento de imágenes se lleva a cabo en el programa FLIR TOOLS. Primero se cargan las imágenes obtenidas con la cámara térmica FLIR C3-X, después se seleccionan y se editan las imágenes pasándola por diferentes filtros y paletas de colores con la intención de acentuar algunas zonas de interés (figura 31).

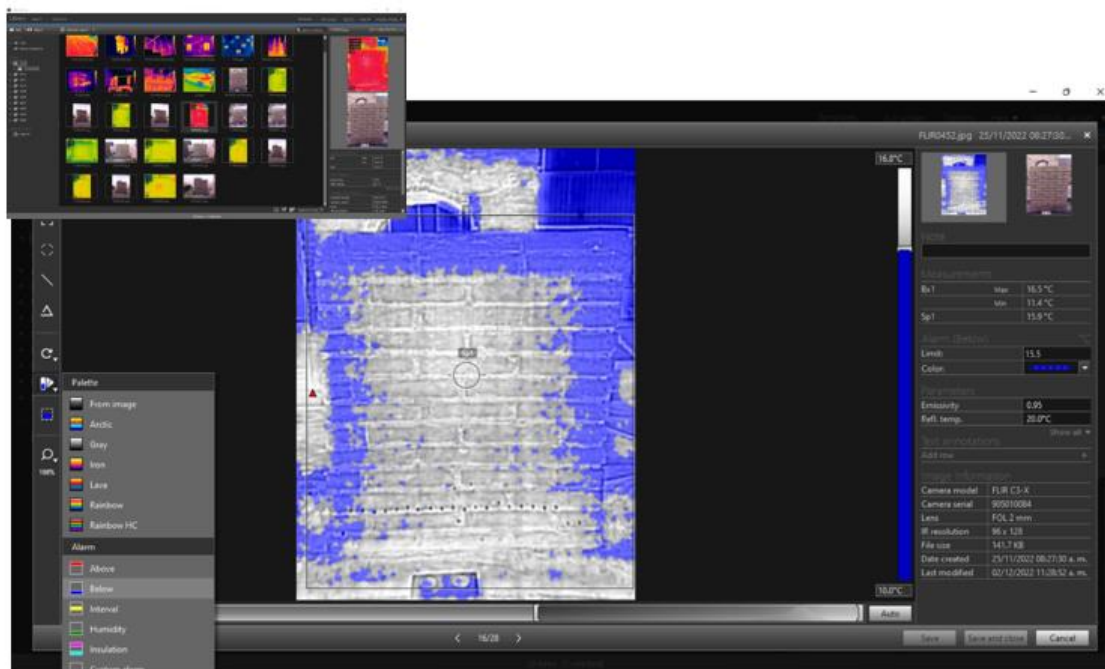


Figura 31: Procesamiento de datos con ayuda del software por medio de la recopilación de datos de la cámara. Imagen del autor.

4.3. HIGRÓMETRO

4.3.1. DESCRIPCIÓN DE EQUIPO FLIR MR55



Figura 32: Higrómetro FLIR MR55. Imagen del autor.

En la figura 32, el MR55, es un instrumento que detecta la humedad en madera y otros materiales de la construcción. El MR55 también mide la humedad relativa (RH) y temperatura ambiente.

4.3.1.1. CARACTERÍSTICAS

De acuerdo con el (FLIR MR55 USER MANUAL, s/f), resalta que mide la humedad con clavijas basadas en resistencia para maderas y otros materiales de construcción, incluidos paneles de yeso, ladrillo, cemento, hormigón, morteros de cemento, cal y yeso. Así mismo, la temperatura ambiental y humedad relativa, selecciona del grupo de acuerdo con el material, cuenta con conexión de bluetooth y tiene una batería de (2x1.5 V).

4.3.1.2. ESPECIFICACIONES

El (FLIR MR55 USER MANUAL, s/f) detecta el porcentaje de humedad contenida, la humedad relativa y la humedad ambiental. Además, proporciona la resistencia eléctrica, cuenta con una profundidad del electrodo de 0.04" (10 mm). Las dimensiones del equipo son de 7.4x2.3x1.3" (188x58x33 mm) y pesa 160g.

4.3.1.3. MEDICIONES

En la tabla 3, se presenta la calibración del equipo debido a que se le debe de dar y asignar el tipo de grupo a estudiar dependiendo al que pertenezca. Del grupo 1 al 9 se detecta la humedad en madera con un rango de 7-29 % y 30-99 % según sea el caso, por otro lado, se encuentra el grupo de 10 a 11 el cual mide la humedad en materiales de construcción el que nos dice que el rango de humedad será de 1-99 % cuando sea en el grupo 10, mientras que si es en el grupo 11 será de 1-35 %. La temperatura ambiente estará dada de 32 -122 °F o de 0-50 °C dejando la humedad relativa del ambiente en un rango de 0-10% y 10-85%.

Tabla 3 Rangos de medición y configuración del Higrómetro, adaptación del (FLIR MR55 USER MANUAL, s/f).

Función	Rango	Precisión
Humedad en maderas Grupo 1-9	1-29 %	± 2 % mc*
	30-99 %	Solo con referencia
Humedad en materiales de construcción Grupo 10 y 11	1-99 %(Grupo 10)	Solo con referencia
	1-35 %(Grupo 11)	
Temperatura Ambiente	32-122 °F (1- -50 °C)	± 2 °F (± 1 °C)
Humedad relativa ambiental	0-10 %	± 4 %
	10-85 %	± 2 %

4.3.2. SOFTWARE SIGMAPLOT



Figura 33: Software SigmaPlot para la obtención de gráficos y procesamiento de datos.

SigmaPlot (Figura 33) ayuda a crear gráficos de forma rápida y sencilla a través de hojas de cálculo. Éste cuenta con Microsoft Office integrado el cual permite acceder a Excel.

4.3.2.1. CARACTERÍSTICAS

El SigmaPlot es un software gráfico con fácil visualización, cuenta con más de 80 gráficos en 2D y 3D. Cuenta con gráficos de alta calidad y resolución (*SigmaPlot 15, s/f*).

4.3.2.2. PROCESAMIENTO

Una vez teniendo los datos en Excel y convirtiéndolos en coordenadas (x,y,z), se abre el programa se copian en la pantalla que posteriormente se verá como la figura siguiente (Figura 34).

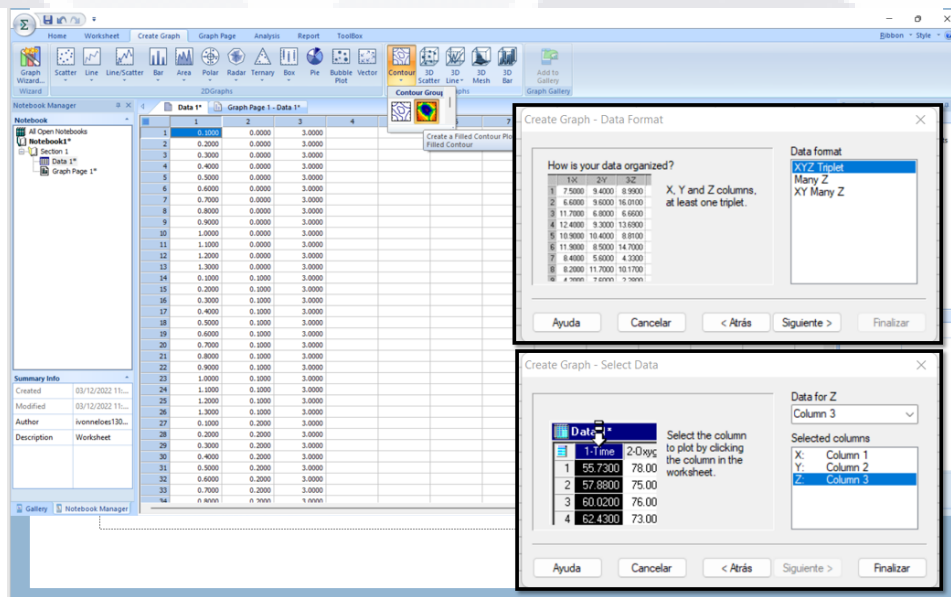


Figura 34: Procesamiento de datos con puntos de referencia y coordenadas de los puntos deseados. Software sigmaplot Imagen del autor.

Teniendo los datos en SigmaPlot, se recurre a la pestaña de Create Graph (figura 35), en crear contour y se selecciona el modelo deseado. Abrió la primera pestaña en donde se selecciona el formato de la gráfica (XYZ tarjeta), se aceptan los cambios y manda a otra pestaña donde se selecciona que datos corresponden a que coordenadas, se aceptan los cambios y arroja la gráfica con simbología según parámetros dados.

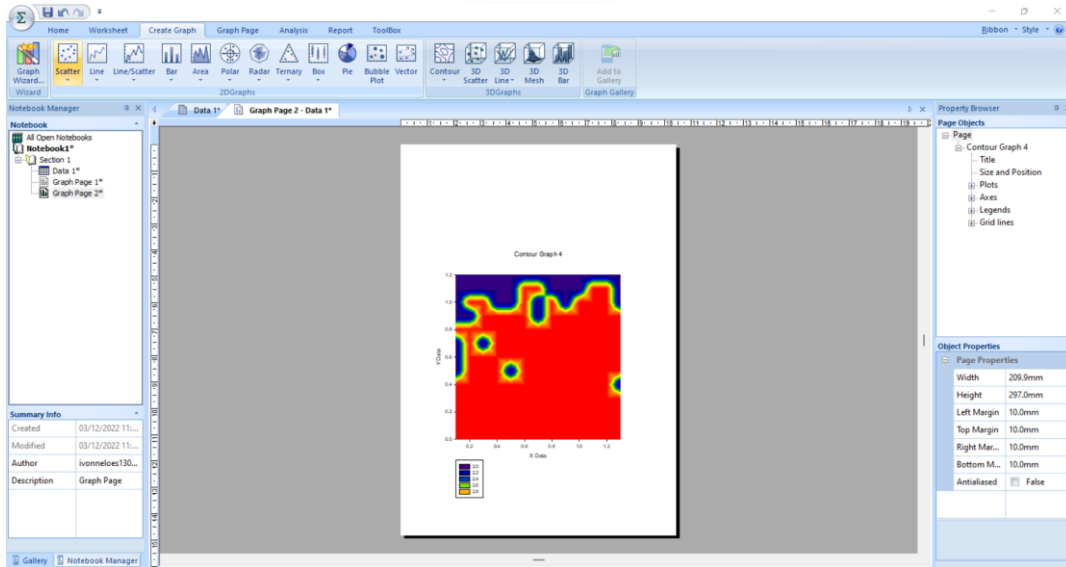


Figura 35: Obtención de mapa de contorno por medio del software sigmaplot. Imagen del autor.

Teniendo el mapa de contornos se procede a guarda y ultimar detalles de edición y se obtiene la gráfica de humedades según los datos arrojados del Higrómetro FLIR MR55.

Para el procesamiento de datos del higrómetro, no solo se utilizó el Sigmaplot, sino que consideró que el Surfer 16, es de mayor utilidad debido a la edición de imágenes y características para resaltar las humedades establecidas en las probetas.

4.4. TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA (ERT)

4.4.1. RESISTIVÍMETRO SYSCAL JUNIOR R2PLUS



Figura 36: Resistivímetro SYSCAL JUNIOR R2PLUS. Imagen del autor.

El Syscal Junior (figura 36) es un sistema que permite realizar perfilados, sondeo de resistividad y polarización inducida. El sistema ejecuta sondeos estándar capaz de registrar dos mediciones simultáneamente. Esta combinación permite realizar configuraciones tipo Wenner. La corriente de salida se ajusta automáticamente para optimizar los valores de voltaje de entrada y garantizar la mejor calidad de medición (Iris Instruments, s.f.).

4.4.1.1. CARACTERÍSTICAS

De acuerdo con la ficha técnica del equipo, el Resistivímetro cuenta con un microprocesador que controla las mediciones de resistividad eléctrica y cargabilidad. LCD, botón de voltaje, intensidad, SP y desviación estándar.

El Syscal Junior cuenta con una serie de configuraciones como: Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo, Wenner, Polo-Polo, Schlumberger, Gradiente, entre otras. Éstas van en función a lo que se quiera analizar y detectar. Así mismo, el equipo cuenta con una memoria de almacenamiento de hasta 44,800 mediciones, descarga para pc y USB.

4.4.1.2. APLICACIONES

Iris instruments (s.f), menciona que el Syscal Junior permite monitorear y mapear la contaminación de suelos, control de salinidad, explotación de aguas subterráneas poco profundas, localización de lechos rocosos erosionados y determinar la profundidad y espesor de acuíferos.

4.4.1.3. ESPECIFICACIONES DE CORRIENTE DE SALIDA

En las especificaciones de corriente de salida, el resistivímetro cuenta con una intensidad arriba de 1250 Ma, un voltaje arriba de 400 V, poder de encendido mayor a 100 W, tiempo de ciclo o duración de pulso de 0.25, 0.5, 1, 2, 4 y 8 segundos y una precisión de mediciones de 0.5 % (Iris instruments, s.f.).

4.4.1.4. ESPECIFICACIONES GENERALES

Tomando las especificaciones generales, Iris instruments (s.f), resalta que las dimensiones del Syscal Junior R2PLUS es de 31x21x21 m, pesa 10 kg, tiene una memoria de almacenamiento de 44,800 lecturas, tiene entrada USB para la descarga de datos y botón de emergencia.

4.4.2. SOFTWARE PROSYS II

Una vez teniendo las mediciones se procede a descargar los datos del equipo para posteriormente procesarlos en Prosys II (figura 37).

Prosys II es un software que permite transferir puntos, editar, procesar datos de resistividad y de carga determinando los datos ciertos para su análisis (Iris Instruments, s.f.).

Habiendo descargado los datos se procede a abrirlos en el programa mediante la pestaña de procesamiento, en descargar datos, se busca el equipo de donde proviene. Una vez teniéndolos, se pone en archivos para después abrirlo como se muestra en la figura 30. Posteriormente se visualiza para exterminar los puntos malos.

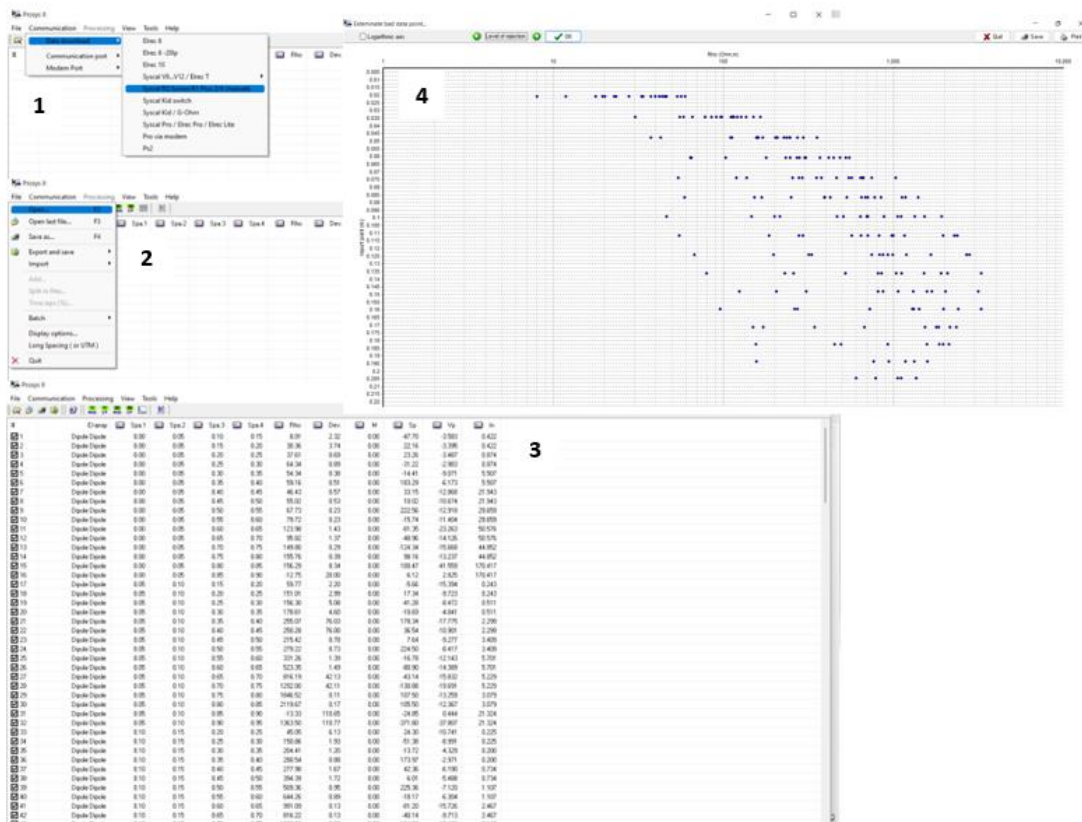


Figura 37: Procesamiento en Software PROSYS II: (1) Descarga de datos; (2) Abrir archivos; (3) Obtención de datos y filtrado y (4) Filtrado final. Imagen del autor.

Una vez teniendo la dispersión de los datos, se procede a realizar filtrados en el cual por medio de la visualización de los puntos vemos la dispersión que existen y se procede a eliminar los datos que presentan mayor dispersión en su respectivo nivel de profundidad. Después de realizar los filtrados necesarios, se procede a guardarlos para posteriormente pasarlos a otro procesamiento.

4.4.3. SOFTWARE RES2DINV

Autores mencionan (Acosta et al., 2011; Martínez-Pagán et al., 2009) que el software RES2DINV (figura 38), lleva a cabo un proceso de inversión que permite relacionar la resistividad eléctrica y las propiedades físicas del subsuelo, obteniendo una distribución en dos dimensiones llamada imagen invertida de resistividad o sección de resistividad.

Asimismo, se señala en estudios previos, (deGroot- Hedlin & Constable, 1990; Loke & Barker, 1996) que el software emplea algoritmos matemáticos basados en mínimos

cuadrados para llevar a cabo un proceso de inversión. En cada iteración de este proceso, se presta atención a un indicador importante: el error cuadrático medio. Kirsch (2006) destaca que durante cada ciclo de inversión (RMS), se realiza un ajuste entre los valores de resistividad aparente y los correspondientes valores de resistividad eléctrica aparente. Estos valores anteriores son fundamentales para la estimación de un modelo sintético.

De acuerdo con los estudios de (Acosta et al., 2011; Leucci, 2019) determinan que los valores de RMS iguales o inferiores al 10% indican secciones eléctricas confiables, aunque valores ligeramente por encima del 10% no deben ser descartables y se deben considerar factores de acuerdo a la complejidad del subsuelo o zonas de alta resistividad. Con base en lo anterior, el rechazo final del perfil y la realización de otro dependerá de si la sección eléctrica final obtenida proporciona una imagen certera y confiable.

Para la utilización del software se necesita realizar los siguientes pasos:

1. En la pestaña de archivo (figura 38), se selecciona leer archivo, se procede a buscarlos y se elige el correcto.

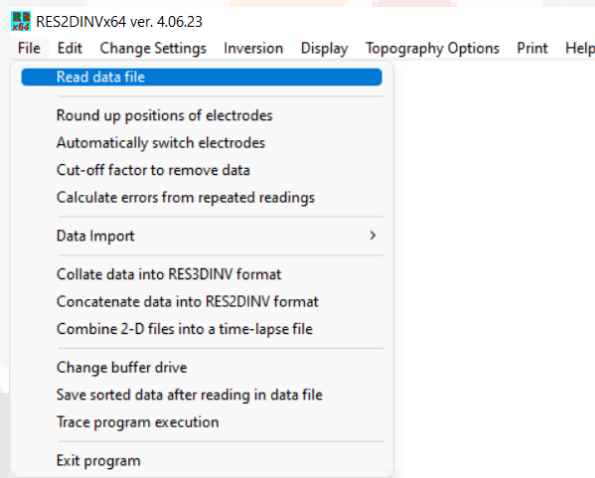


Figura 38: Software RES2DINV: Carga de archivos. Imagen del autor.

2. En la pestaña de inversión, se selecciona modelo de discretización y el uso de modelo refinado. Así mismo se selecciona utilizar el modelo de celdas y más espaciado (figura 39).

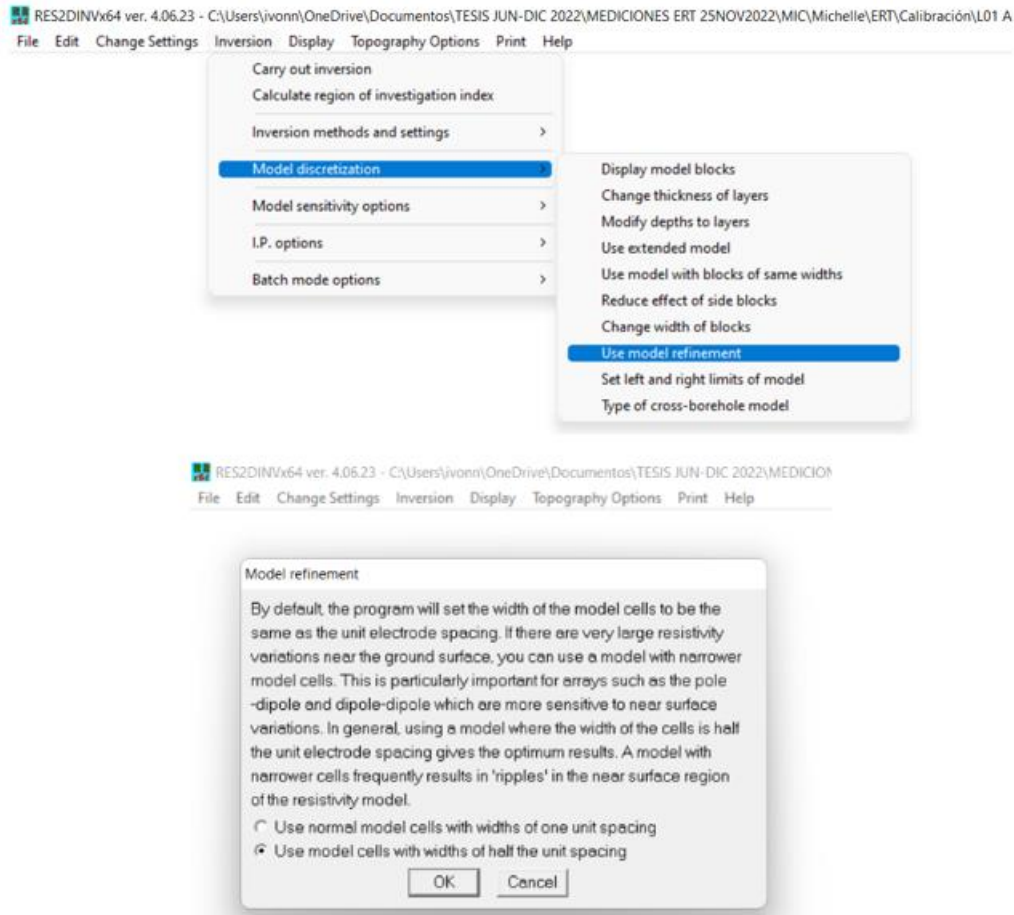


Figura 39: Calibración para obtención de modelo con mayor precisión. Imagen del autor.

3. Como penúltimo paso, se procede a realizar la inversión del modelo lo cual arrojará tres perfiles, el primero muestra las resistividades aparentes medidas, el segundo es un modelo calculado mientras que el último es el perfil resultante producto de un proceso iterativo de semejanza de los dos perfiles de la parte superior el cual arroja el error MRS. En caso de obtener errores por encima del 10%, se lleva a cabo un proceso de corrección o eliminación de datos dispersos en cada uno de los niveles de prospección para intentar disminuir el error y obtener perfiles confiables (figura 40).

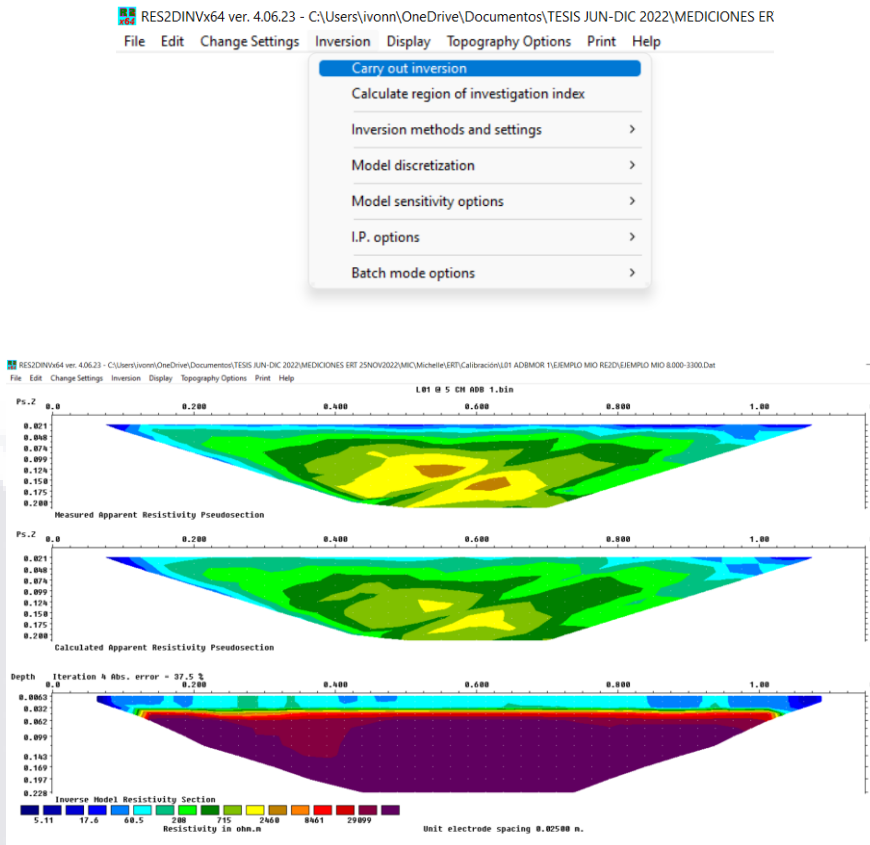


Figura 40: Obtención de modelo 2D, valores de RMSE y resistividades. Imagen del autor.

4. Finalmente se exportan los perfiles en formato .dat para continuar el proceso en Surfer.

4.4.4. SOFTWARE ZONDRES2D

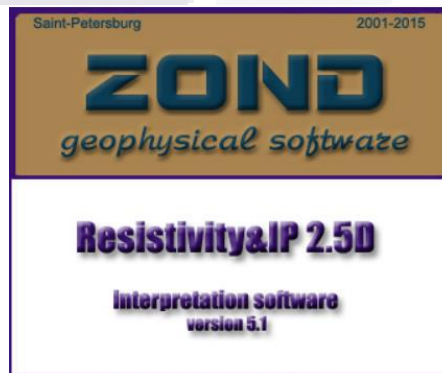


Figura 41: Software ZONDRES2D, segundo filtrado dentro del procesamiento.

Zondres2d (figura 41) es un programa que permite la interpretación bidimensional de datos de tomografía eléctrica. El software emplea el método de resistividad y método de polarización inducida dependiendo el caso de estudio como tierra, pozos cruzados y agua (Zond Software LTD, s.f.).

En este programa se lleva a cabo un proceso similar al Res2DInv, realizando un proceso de inversión para obtener perfiles de resistividad. Se utiliza con el fin de comparar los perfiles y decidir por el más confiable tomando en cuenta el error RMS. A continuación, se describen los pasos realizados en el software:

1. Se abre el archivo, se busca y acepta para posteriormente cambiar los niveles a 16 debido a la configuración en el equipo (figura 42).

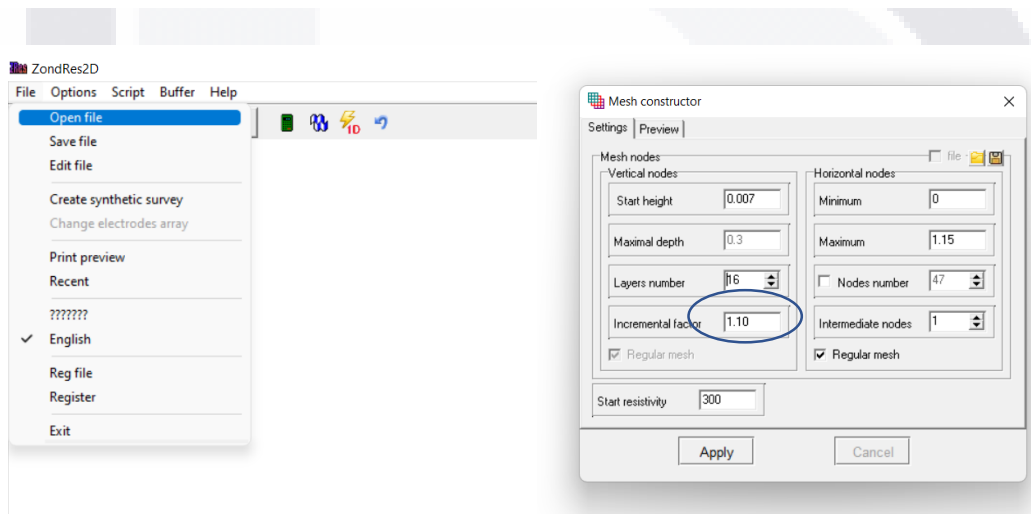


Figura 42: Configuración del software y reconfiguración para edición. Imagen del autor.

2. En un inicio los perfiles se muestran como en la figura 43, después se realiza el proceso de inversión dándole clic en el símbolo señalado en la imagen hasta obtener un modelo con RMS próximo por debajo del 10%.

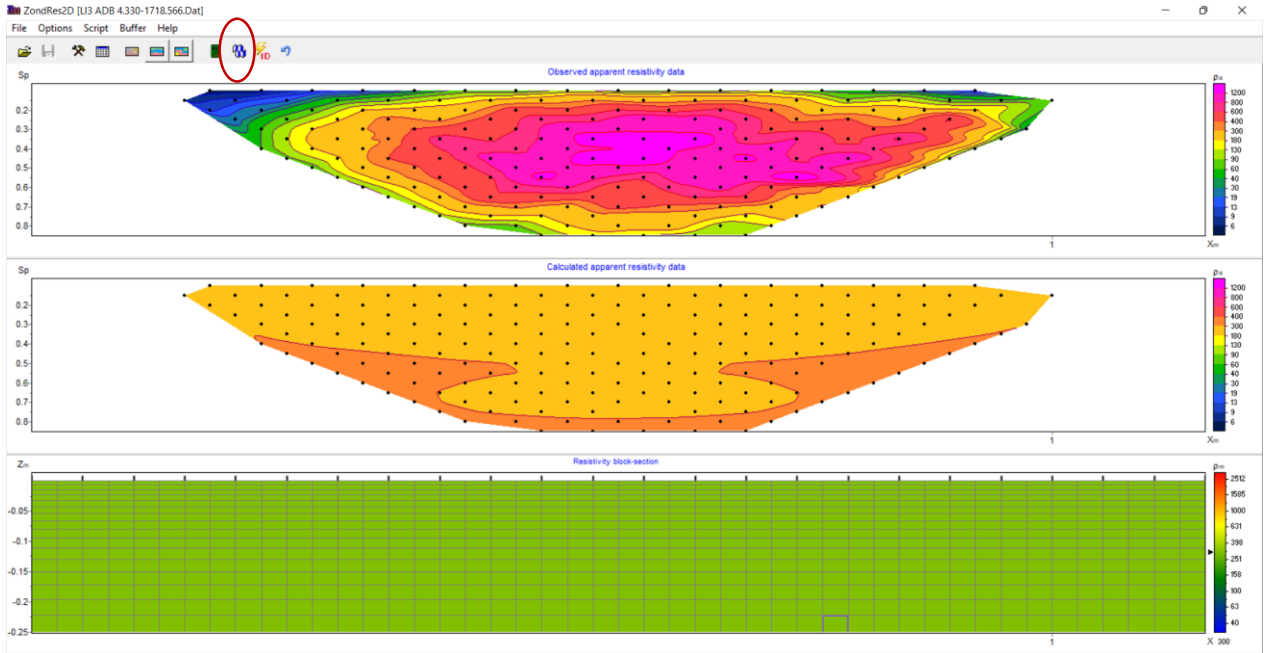


Figura 43: Obtención de inversiones necesarias para la reducción del factor RMSE. Imagen del autor.

3. Teniendo el porcentaje RMS deseado, se procede a generar un modelo de contornos seleccionando la pestaña opciones, modelo y modelo de contornos, el cual posteriormente se exporta a Surfer 16 (figura 44 Y 45).

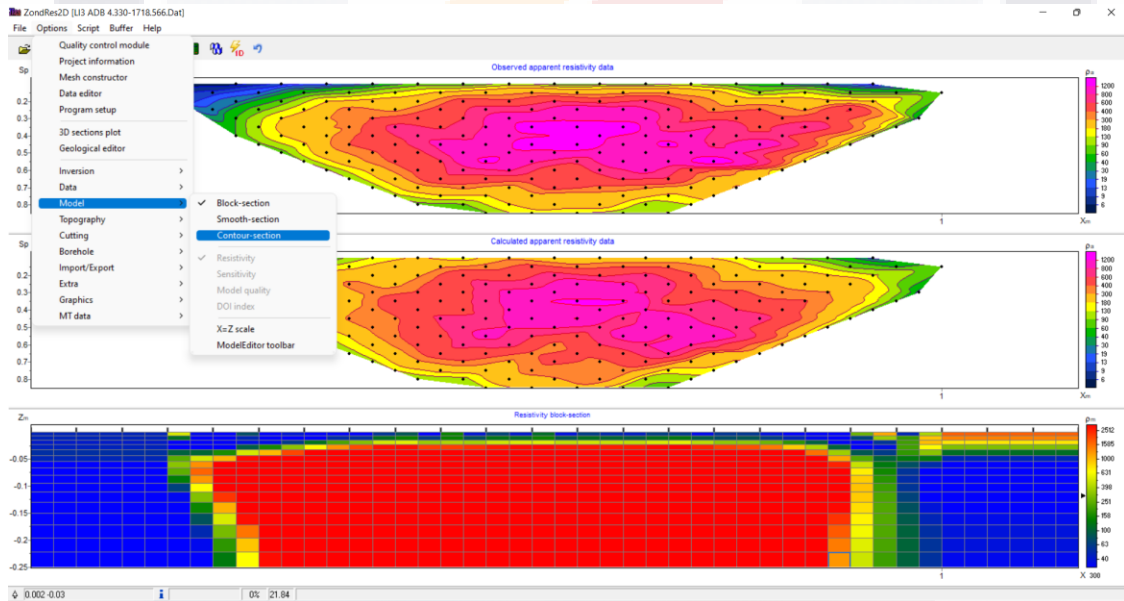


Figura 44: Procedimiento para la creación de contornos de la sección deseada y suavizar el perfil. Imagen del autor.

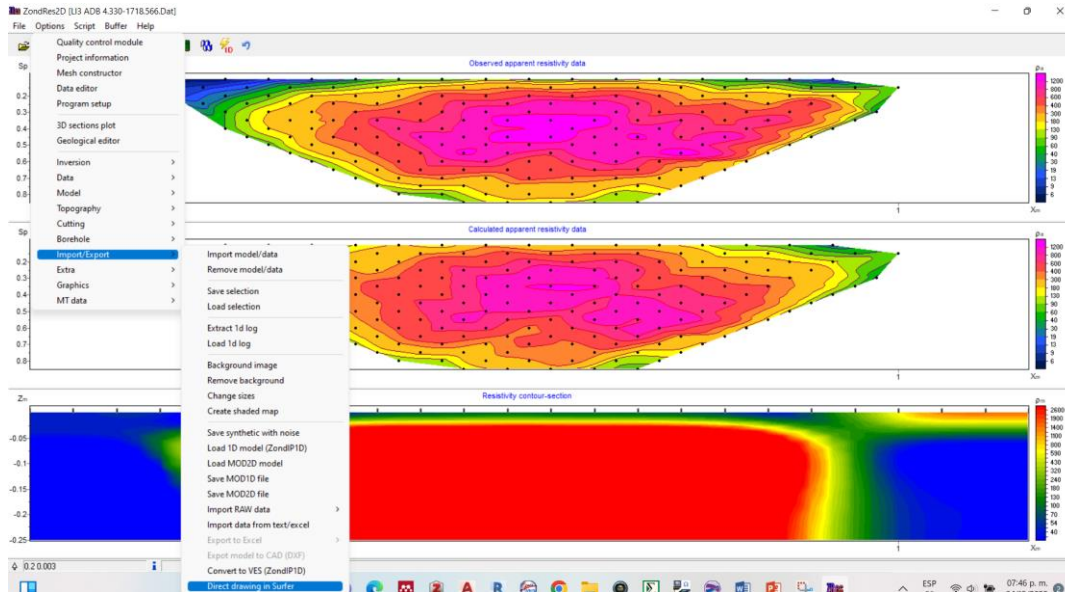


Figura 45: Exportación de modelos en ZondRes2D. Imagen del autor.

4.4.5. SOFTWARE SURFER 16

Se abre y procesa el perfil en Surfer para lograr perfiles más profesionales, con mayor calidad, mediante paletas de colores adecuadas para mostrar un perfil más detallado (figura 46).

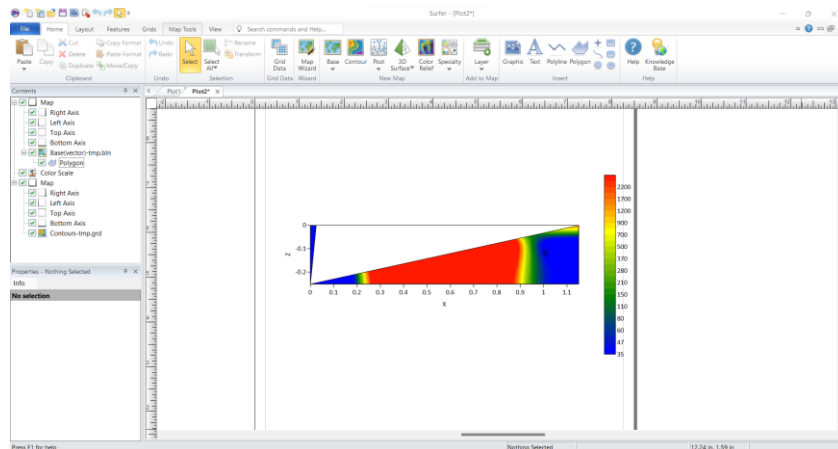


Figura 46: Exportación de modelo a Surfer para mejorar la calidad de edición. Imagen del autor.

4.4.6. VOXLER

Para obtener el modelo 3D en el software Voxler, es necesario extraer datos (x, y, resistividades) en formato .xlsx del modelo preliminar en Surfer 16. Sin embargo, al archivo seleccionado se le añaden datos como la distancia en la que se encuentra el perfil con respecto al eje x o y.

Posteriormente, como se muestra en la figura 47, se importa el archivo en el software para después añadirle pestañas como ejes, malla, contorno, cortes longitudinales y transversales al modelo. A su vez se le añade una imagen en formato .png donde de acuerdo con la escala del modelo brinda información complementaria de la localización de los perfiles. Por otro lado, cada una de las capas presenta propiedades que se deben modificar como: paleta de colores con base en las resistividades, opacidad, rango donde se localizan las anomalías, entre otras. Finalmente se toman imágenes del modelo para su presentación final detallando los aspectos de interés.

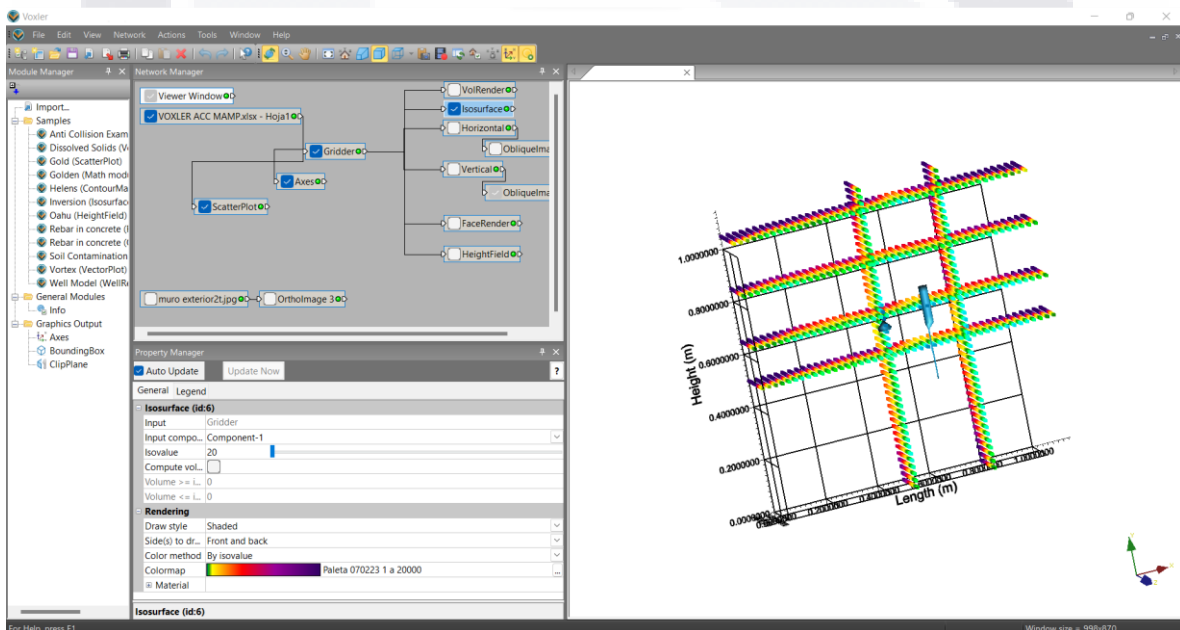


Figura 47: Modelo 3D por medio de datos numéricos en Voxler. Imagen del autor.

CAPÍTULO V
CAMPAÑA EXPERIMENTAL



CAPÍTULO V: CAMPAÑA EXPERIMENTAL

5. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Para dar inicio con la campaña experimental, se definieron los tipos de humedades tomando en cuenta criterios de trabajabilidad y practicidad en la recreación de la humedad y se optó por humedad capilar, filtración y accidental. Así mismo, tomando como base las características de los muros de los edificios históricos de la región, se definieron los materiales a utilizar en la construcción de las probetas, los cuales fueron: adobe (Figura 48) y piedra de mampostería.



Figura 48: Bloque de adobe de dimensiones 0.40x0.20x0.09 m. Imagen del autor.

5.1. DISEÑO DE PROBETA

Para el diseño de las probetas se contemplaron dos muros, uno de adobe y otro de piedra de mampostería, recreando las condiciones para poder estudiar los tres tipos de humedad. Los muros se construyeron dentro de un pequeño sardinel cubierto con plásticos con el objetivo de colocar agua en ese espacio y así propiciar el ascenso de la humedad (figura 49 y 50) capilar. En la parte superior se dejó un hueco en la sección central del muro para realizar la simulación de la humedad por filtración y, por último, pero no menos importante; se colocó un tubo con perforaciones a diferentes alturas en el centro del muro con el fin de filtrar agua a diferentes alturas del muro, por de este sistema se realizó la simulación de humedades accidentales, es decir tuberías en mal estado (figura 51).

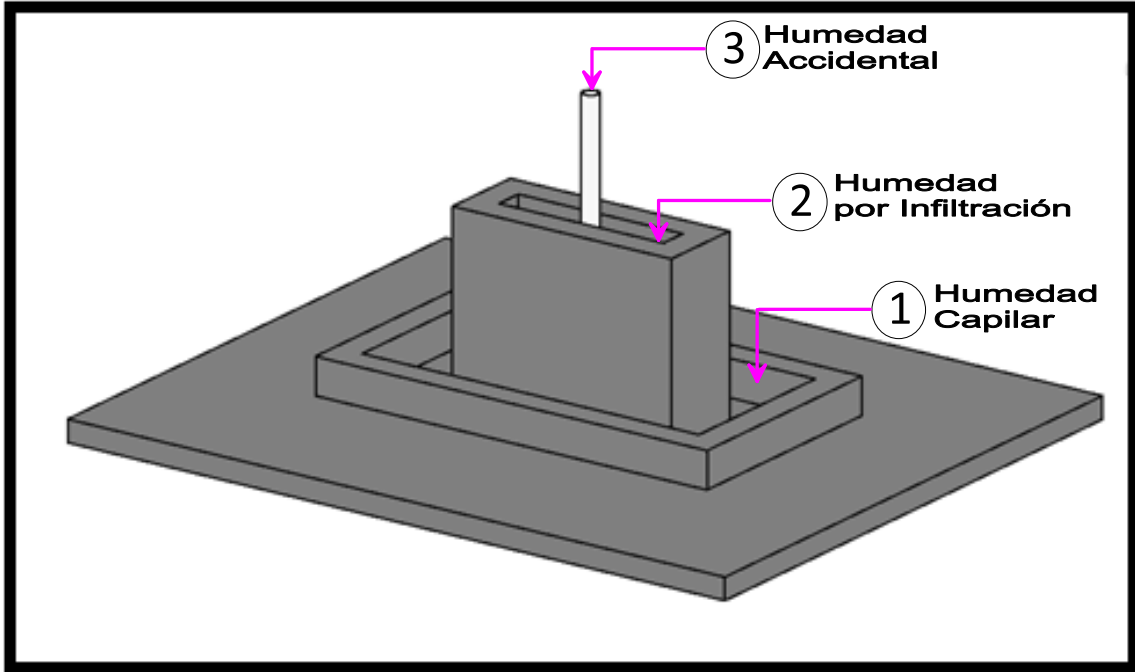


Figura 49: Diseño de probeta para campaña experimental. Imagen del autor.

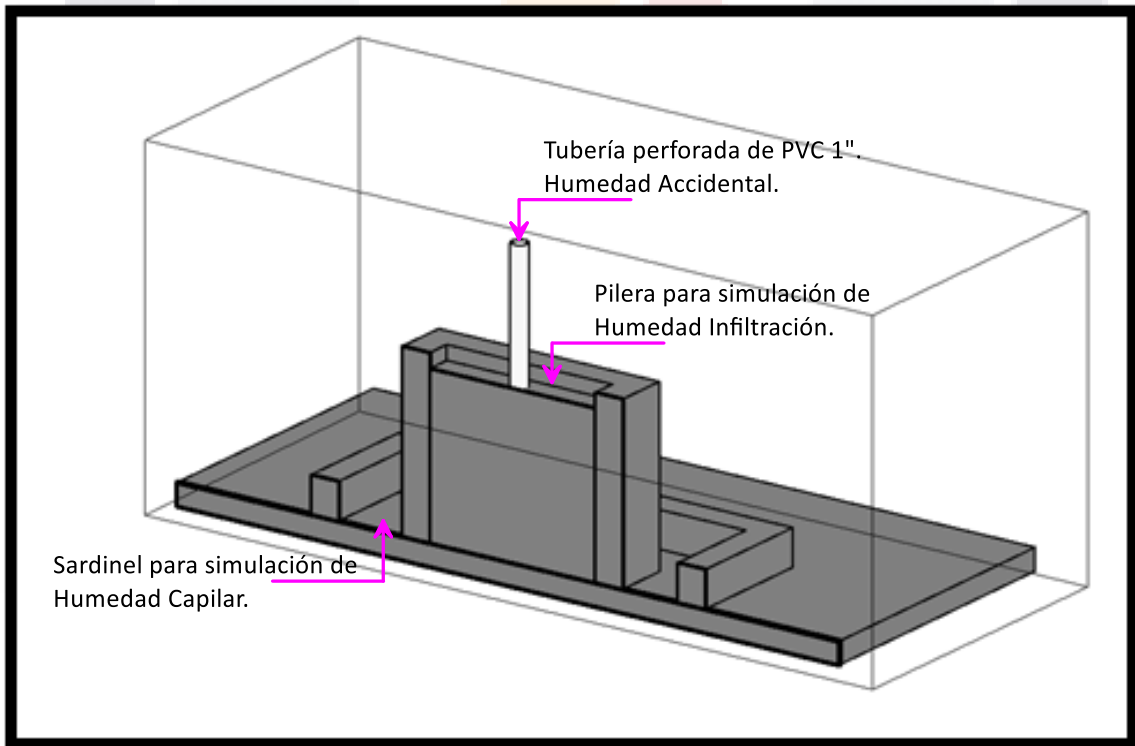


Figura 50: Sección del diseño de probeta. Imagen del autor.



Figura 51: Tubería de PVC de 1", perforado para la simulación de humedad accidental donde se colocará al centro del muro. Imagen del autor.

Definido el diseño tendría la probeta, se procede a determinar el largo, ancho y alto. Estas dimensiones se decidieron de acuerdo con las necesidades de las técnicas aplicadas, tomando en cuenta principalmente la técnica ERT, ya que las dimensiones mínimas requeridas para las mediciones son de 1.15 m de largo debido a la implementación de 24 electrodos cuadrados de 0.05x0.05 m colocados en línea. Por consiguiente, se determinó que la medida mínima para realizar las probetas era de 1.20x1.20 m. Por otro lado, teniendo en cuenta las medidas del adobe de 0.40x0.20x0.09 m, se proponen las 1.24x1.30x0.20 m. las dimensiones anteriores corresponden al muro sin recubrimiento. Debido al desplome del muro el recubrimiento ocupó 0.03 m de cada lado, por lo que el muro cuenta con dimensiones de 1.30x1.30x0.20 m. El muro de mampostería de piedra tiene dimensiones de 1.30x1.30x0.40 m ya con su acabado final (recubrimiento). El ancho del muro se debe a que la piedra no sería tan fácil el labrarla y poder carearla debido a sus dimensiones.

Siguiendo con las especificaciones que debería de llevar o contener dichas probetas, se tomó la decisión de colocar un recubrimiento de mortero cemento-arena en una de las caras en ambos muros ya que se esperaban variaciones en los resultados de muros recubiertos (figura 63).

5.1.1. PROPORCIONAMIENTO

Para realizar el proporcionamiento tanto de las juntas como del recubrimiento se determinó que los materiales a utilizar serian: tierra de adobe, cal, mucílago, arena. Tomando en cuenta la literatura se determinó lo siguiente, ver Tabla 4 y Tabla 5.

Tabla 4 *Proporcionamiento para muestra de adobe en junta y recubrimiento. Tabla del autor.*

ADOBE	
Proporcionamiento 1:3	
Junta	Recubrimiento
Tierra de adobe	Cal
Agua	Tierra de adobe
	Mucílago

Tabla 5 *Proporcionamiento para muestra de mampostería de piedra en junta y recubrimiento. Tabla del autor.*

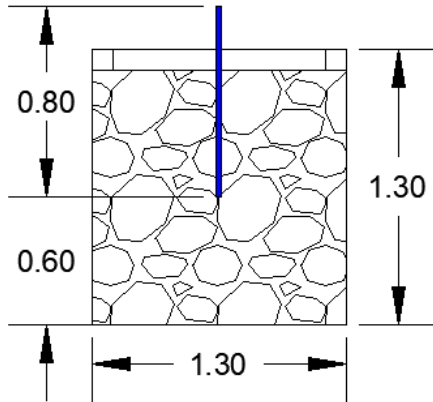
MAMPOSTERIA DE PIEDRA	
Proporcionamiento 1:2	Proporcionamiento 1:3
Junta	Recubrimiento
Cal	Cal
Arena	Arena
Agua	Mucilago

5.1.2. PRUEBA PILOTO

Se dio inicio con la construcción de las probetas en un lugar designado en el laboratorio, en el edificio 34 en su interior, ubicado dentro de las instalaciones de la Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Siguiendo el diseño de la prueba como se muestra en la imagen siguiente (figura 52), secciones de los muros en el cual muestra la altura requerida al igual que las localizaciones de las tuberías.

Ⓐ MURO DE MAMPOSTERIA



Ⓑ MURO DE ADOBE

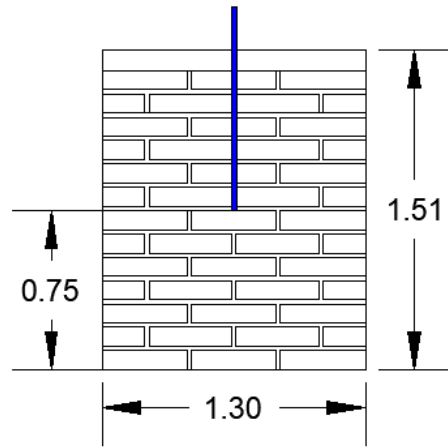


Figura 52: Alzado y secciones de las probetas de adobe y mampostería de piedra (dimensiones en metros). Plano del autor.

Las pruebas dieron inicio con el muro de Adobe que cuenta con 13 hiladas, dejando así una junta de 2 cm entre tabique y tabique. Mientras que en la construcción del muro de mampostería se iba acomodando la piedra conforme se tenía y respetando las especificaciones del proporcionamiento del mortero (figura 53).



Figura 53: Construcción de muros: (Izq) Muro de Adobe, (Der) Muro de mampostería de piedra. Imagen del Autor.

Una vez terminado el muro de abobe, se procedió a ranurar para alojar el tubo de PVC de 1.0", realizando trabajos de corte y demolición de adobe (figura 54).



Figura 54: Corte con disco en muro de adobe para la colocación de tubería de PVC. Imagen del autor.

5.1.3. EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO

Para elaborar el mortero del recubrimiento, se realizó la extracción de baba de nopal o mucílago. A continuación se describe las recomendaciones de Rios López (2016), las cuales se tomaron en cuenta para el proceso:

1. Búsqueda de Penca de Nopal: se necesita una penca de nopal con una edad aproximada de 3 años, es decir, con un grosor de penca mayor a 3 cm para obtener mayor concentrado. La penca fue recolectada de un rancho que se sitúa en el municipio de Pabellon de Arteaga, Aguascalientes (figura 55).



Figura 55: Área de cultivo de nopal ubicado en el municipio de Pabellón de Arteaga, Ags. Imagen del autor.

Con cada lote de pencas se llevan a cabo mediciones para calcular la cantidad de pulpa que se extraerá. Se obtiene que del primer lote de pencas recabadas tenían una longitud de 0.60 m y 0.05 m de grosor, mientras que en el segundo lote de pencas tuvo aproximadamente 0.40 m de longitud y 0.05 m de grosor por lo que se cumplía a la perfección (figura 56 y 57).



Figura 56: Registro de pencas de nopal para su clasificación de acuerdo con la edad. Imagen del autor.

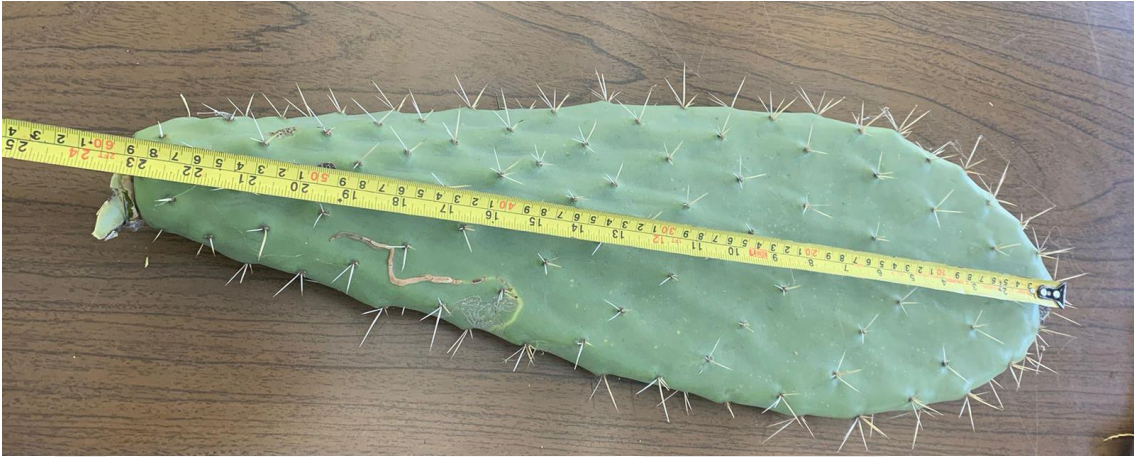


Figura 57: Medición de pencas para su clasificación. Imagen del autor.

2. Corte de penca: En el primer lote se dificultó la manipulación del nopal ya que tenía espinas, de manera que se optó por cortarlas en pedazos para mayor comodidad y así poder retirarles la cascara y dejar únicamente la pulpa como se muestra en las siguientes imágenes (figura 58).



Figura 58: Proceso de corte y extracción de pulpa. Imagen del autor.

3. Corte en pedazos proporcionales a 1cm: una vez que se tenía la pulpa del nopal se procedía a picarla, obteniendo un mejor aprovechamiento y rendimiento (figura 59).



Figura 59: Corte y pesaje de tara para el proporcionamiento adecuado. Imagen del autor.

4. Proporcionamiento para la extracción:

Rios López (2016) afirma que: “La relación de agua que se emplea para maximizar la concentración de mucilago de nopal es 100:150 lo que indica que por cada 100 gr de parénquima se requiere 150 ml de agua destilada o purificada.”

Entonces siguiendo la metodología, cada vez que se iba cortando se pesaba en una tara de plástico en donde se concentraba 1.5 kg de penca y esta a su vez se iba depositando en un contenedor para al final añadirle el 1.5 lts de agua.

5. Reposo de penca de nopal para la extracción de mucílago:

Asi mismo, Rios López (2016) menciona que: “Para permitir que el parénquima suelte todo el mucílago de nopal es necesario almacenarlo durante un tiempo aproximado de 24 horas desde la extracción”.

Dicho esto, por cuestiones de tiempos el primer lote de penca se dejó reposar 3 días, mientras que el segundo se dejó 2 días.

5.1.4. RECUBRIMIENTO

Teniendo fermentado la penca de nopal, se procede a realizar los morteros para los recubrimiento (figura 60) en donde se tiene que:

Tabla 6 *Proporcionamiento para recubrimiento de probetas. Tabla del autor.*

ADOBE	PIEDRA MAMPOSTERIA
Proporcionamiento 1:3	Proporcionamiento 1:3
Cal	Cal
Tierra de adobe	Arena
Mucílago	mucílago



Figura 60: Mezcla para recubrimiento con proporcionamiento adecuado. Imagen del autor.

Debido a que las consistencias de las mezclas son poco adherentes ya que el adobe continen demasiada humedad y en la piedra no absorbe, estas se tiene que dar en 2 capas uniformes dado que si el recubrimiento es de 2 cm de espesor, se trabajará en partes debido a las propiedades antes mencionadas, y por otro lado, tenemos que al incluir cal en los morteros, lo que tiende a agrietarse, es por eso que se deja un tiempo de fraguado entre una capa y otra (figura 61).



Figura 61: Repellado en muros. Imagen del autor.

Así mismo, el adobe se tuvo que humedecer con mucílago para que tuviera adherencia con la mezcla y no se desprendiera (figura 62).



Figura 62: Mojado de ladrillos de adobe con mucílago para su correcta colocación y adherencia. Imagen del autor.

Al segundo día, se continuó con la segunda capa de recubrimiento para así completar los 2 cm de recubrimiento establecido y dejar un acabado prolijo y detallado.

5.1.5. SECADO DE MUROS

Habiendo terminado los muros, se realizó una pequeña limpieza de la zona para no dañar el hule en el suelo y poder conservar mejor el muro. El tiempo de secado constó de un mes y medio, permitiendo liberar la humedad que tenía.

5.1.6. PRUEBA PILOTO EN MUROS SECOS

Trascurrido el mes y medio de secado se procedió a marcar el muro con una retícula de líneas a cada 0.05 m, lo cual era necesario para poder aplicar las técnicas ERT y el Higrómetro. Con ayuda de plomos, niveles de burbuja y un tiralíneas, se logró reticular los muros por ambos lados (figura 63 y 64).



Figura 63: Retícula de 0.05 m en muro de adobe por ambas caras. Imagen del autor.

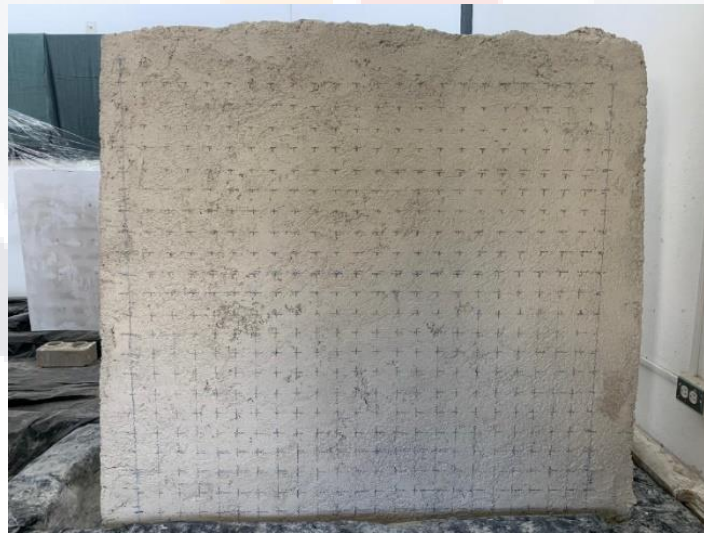


Figura 64: Retícula de 0.05 m en muro de piedra únicamente por la cara de recubrimiento. Imagen del autor.

Teniendo los puntos necesarios de la retícula, se procede a realizar pruebas piloto en los muros secos, las cuales servirán de calibración y de base para comparar los posteriores resultados con los muros sometidos a condiciones de humedad.



CAPÍTULO VI
RESULTADOS

CAPÍTULO VI: RESULTADOS

6. RESULTADOS

A continuación, se describen los resultados de los métodos no destructivos que se implementaron, iniciando con las pruebas de calibración, seguido de los diferentes tipos de humedades como humedad por capilaridad, accidental y finalmente la humedad por filtración.

6.1. PRUEBAS EN SECO (CALIBRACIÓN)

6.1.1. TERMOGRAFÍA INFRARROJA

En las figuras 65, 66 Y 67 se muestran las mediciones tomadas correspondientes a un tiempo de secado de mes y medio.

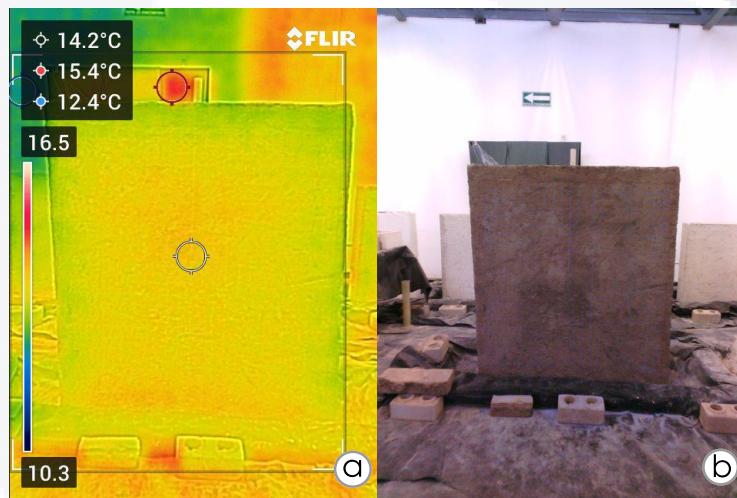


Figura 65: Imágenes de termografía infrarroja. Prueba de Calibración en muro de adobe con recubrimiento. Procesamiento en Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 65a resalta datos de temperatura del área de 14.2 °C, así como un punto más frío de 12.4 °C.

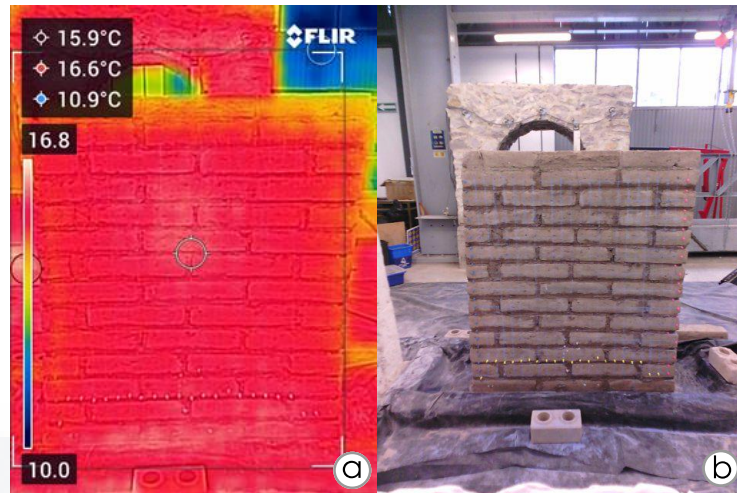


Figura 66: Imágenes de termografía infrarroja. Prueba de calibración en muro de adobe sin recubrimiento. Procesamiento en Flir tolos. Imagen del autor.

La figura 66a resalta datos de temperatura del área de 15.9 °C, así como un punto más frío de 10.9 °C.

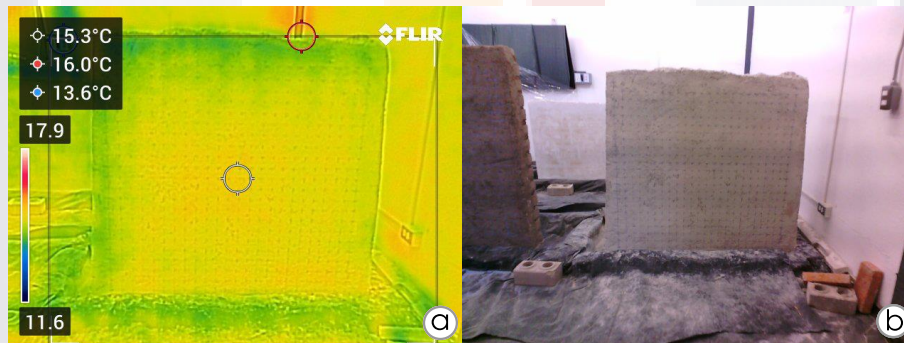


Figura 67: Imágenes de termografía infrarroja. Prueba de calibración en muro de mampostería de piedra. procesamiento en Flir tolos. Imagen del autor.

La figura 67a resalta datos de temperatura del área de 15.3 °C, así como un punto más frío de 13.6 °C.

6.1.2. HIGRÓMETRO

Tabla 7 Datos de higrómetro. Pruebas de calibración en muro de adobe con recubrimiento. Tabla del autor.

1º medición	
Adobe c/Recubrimiento	
	0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 1.1 1.2 1.3
1.2	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1.1	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1.0	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0.9	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0.8	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0.7	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0.6	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0.5	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0.4	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0.3	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0.2	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0.1	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

Nota: Esta tabla muestra los porcentajes de humedad superficial en el muro de adobe con recubrimiento, tomando así los datos, un mes y medio después del secado del muro.

Tabla 8 Datos de Higrómetro. Pruebas de calibración en muro de adobe sin recubrimiento. Tabla del autor.

1º medición	
Adobe s/Recubrimiento	
	0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 1.1 1.2 1.3
1.2	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
1.1	2 2 2 2 2 2 3 3 2 2 2 3 3 2
1.0	2 2 3 3 2 2 3 2 3 2 3 3 3 2
0.9	2 2 2 3 3 3 3 2 3 3 3 3 3 3
0.8	3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
0.7	2 2 3 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
0.6	2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
0.5	2 2 3 3 3 2 3 3 3 3 3 3 3 3
0.4	3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2
0.3	3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
0.2	3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
0.1	3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
0	3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3

Nota: Esta tabla muestra los porcentajes de humedad superficial en el muro de adobe sin recubrimiento, tomando así los datos, un mes y medio después del secado del muro.

Tabla 9 Datos de Higrómetro. Pruebas de calibración en muro de mampostería de piedra.

1º medición	
Mampostería c/Recubrimiento	
	0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 1.1 1.2 1.3
1.2	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1.1	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1.0	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0.9	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0.8	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0.7	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0.6	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0.5	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0.4	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0.3	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0.2	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0.1	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
0	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

Nota: Esta tabla muestra los porcentajes de humedad superficial en el muro de mampostería de piedra, tomando así los datos, un mes y medio después del secado del muro.

Los resultados de humedad superficial del muro de adobe con recubrimiento (Tabla 7) y los resultados del muro de mampostería de piedra (Tabla 9), arrojan porcentajes de 1% lo cual indica una superficie seca, ya que es el valor mínimo que se puede obtener.

Mientras que en la Tabla 8, los resultados del muro de adobe sin recubrimiento, nos muestra variaciones de 2% a 3% en la superficie, indicando, una variación debido al material y a la junta del mismo muro. Es por eso que en la figura 68, se muestra un mapa de contornos con las humedades de los resultados anteriores el cual casi en su totalidad predomina húmedo a excepción de la parte superior que está seca.

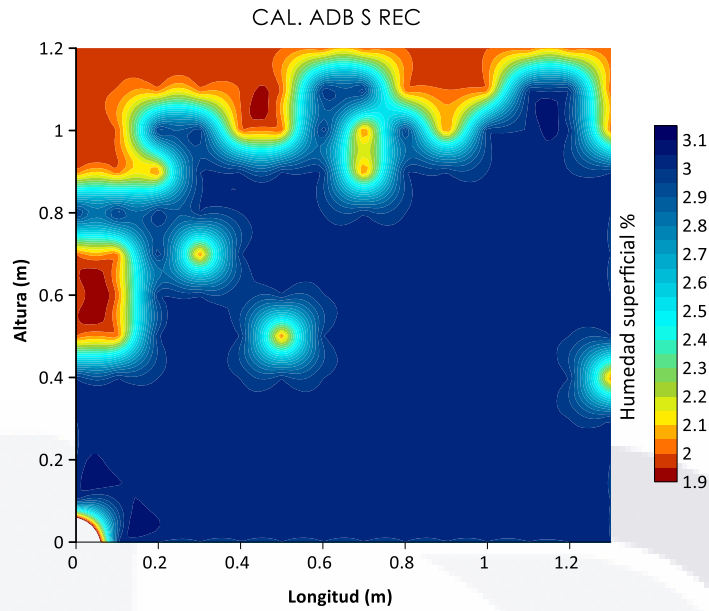


Figura 68: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Etapa de calibración en muro de adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

6.1.3. TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

6.1.3.1. CALIBRACIÓN EN MURO DE ADOBE

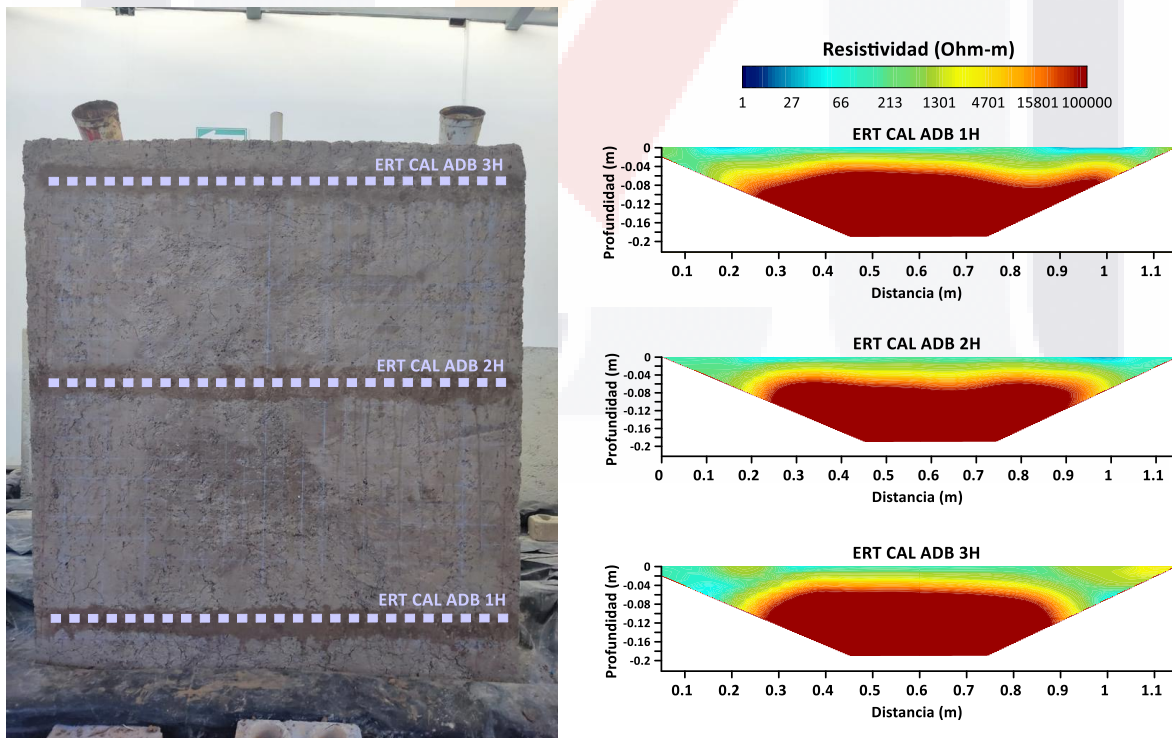


Figura 69: Prueba de calibración de ERT en muro de adobe. Perfiles 2D. Procesamiento en ProsysII, Zondres2D, Surfer 16. Elaboración propia.

Mediante la Tomografía de Resistividad Eléctrica se obtienen valores de resistividad del medio (adobe), mismos que serán relacionados con características como porosidad, permeabilidad, etc. Es por eso que, para determinar sus propiedades interiores, se realiza en la etapa de calibración (periodo después de mes y medio de secado) tres líneas en el cual, ERT CAL AD 1H, ERT CAL ADB 2H y ERT CAL ADB 3H se encuentra 0.30, 0.65 y 0.50 m respectivamente con respecto a la anterior. En la figura 69, se observan que las resistividades del Adobe van de 40,000-100,000 Ohm-m (Tonos naranja-guinda).

Los valores de resistividad de 1-100 Ohm-m (tonos azul marino-cian) presentados en los primeros 4 cm del perfil corresponden de acuerdo a la metodología en la cual, se humedece donde se ubica la línea de electrodos para posteriormente poner una capa uniforme de bentonita (aprox. 2mm) esto para disminuir las resistencias de contacto (RC).

6.1.3.2. CALIBRACIÓN EN MURO DE MAMPOSTERÍA DE PIEDRA

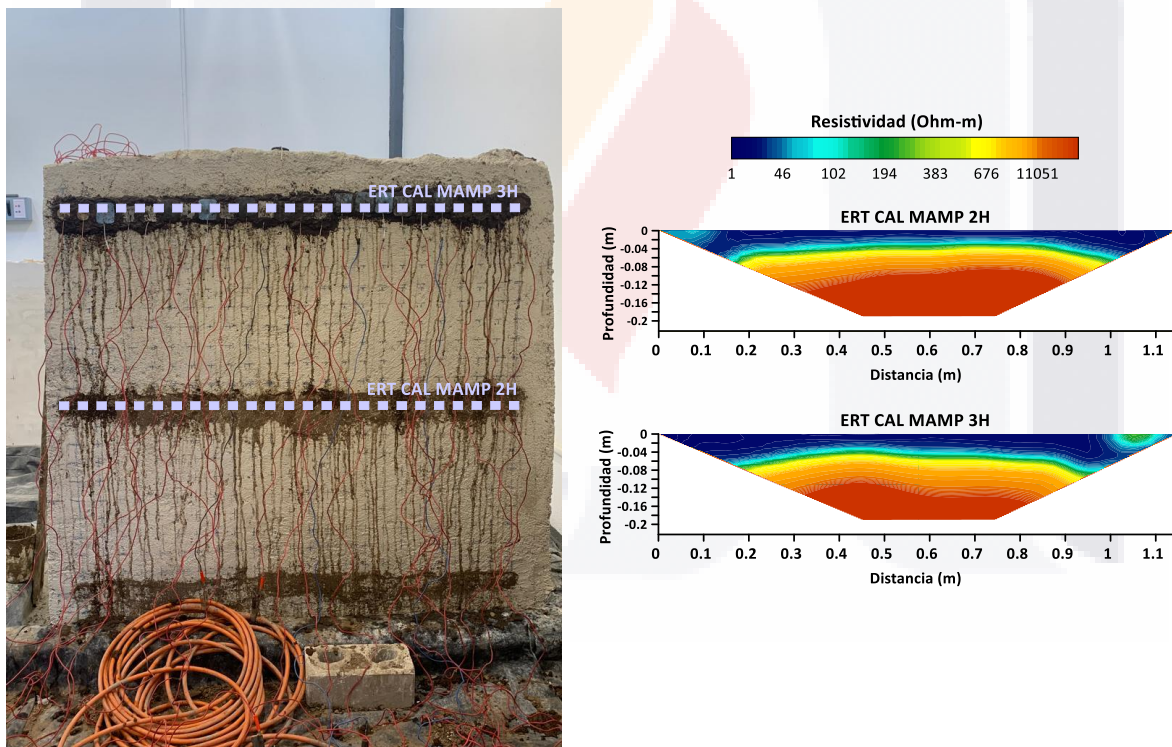


Figura 70: Prueba de calibración de ERT en muro de mampostería de piedra. Procesamiento en ProsysII, Zondres2D, Surfer 16. Elaboración propia.

Continuando con las pruebas de calibración, en la mampostería de piedra se realizan 2 mediciones en la cual, ERT CAL MAMP 2H y ERT CAL MAMP 3H se encuentra a 0.55cm y 0.50cm respectivamente y el último respecto al anterior. En la figura 70, se observan que las resistividades de la mampostería van de 5,000-100,000 Ohm-m (Tonos naranja-guinda).

Los valores de resistividad de 1-115 Ohm-m (tonos azul marino-cian) presentados en los primeros 4 cm del perfil corresponden de acuerdo a la metodología en la cual, se humedece donde se ubica la línea de electrodos para posteriormente poner una capa uniforme de bentonita (aprox. 2mm) esto para disminuir las resistencias de contacto (RC).

6.2. HUMEDAD POR CAPILARIDAD

6.2.1. MURO DE ADOBE CON RECUBRIMIENTO

6.2.1.1. TERMOGRAFIA INFRARROJA

Las figuras 71-77 muestran imágenes térmicas del comportamiento de humedad por capilaridad durante un mes (17 de enero-07 de febrero), en donde se registraron variaciones en el ascenso y propagación.

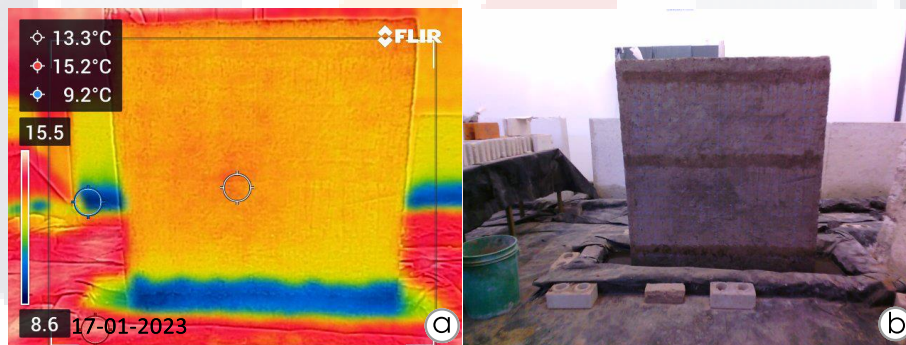


Figura 71: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 71a resalta presencia de frente húmedo y temperaturas de 9.2°C a 13.3°C.

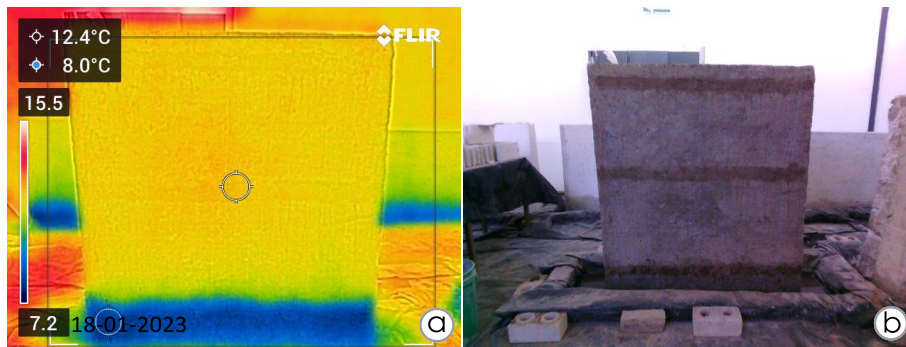


Figura 72: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 72a, resalta una temperatura más fría de 8.0°C mientras que en el área restante del muro muestra una temperatura superficial de 12.4°C.

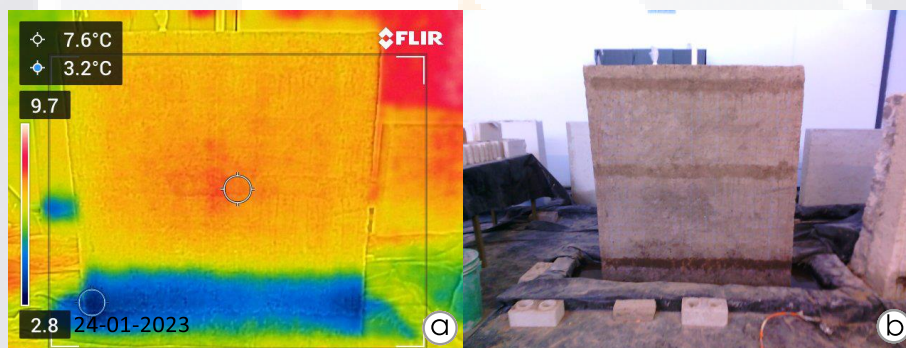


Figura 73: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 73a, muestra la temperatura mínima superficial de 3.2°C, mientras que en el resto del muro de 7.6°C.

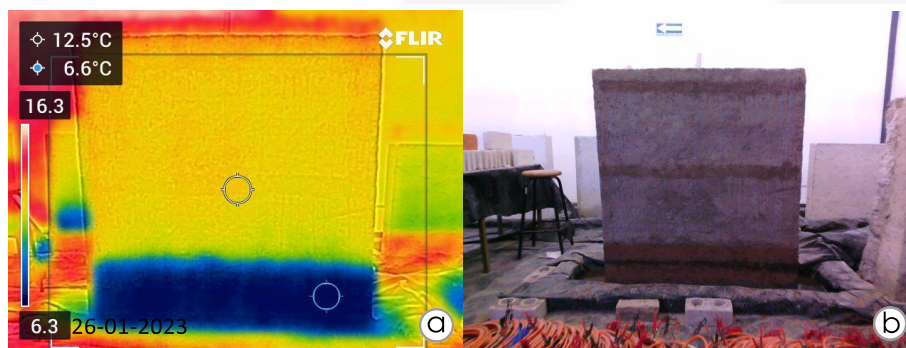


Figura 74: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 74a, muestra avance en la humedad superficial resaltando temperaturas de 6.6°C a 12.5°C.

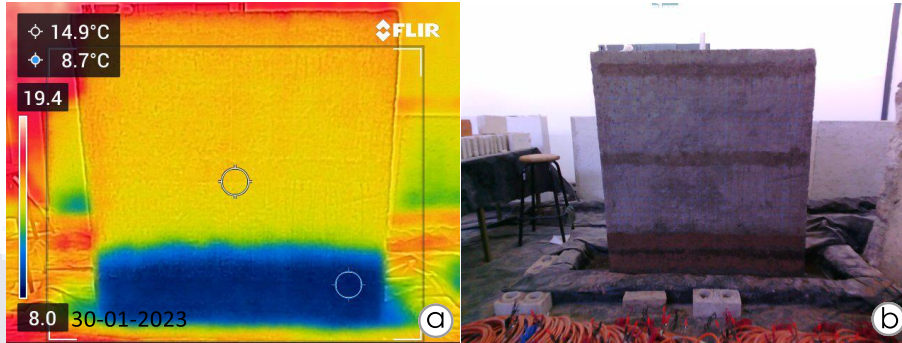


Figura 75: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 75a presenta temperaturas superficiales en el muro 8.7°C a 14.9°C.

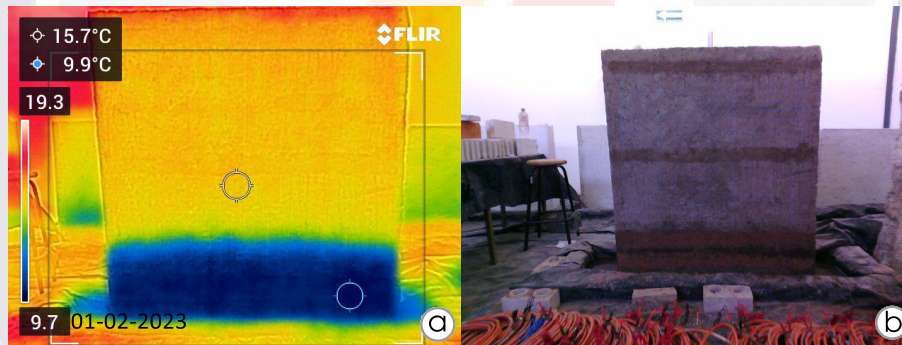


Figura 76: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 76a resalta temperaturas correspondientes de 9.9°C en la zona de humedad y 15.7°C en el resto del muro.

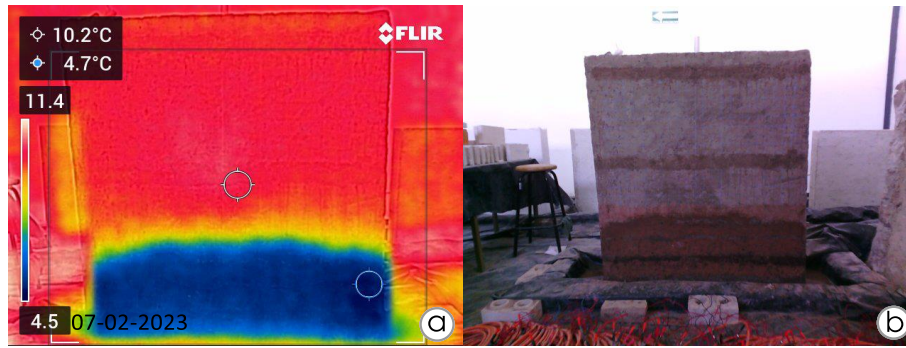


Figura 77: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 77a muestra mayor efecto de propagación obteniendo temperaturas de 4.7°C a 10.2°C.

6.2.1.2. HIGRÓMETRO

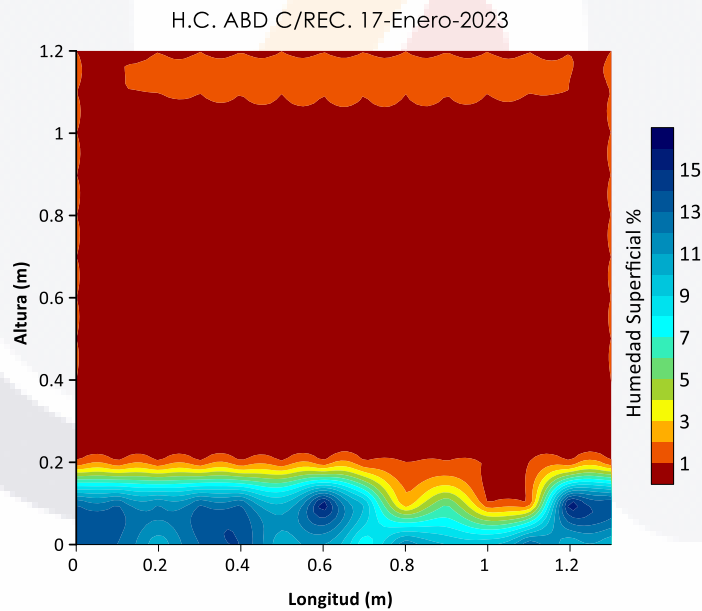


Figura 78: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

De acuerdo con la figura 78, del día 17 de enero del 2023, las humedades en el muro de adobe con recubrimiento debido al ascenso de la humedad por capilaridad, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 14%, localizándose la mayor concentración en la parte inferior central y del lado derecho del muro a una altura de 0.10 m.

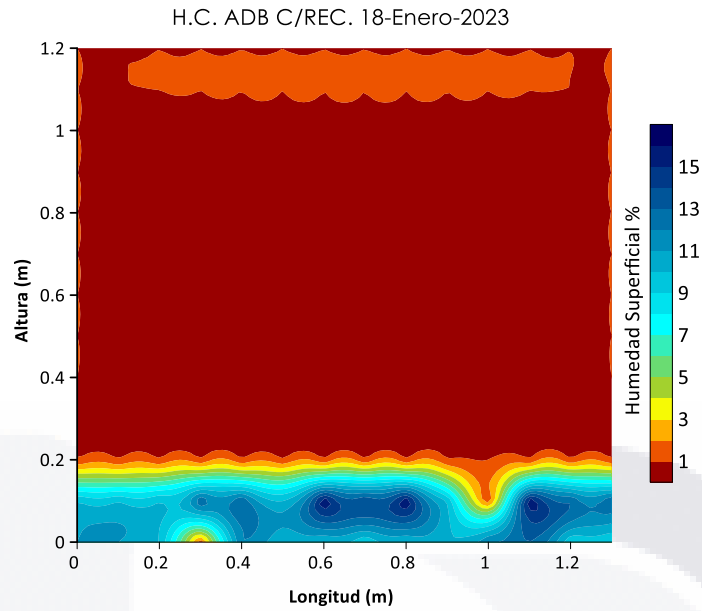


Figura 79: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

De acuerdo con la figura 79, del día 18 de enero del 2023, las humedades en el muro de adobe con recubrimiento debido al ascenso de la humedad por capilaridad, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 16%, localizándose la mayor concentración en la parte inferior central y del lado derecho del muro a una altura de 0.10 m.

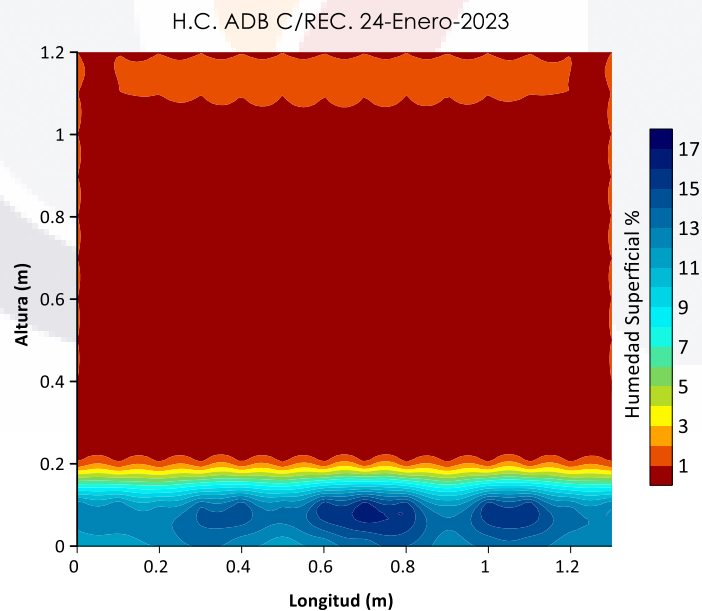


Figura 80: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

De acuerdo con la figura 80, del día 24 de enero del 2023, las humedades en el muro de adobe con recubrimiento debido al ascenso de la humedad por capilaridad, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 17%, localizándose la mayor concentración en la parte inferior central y del lado derecho del muro a una altura de 0.10 m.

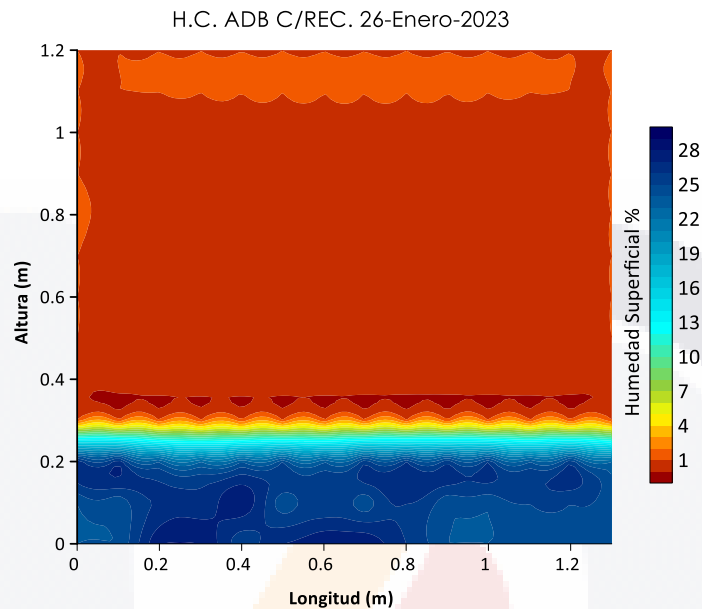


Figura 81: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

De acuerdo con la figura 81, del día 26 de enero del 2023, las humedades en el muro de adobe con recubrimiento debido al ascenso de la humedad por capilaridad, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 28%, con un frente húmedo de hasta 0.25m.

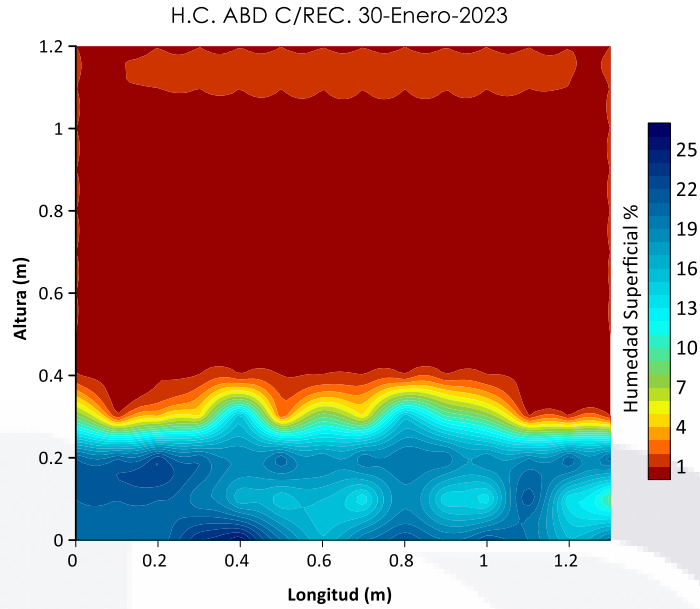


Figura 82: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

De acuerdo con la figura 82, del día 30 de enero del 2023, las humedades en el muro de adobe con recubrimiento debido al ascenso de la humedad por capilaridad, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 24% con un frente húmedo de hasta 0.35 m en la parte central.

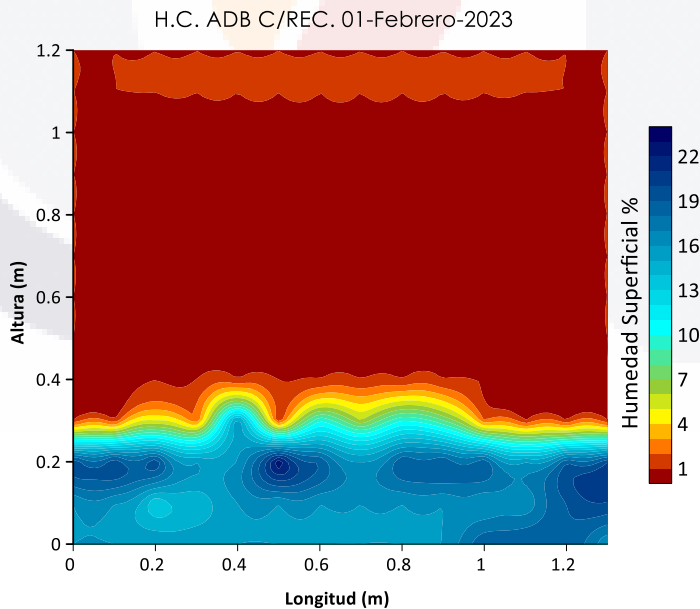


Figura 83: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

De acuerdo con la figura 83, del día 01 de febrero del 2023, las humedades en el muro de adobe con recubrimiento debido al ascenso de la humedad por capilaridad, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 20%, con un frente húmedo de hasta 0.35m en la parte central.

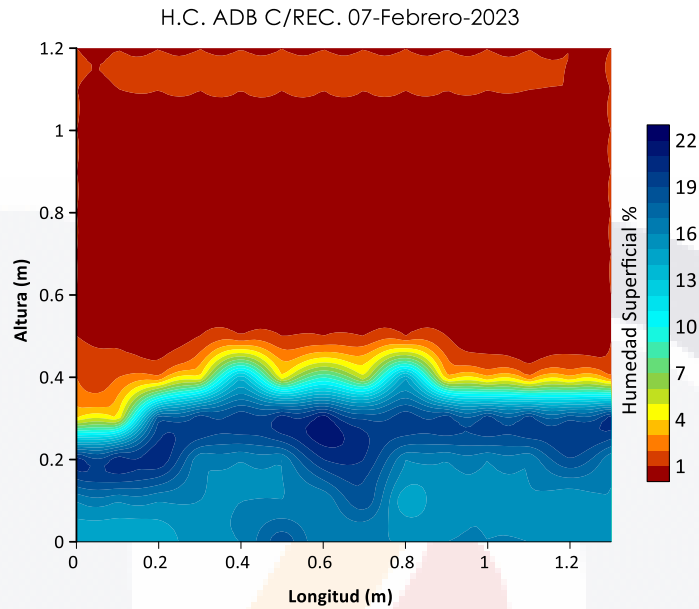


Figura 84: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

De acuerdo con la figura 84, del día 71 de febrero del 2023, las humedades en el muro de adobe con recubrimiento representados por el debido al ascenso de la humedad por capilaridad, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 20%, con un frente húmedo de hasta 0.50 m.

6.2.1.3. TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

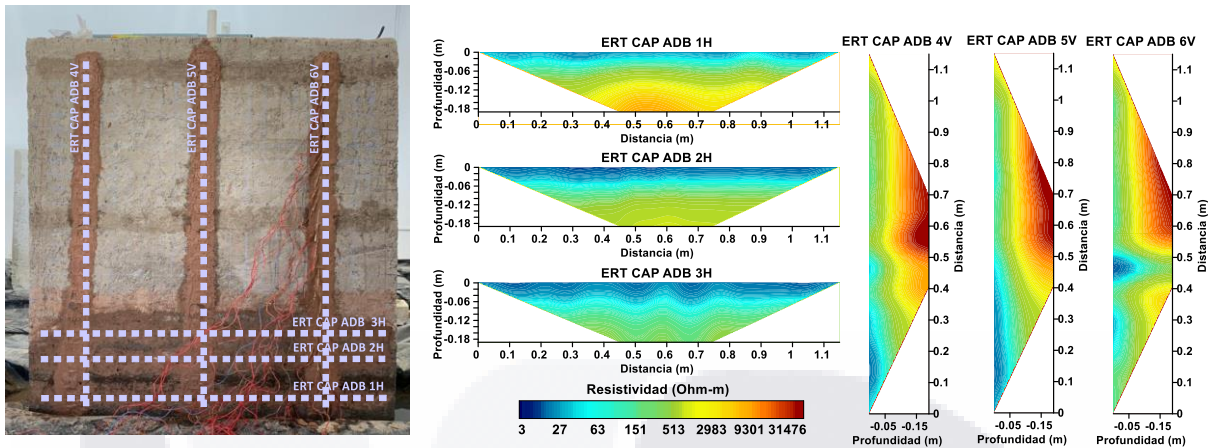


Figura 85: Humedad por capilaridad. Prueba de ERT en muro de adobe con recubrimiento. Procesamiento en ProsysII, Zondres2D, Surfer 16. Elaboración propia.

De acuerdo con las mediciones dadas por la humedad por capilaridad en el muro de adobe, se realizan 3 mediciones horizontales (figura 85 identificadas como ERT CAP ADB 1H, ERT CAP ADB 2H y ERT CAP ADB 3H se encuentran con respecto al nivel de piso a 0.25, 0.6 y 1.05 m respectivamente. Además, se realizan mediciones verticales (figura 85) identificadas como ERT CAP ADB 4V, ERT CAP ADB 5V Y ERT CAP ADB 6V que se encuentran con respecto al extremo izquierdo del muro a 0.15, 0.70 y 1.10 m respectivamente. En la figura 85, se observan diferentes anomalías de resistividades que corresponden de acuerdo al contenido de humedad presentado en el muro debido al fenómeno capilar. Las resistividades dadas de 1-100 Ohm-m (azul marino-cian) son valores que podrían corresponder a un material saturado mientras que de 100-20,000 Ohm-m (cian a amarillo-naranja) son valores del material parcialmente saturado.

En los perfiles verticales se aprecian una anomalía de baja resistividad (1-100 Ohm-m) por debajo de 0.50 m de altura. En la parte inferior de los perfiles, se observa que esta anomalía profundiza en la sección del muro, mientras que el perfil se eleva, ésta tiende a salir a la superficie dejando valores de mayor resistividad en la parte superior.

6.2.2. MURO DE ADOBE SIN RECUBRIMIENTO

6.2.2.1. TERMOGRAFÍA INFRARROJA

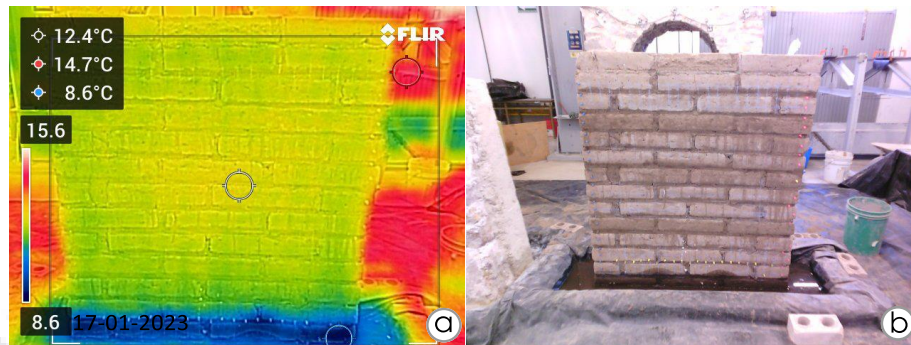


Figura 86: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 86, muestra las mediciones tomadas durante el día 17 de enero del 2023. El periodo seleccionado corresponde al inicio de la campaña de humedad por capilaridad en el muro de Adobe. Se observa la altura del frente húmedo ubicado a 0.09 m con respecto al nivel de piso terminado temperaturas en el rango de 8.6 °C a 12.4 °C.



Figura 87: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 87, muestran las mediciones tomadas durante el día 18 de enero del 2023. El periodo seleccionado corresponde al día consecutivo del inicio de la campaña. Se observa

la altura del frente húmedo ubicado a 0.11 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 7.9°C a 12.4°C.

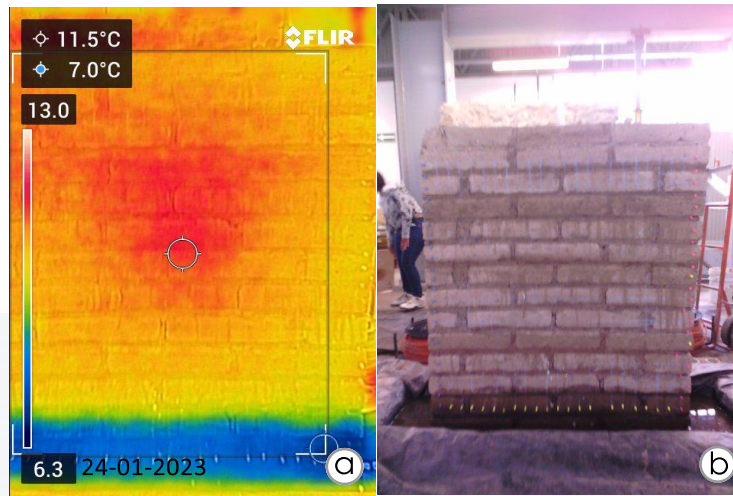


Figura 88: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 88, muestra las mediciones tomadas durante el día 24 de enero del 2023. El periodo seleccionado corresponde a días consecutivo de la prueba. Se observa la altura del frente húmedo ubicado a 0.20 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 7.0 °C a 11.5 °C.

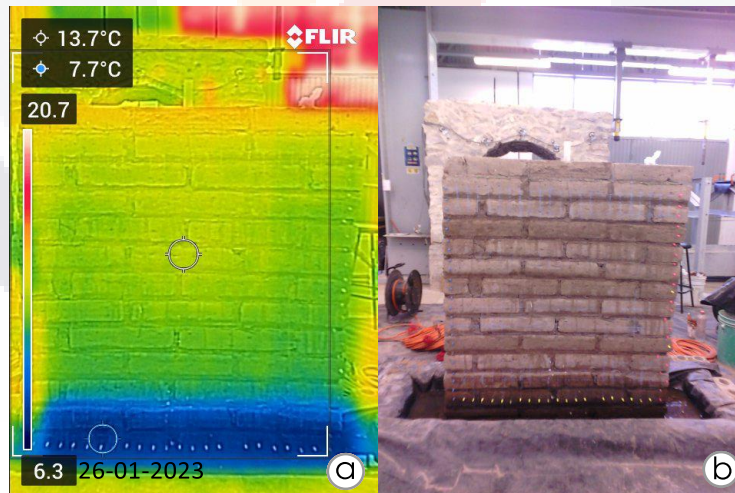


Figura 89: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 89, muestra las mediciones tomadas durante el día 26 de enero del 2023. El periodo seleccionado corresponde a días consecutivo de la prueba. Se observa la altura

del frente húmedo ubicado a 0.28 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 7.7°C a 13.7°C.

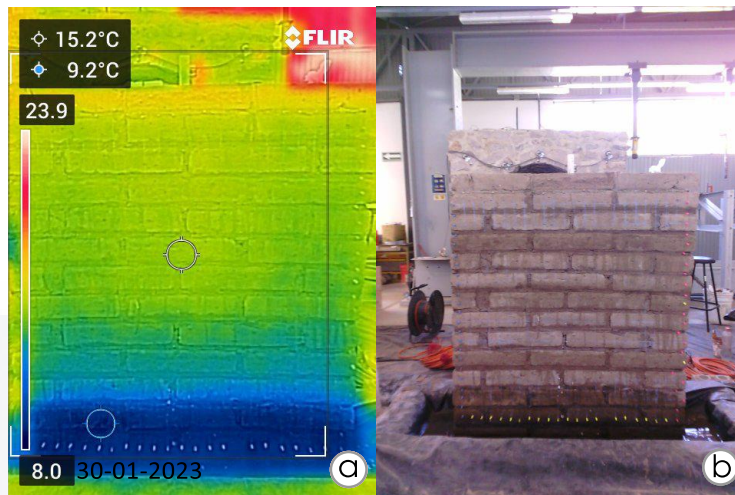


Figura 90: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 90, muestra las mediciones tomadas durante el día 30 de enero del 2023. El periodo seleccionado corresponde a días consecutivo de la prueba. Se observa la altura del frente húmedo ubicado a 0.30 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango va de 9.2°C a 15.2°C.

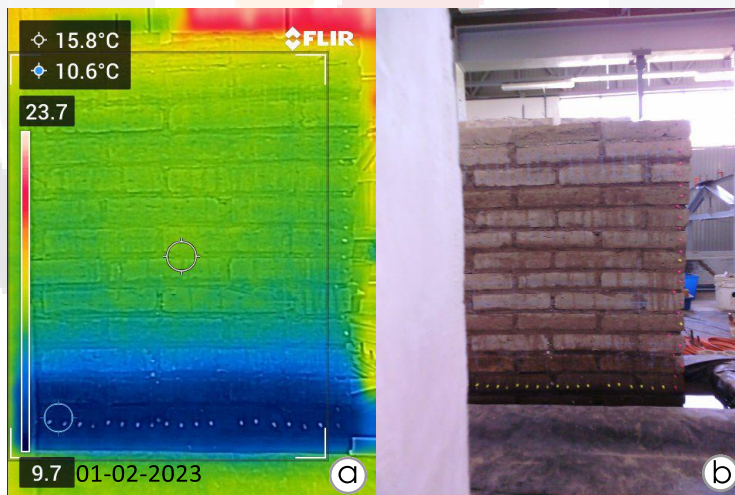


Figura 91: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 91, muestra las mediciones tomadas durante el día 01 de febrero del 2023. El periodo seleccionado corresponde a la penúltima medición de la prueba. Se observa la

altura del frente húmedo ubicado a 0.32 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 10.6°C a 15.8°C.

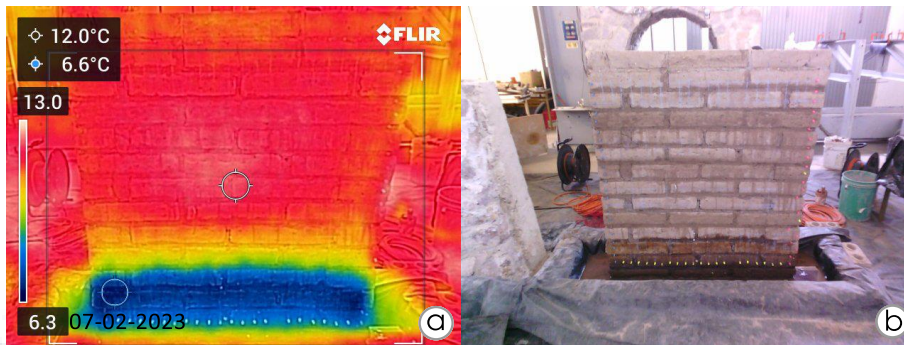


Figura 92: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 92, muestra las mediciones tomadas durante el día 07 de febrero del 2023. El periodo seleccionado corresponde a la última medición de la prueba. Se observa la altura del frente húmedo ubicado a 0.35 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 6.6°C a 12.0°C.

6.2.2.2. HIGRÓMETRO

Se llevaron a cabo varias mediciones empleando el higrómetro para medir la humedad superficial en la simulación de la humedad capilar.

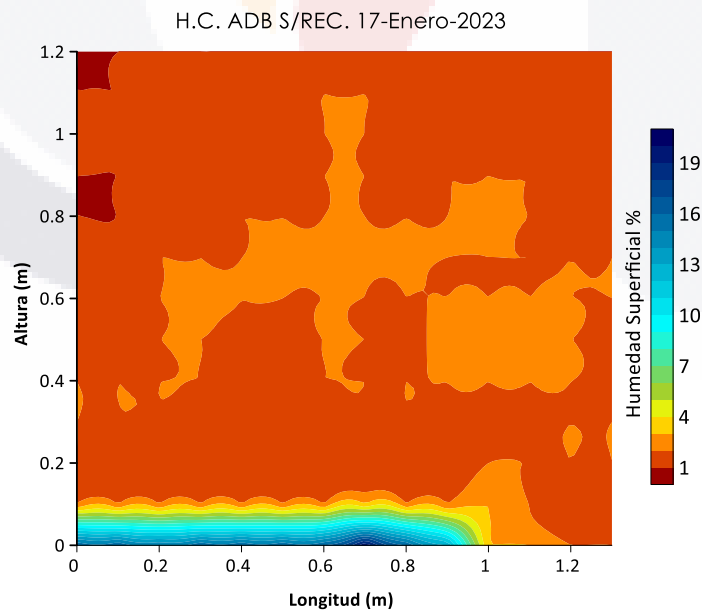


Figura 93: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 93 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 17 de enero de 2023. Las humedades en el muro de adobe sin recubrimiento debido al ascenso de la humedad por capilaridad, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 20%, localizándose la mayor concentración en la parte inferior al centro del muro, por debajo de 0.05 m de altura.

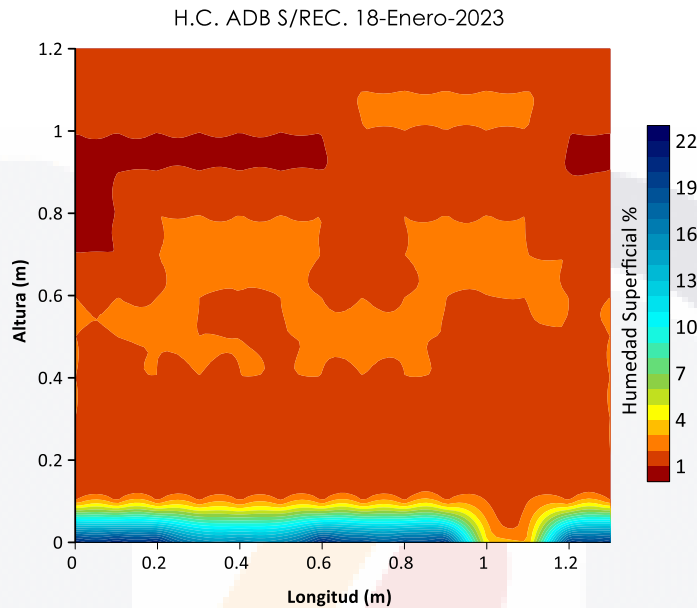


Figura 94: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 94 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 18 de enero de 2023. Las humedades en el muro de adobe sin recubrimiento debido al ascenso de la humedad por capilaridad, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 21%, localizándose la mayor concentración en la parte inferior al centro del muro, por debajo de 0.05 m de altura.

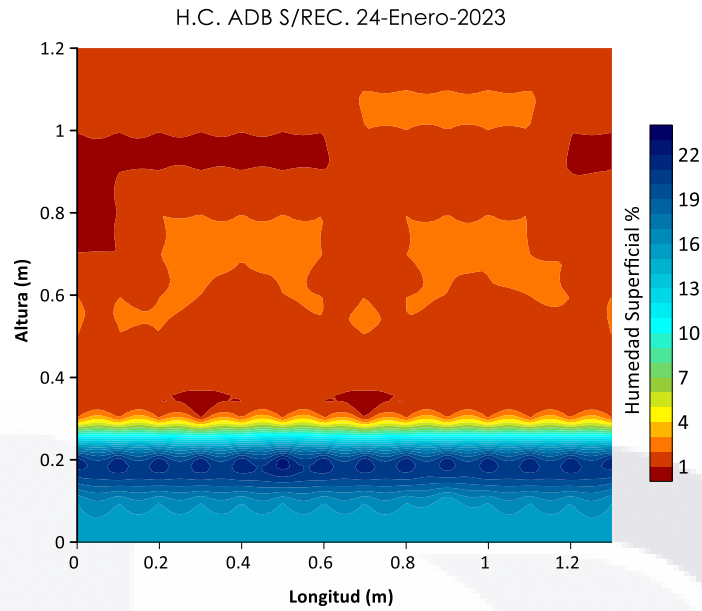


Figura 95: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

De La figura 95 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 24 de enero de 2023. Las humedades en el muro de adobe sin recubrimiento debido al ascenso de la humedad por capilaridad, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 22%, concentrándose de manera uniforme en los primeros 0.2 m de altura.

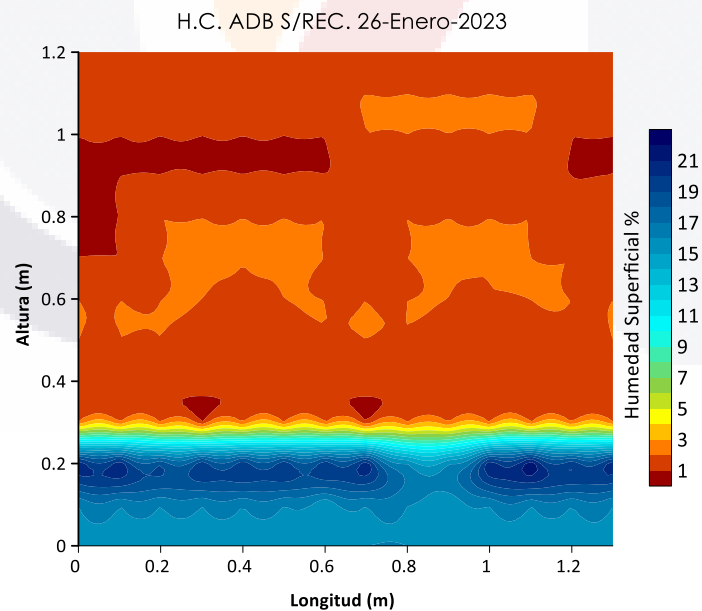


Figura 96: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 96 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 26 de enero de 2023. Las humedades en el muro de adobe sin recubrimiento debido al ascenso de la humedad por capilaridad, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 20%, concentrándose de manera uniforme en los primeros 0.2 m de altura.

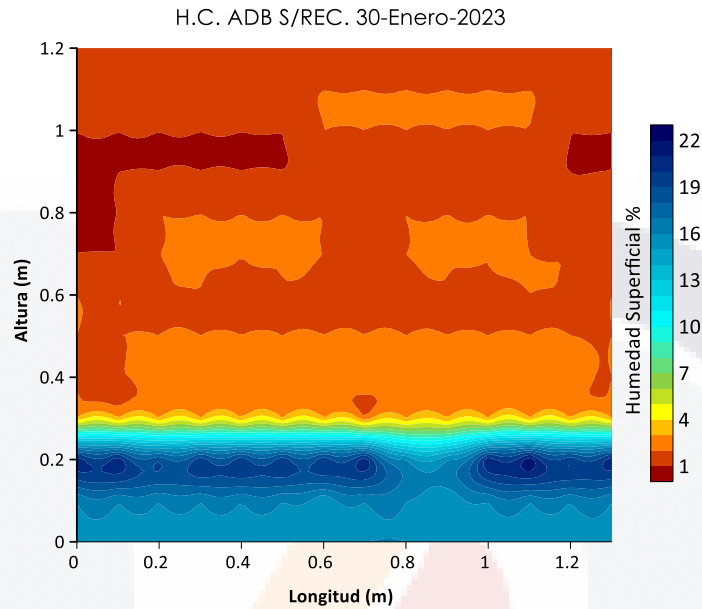


Figura 97: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 97 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 30 de enero de 2023. Las humedades en el muro de adobe sin recubrimiento debido al ascenso de la humedad por capilaridad, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 20%, concentrándose de manera uniforme en los primeros 0.2 m de altura.

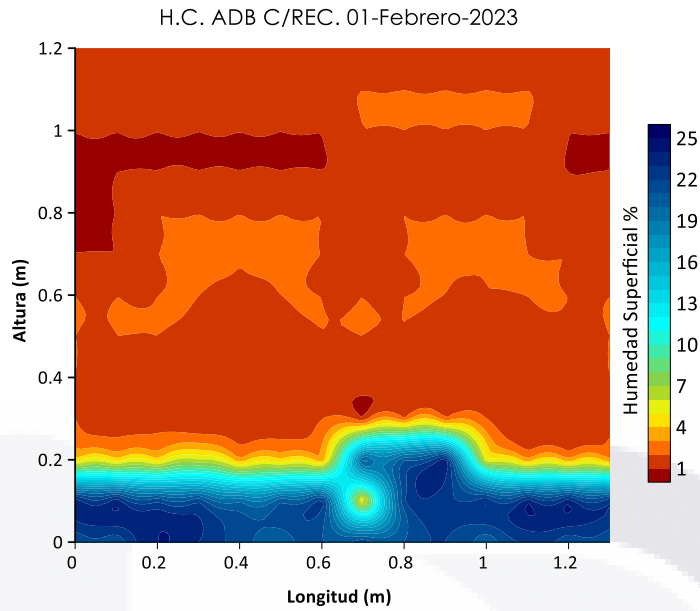


Figura 98: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 98 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 01 de febrero de 2023. Las humedades en el muro de adobe sin recubrimiento debido al ascenso de la humedad por capilaridad, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 24%, concentrándose en los extremos hasta 0.2 m de altura y en la parte central asciende hasta 0.25 m.

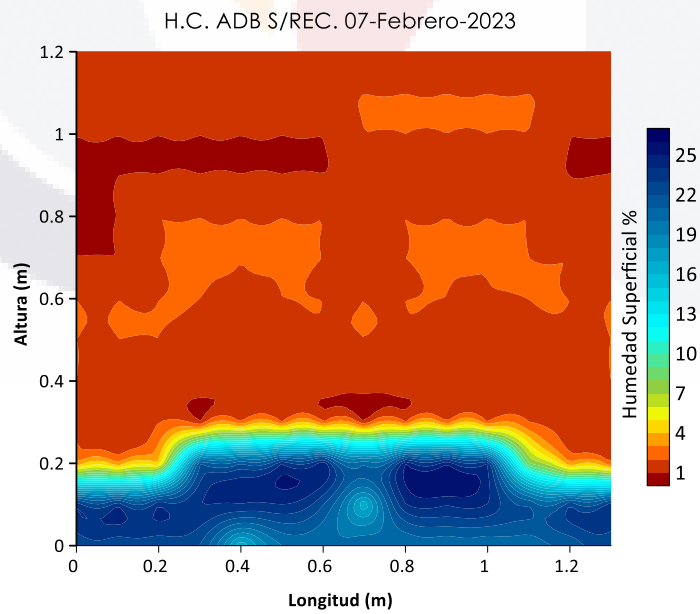


Figura 99: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro de Adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 99 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 07 de febrero de 2023. Las humedades en el muro de adobe sin recubrimiento debido al ascenso de la humedad por capilaridad, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 26%, concentrándose en la parte central del muro en los primeros 0.25 m de altura.

6.2.2.3. TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

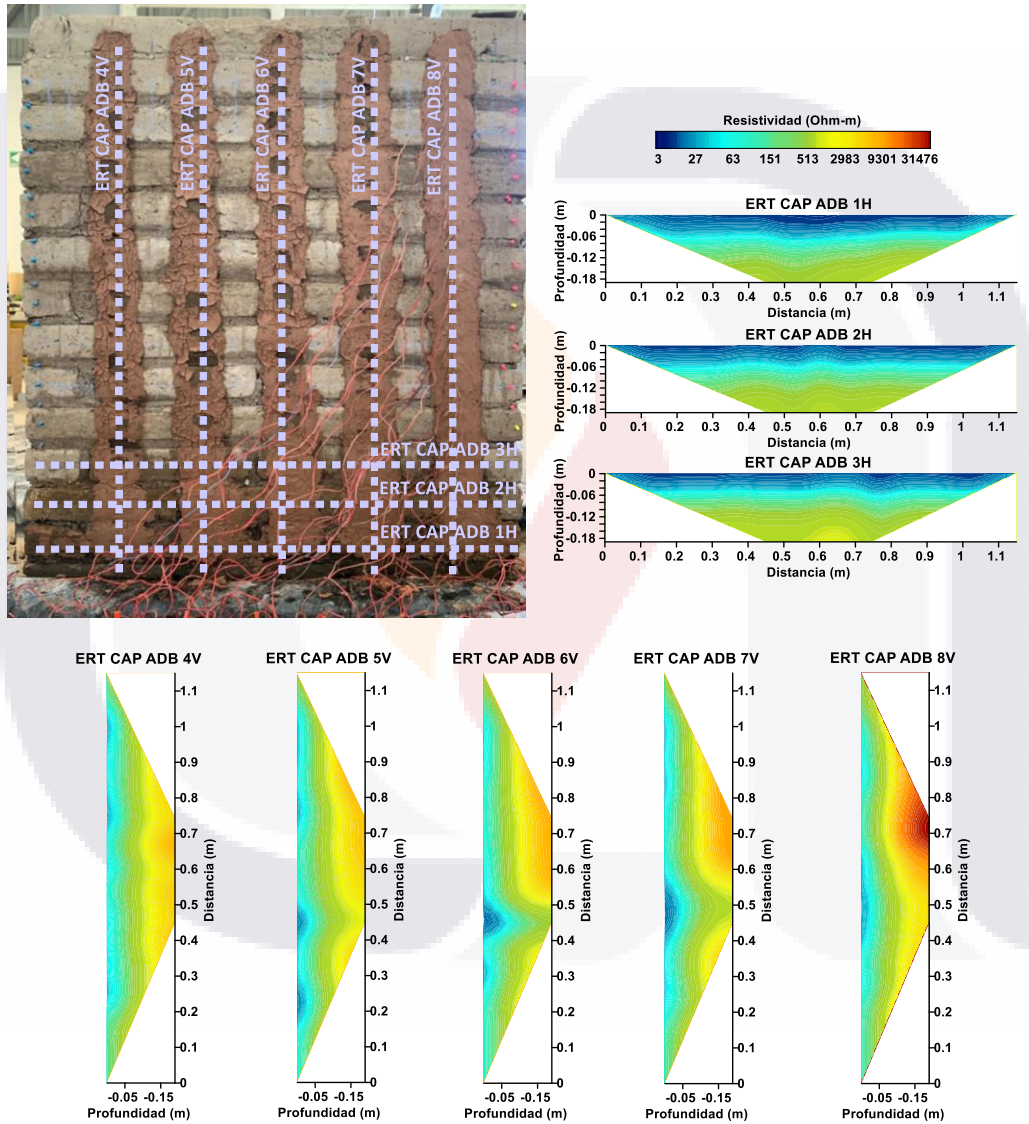


Figura 100: Humedad por capilaridad. Prueba de ERT en muro de adobe sin recubrimiento. Procesamiento en ProsysII, Zondres2D, Surfer 16. Elaboración propia.

De acuerdo con las mediciones dadas por la humedad por capilaridad en el muro de adobe, se realizan 3 mediciones horizontales (figura 100) identificadas como ERT CAP ADB 1H, ERT CAP ADB 2H y ERT CAP ADB 3H se encuentran con respecto al nivel de piso a 0.15,

0.4 y 0.75 m respectivamente. Además, se realizan mediciones verticales (figura 100) identificadas como ERT CAP ADB 4V, ERT CAP ADB 5V, ERT CAP ADB 6V, ERT CAP ADB 7V y ERT CAP ADB 8V, que se encuentran ubicadas con respecto al extremo izquierdo a 0.20, 0.40, 0.60, 0.80 y 1.00 m respectivamente. En la figura 100, se observan diferentes anomalías resistivas que corresponden de acuerdo con el contenido de humedad presentado en el muro debido al fenómeno capilar. Las resistividades dadas de 1-100 Ohm-m (azul marino-cian) son valores que podrían corresponder a un material saturado mientras que de 100-33,000 Ohm-m (cian a amarillo-naranja) son valores del material parcialmente saturado.

En los perfiles verticales se aprecia una anomalía de baja resistividad (1-100 Ohm-m) concentrándose a una altura de 0.20-0.30 m y de 0.40-0.50 m con una profundidad de 0.05 m.

6.2.3. MURO DE MAMPOSTERÍA DE PIEDRA

6.2.3.1. TERMOGRAFÍA INFRARROJA

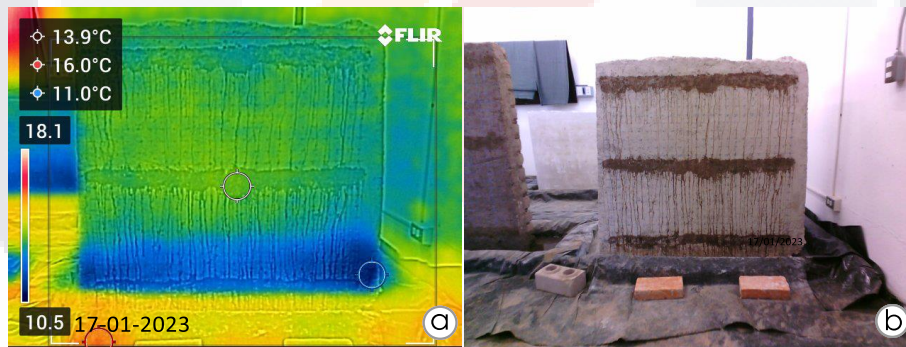


Figura 101: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 101, muestra las mediciones tomadas durante el día 17 de enero del 2023. El periodo seleccionado corresponde al inicio de la campaña de humedad por capilaridad en el muro de mampostería. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.20 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 11.0°C a 13.9°C.

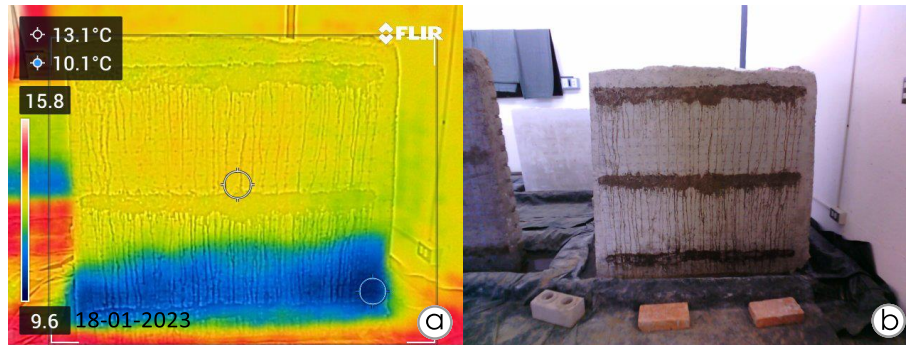


Figura 102: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 102, muestra las mediciones tomadas durante el día 18 de enero del 2023. El periodo seleccionado corresponde al día consecutivo del inicio de la campaña. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.30 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 10.1°C a 13.1°C.

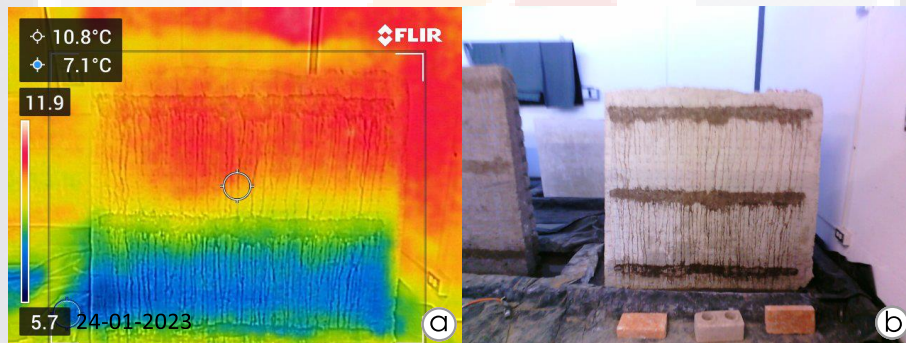


Figura 103: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 103, muestra las mediciones tomadas durante el día 24 de enero del 2023. El periodo seleccionado corresponde a días consecutivo de la prueba. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.55 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 7.1°C a 10.8°C.

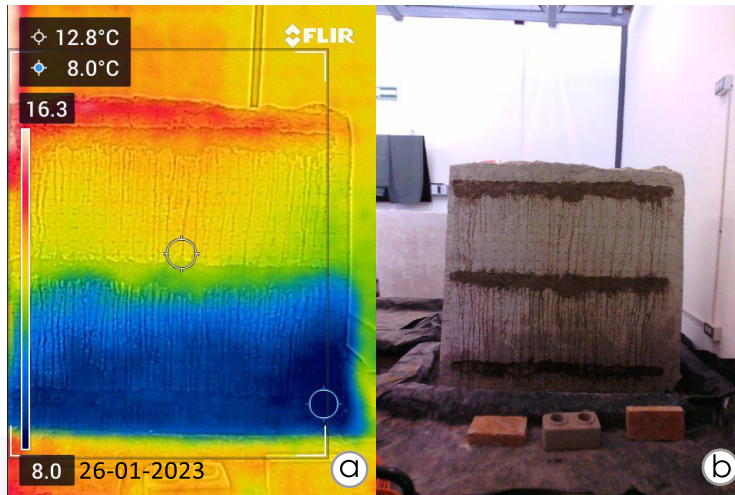


Figura 104: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 104, muestra las mediciones tomadas durante el día 26 de enero del 2023. El periodo seleccionado corresponde a días consecutivo de la prueba. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.60 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 8.0°C a 12.8°C.

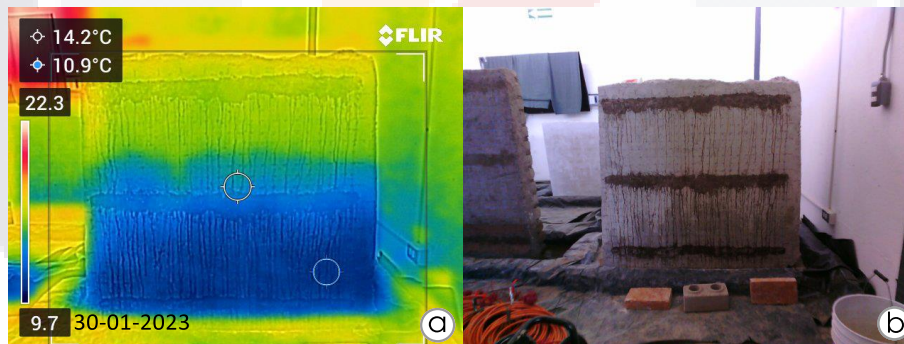


Figura 105: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 105, muestra las mediciones tomadas durante el día 30 de enero del 2023. El periodo seleccionado corresponde a días consecutivo de la prueba. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.70 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 10.9°C a 14.2°C.

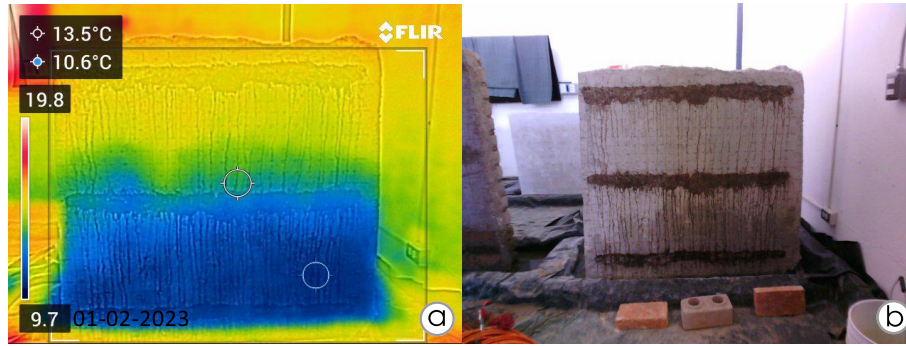


Figura 106: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 106, exhibe las mediciones tomadas durante el día 01 de febrero del 2023. El periodo seleccionado corresponde a la penúltima medición de la prueba. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.75 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 10.6°C a 13.5°C.

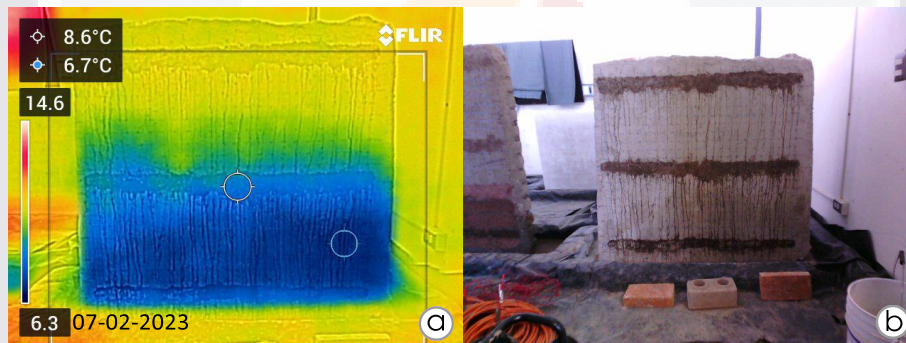


Figura 107: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por capilaridad en muro de mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 107, muestra las mediciones tomadas durante el día 07 de febrero del 2023. El periodo seleccionado corresponde a la última medición de la prueba. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.80 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 6.7°C a 8.6°C.

6.2.3.2. HIGRÓMETRO

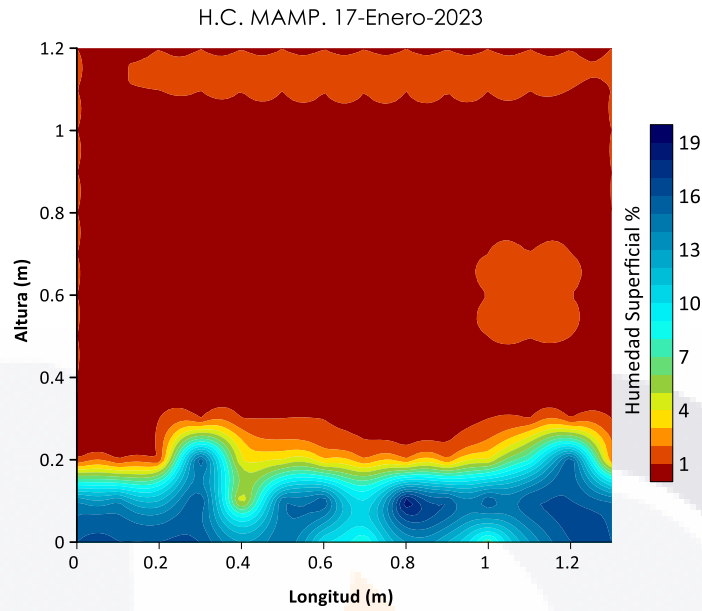


Figura 108: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 108 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 17 de enero de 2023. Las humedades en el muro de mampostería de piedra, representados por el ascenso de la humedad por capilaridad, presentan porcentajes de humedad superficial de hasta 19%, concentrándose en la parte inferior central por debajo de 0.10 m de altura.

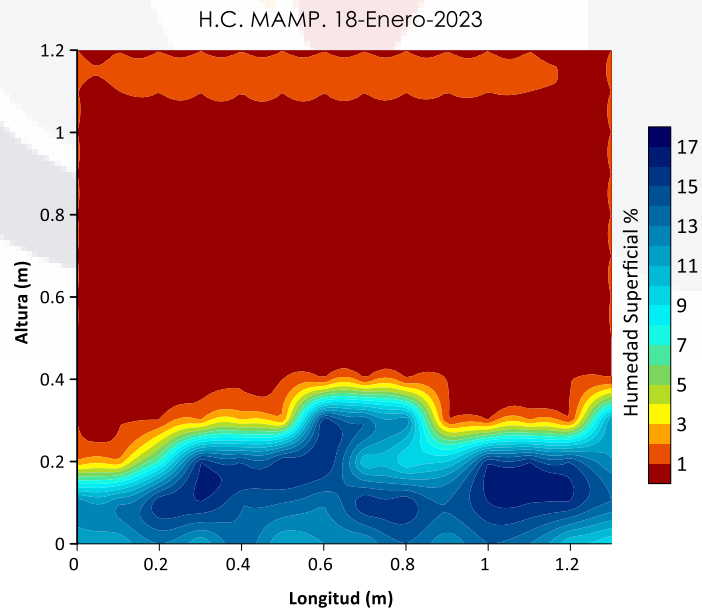


Figura 109: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 109 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 18 de enero de 2023. Las humedades en el muro de mampostería de piedra, representados por el ascenso de la humedad por capilaridad, presentan porcentajes de humedad superficial de hasta 16%, concentrándose de forma variable en la parte inferior central del muro por debajo de 0.35 m de altura.

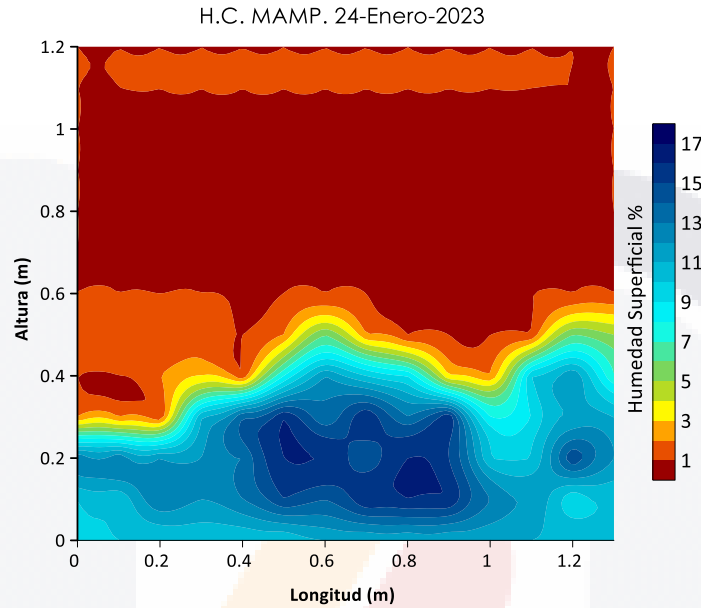


Figura 110: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 110 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 24 de enero de 2023. Las humedades en el muro de mampostería de piedra, representados por el ascenso de la humedad por capilaridad, presentan porcentajes de humedad superficial de hasta 16%, concentrándose de forma variable en la parte inferior central del muro por debajo de 0.50 m de altura.

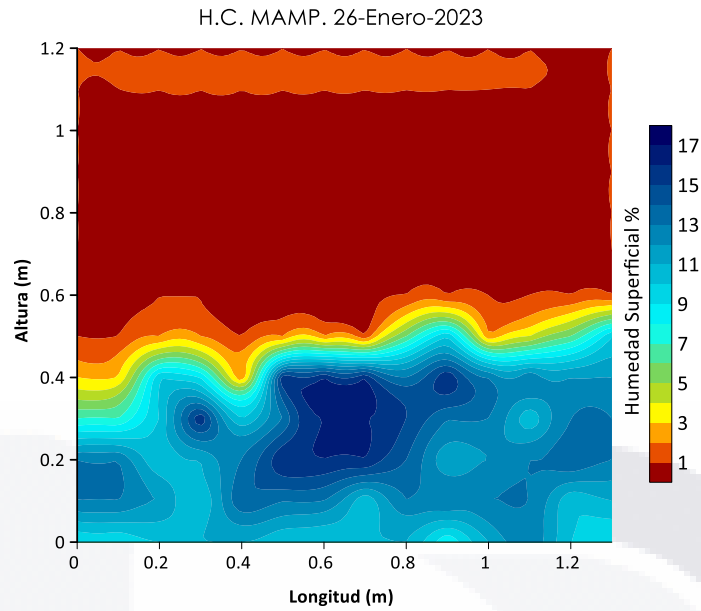


Figura 111: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 111 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 26 de enero de 2023. Las humedades en el muro de mampostería de piedra, representados por el ascenso de la humedad por capilaridad, presentan porcentajes de humedad superficial de hasta 16%, concentrándose en la parte inferior central del muro por debajo de 0.50 m de altura.

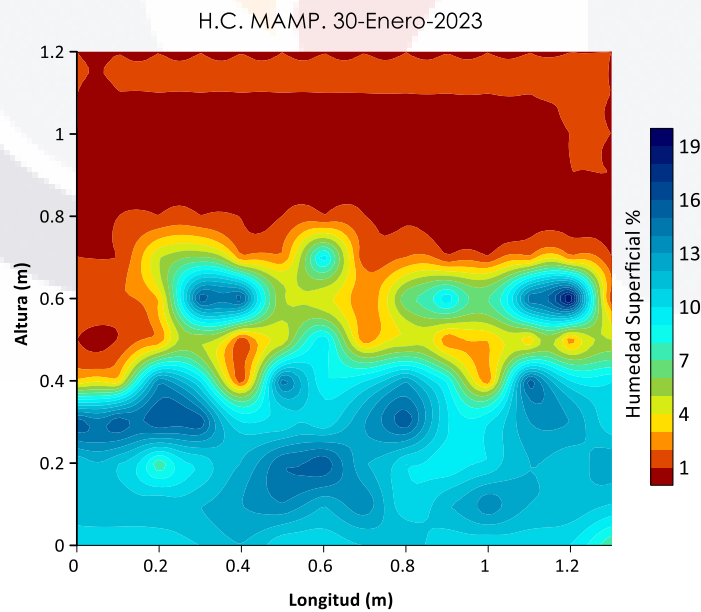


Figura 112: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 112 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 30 de enero de 2023. Las humedades en el muro de mampostería de piedra, representados por el ascenso de la humedad por capilaridad, presentan porcentajes de humedad superficial de hasta 20%, concentrándose de forma variable en la parte inferior del muro por debajo de 0.45 m de altura. Entre 0.5 y 0.7 m de altura se observan zonas de humedad dispersas.

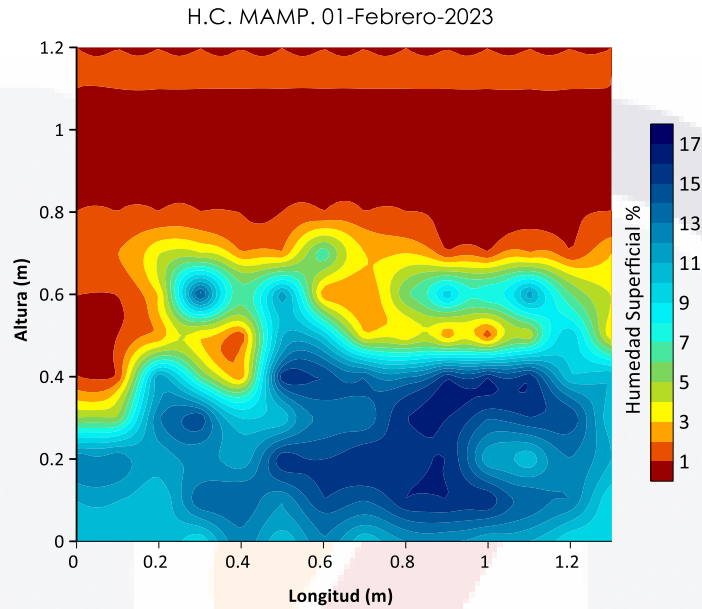


Figura 113: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 113 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 01 de febrero de 2023. Las humedades en el muro de mampostería de piedra, representados por el ascenso de la humedad por capilaridad, presentan porcentajes de humedad superficial de hasta 16% concentrándose en la parte inferior del muro por debajo de 0.45 m de altura. Por encima de 0.5 la humedad se distribuye de forma variable.

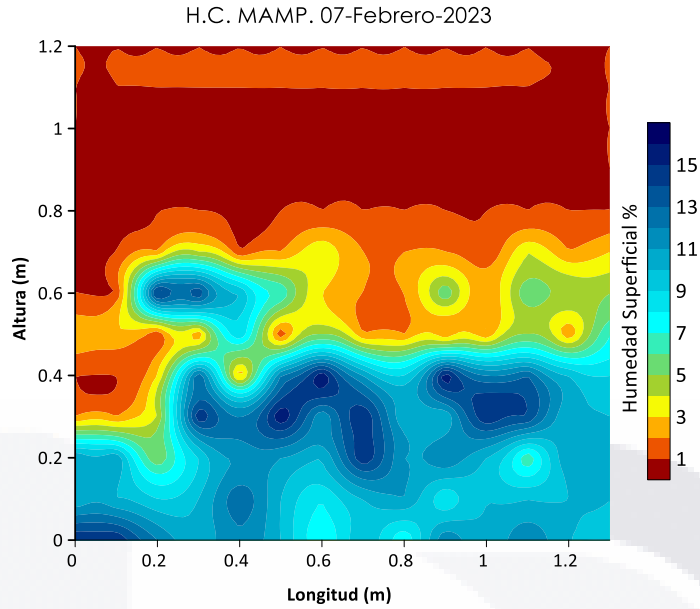


Figura 114: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por capilaridad en muro mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 114 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 07 de febrero de 2023. Las humedades en el muro de mampostería de piedra, representados por el ascenso de la humedad por capilaridad, presentan porcentajes de humedad superficial de hasta 16%, concentrándose en la parte inferior del muro por debajo de 0.45 m de altura. Por encima de 0.5 la humedad se distribuye de forma variable tendiendo hacia los extremos del muro.

6.2.3.3. TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

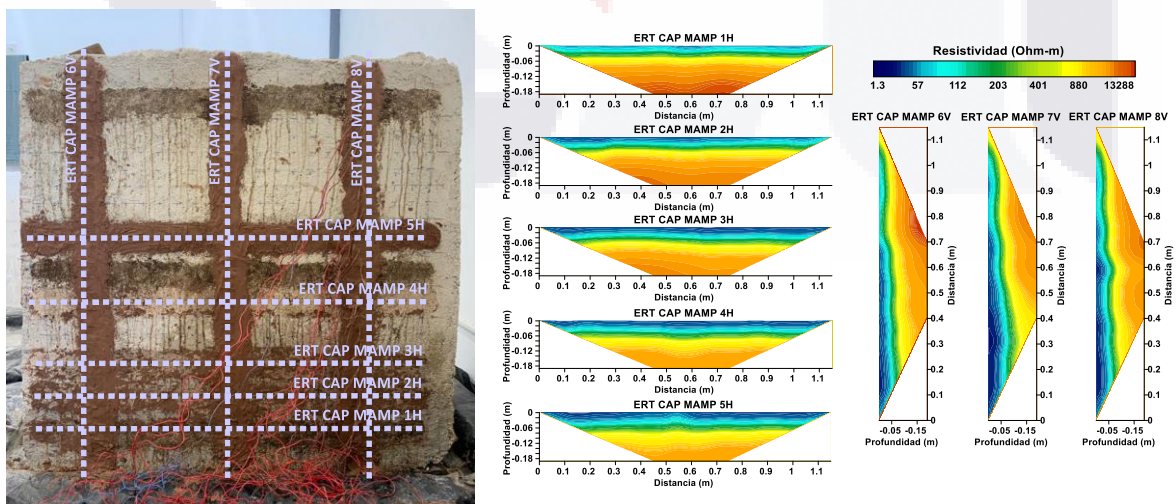


Figura 115: Humedad por capilaridad. Prueba de ERT en muro de mampostería de piedra. Procesamiento en ProsysII, Zondres2D, Surfer 16. Elaboración propia.

De acuerdo con las mediciones dadas por la humedad por capilaridad en el muro de mampostería de piedra, se realizan 5 mediciones horizontales (figura 115) identificadas como ERT CAP MAMP 1H, ERT CAP MAMP 2H, ERT CAP MAMP 3H, ERT CAP MAMP 4H Y ERT CAP MAMP 5H, se encuentran con respecto al nivel de piso a 0.15, 0.25, 0.35, 0.55 y 0.75 m respectivamente. Además, se realizan mediciones verticales identificadas como ERT CAP MAMP 6V, ERT CAP MAMP 7V y ERT CAP MAMP 8V, que se encuentran ubicadas con respecto al extremo izquierdo a 0.15, 0.55, y 0.95 m respectivamente. En la figura 115, se observan diferentes anomalías resistivas que corresponden de acuerdo con el contenido de humedad presentado en el muro debido al fenómeno capilar. Las resistividades dadas de 1-115 Ohm-m (azul marino-cian) son valores que podrían corresponder a un material saturado mientras que de 115-16,000 Ohm-m (cian a amarillo-naranja) son valores del material parcialmente saturado.

En los perfiles verticales se aprecia una anomalía de baja resistividad (1-115 Ohm-m) concentrándose a una altura de 0.70 m con una profundidad de 0.05 m.

6.3. HUMEDAD ACCIDENTAL

6.3.1. MURO DE ADOBE CON RECUBRIMIENTO

6.3.1.1. TERMOGRAFÍA INFRARROJA

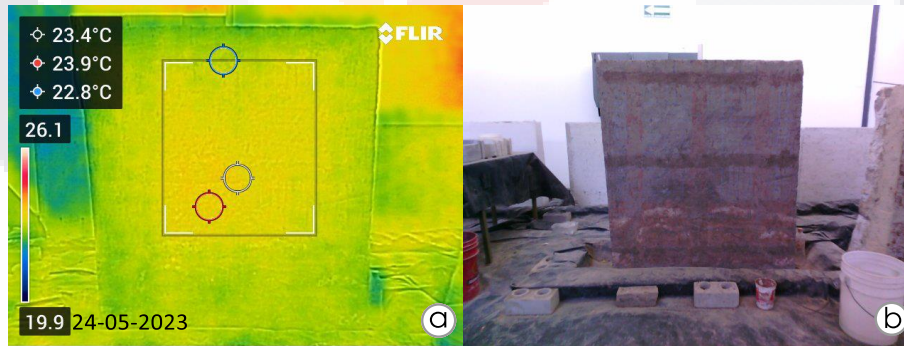


Figura 116: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 116, muestra las mediciones tomadas durante el día 24 de mayo del 2023. El periodo seleccionado corresponde al inicio de la campaña de humedad accidental en muro de adobe. Se observa temperaturas en el rango de 19.9°C a 23.4°C, no presenta humedad alguna en este tiempo de medición.

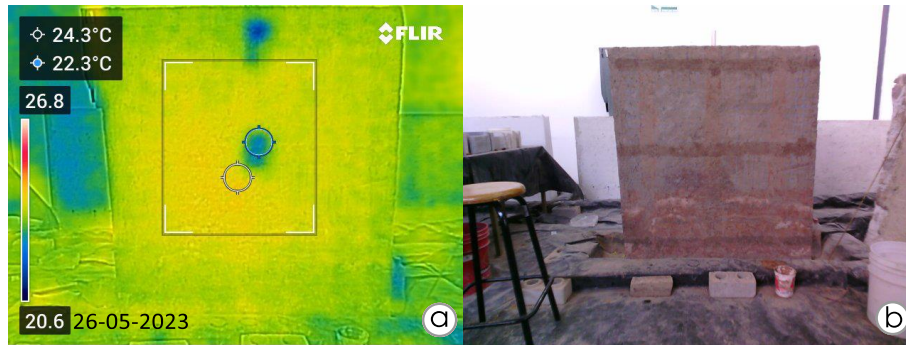


Figura 117: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 117, muestra las mediciones tomadas durante el día 26 de mayo del 2023. El periodo seleccionado corresponde a dos días transcurridos del inicio de la campaña. Se observa la altura del frente húmedo ubicada 0.60 m y 1.20 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 22.3°C a 24.3°C.

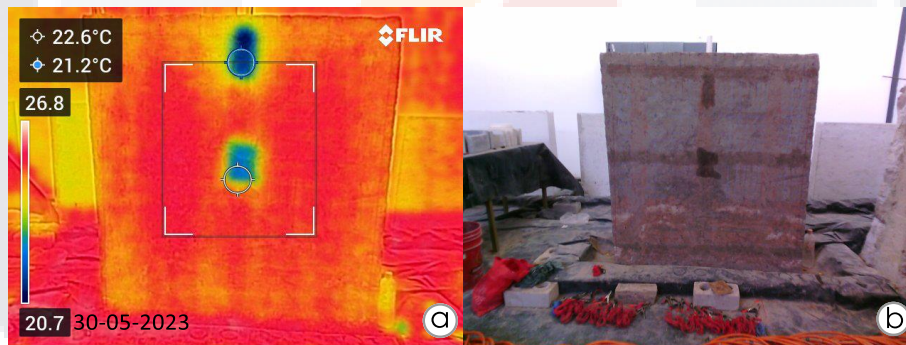


Figura 118: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 118, muestra las mediciones tomadas durante el día 30 de mayo del 2023. El periodo seleccionado corresponde a 6 días después del inicio. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.60 m y 1.20 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 21.2°C a 22.6°C.

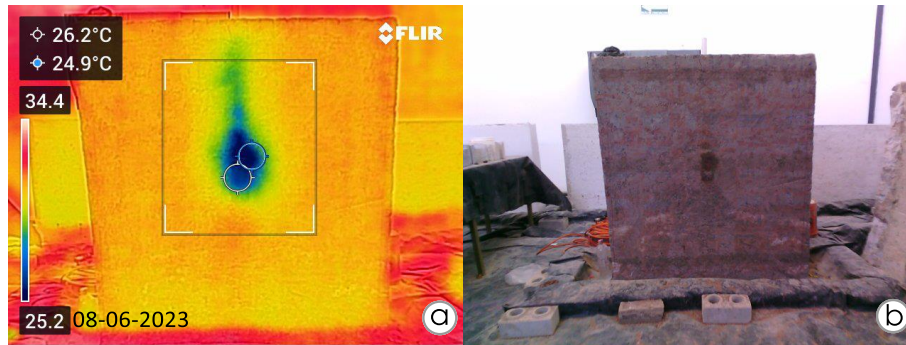


Figura 119: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 119, muestra las mediciones tomadas durante el día 08 de junio del 2023. El periodo seleccionado corresponde a 9 días después de la anterior captura. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.60 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 24.9°C a 26.2°C.

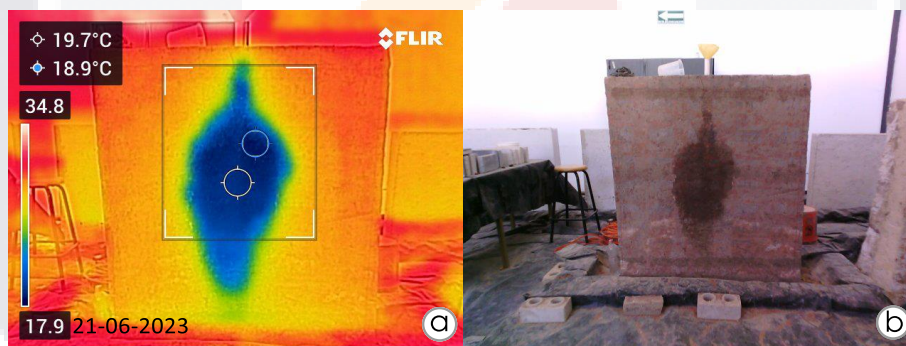


Figura 120: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 120, exhibe las mediciones tomadas durante el día 21 de junio del 2023. El periodo seleccionado corresponde al término de monitoreo de la humedad. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.30 hasta 1.10 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 18.9°C a 19.7°C.

6.3.1.2. HIGRÓMETRO

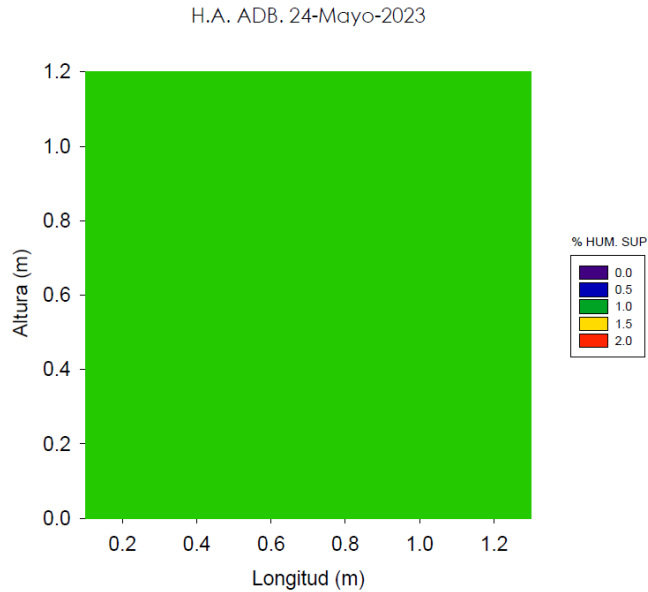


Figura 121: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en sigmaplot. Imagen del autor.

La figura 121 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 24 de mayo de 2023. Las humedades en el muro de adobe con recubrimiento son representadas de un solo color con el 1% de humedad superficial debido que no existe frente húmedo superficial en el periodo estudiado.

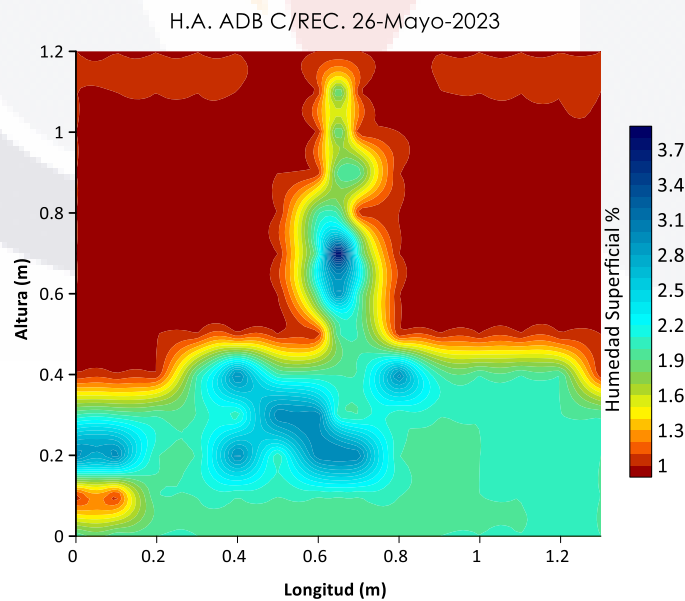


Figura 122: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 122 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 26 de mayo de 2023. Las humedades en el muro de adobe con recubrimiento debido a la humedad accidental presentan porcentajes de humedad superficial de hasta 4% debido a la tubería al centro del muro entre 0.6 y 0.75 m de altura. En la parte inferior por debajo de 0.5 m de altura se observa la presencia de humedad debido al remanente de humedad capilar.

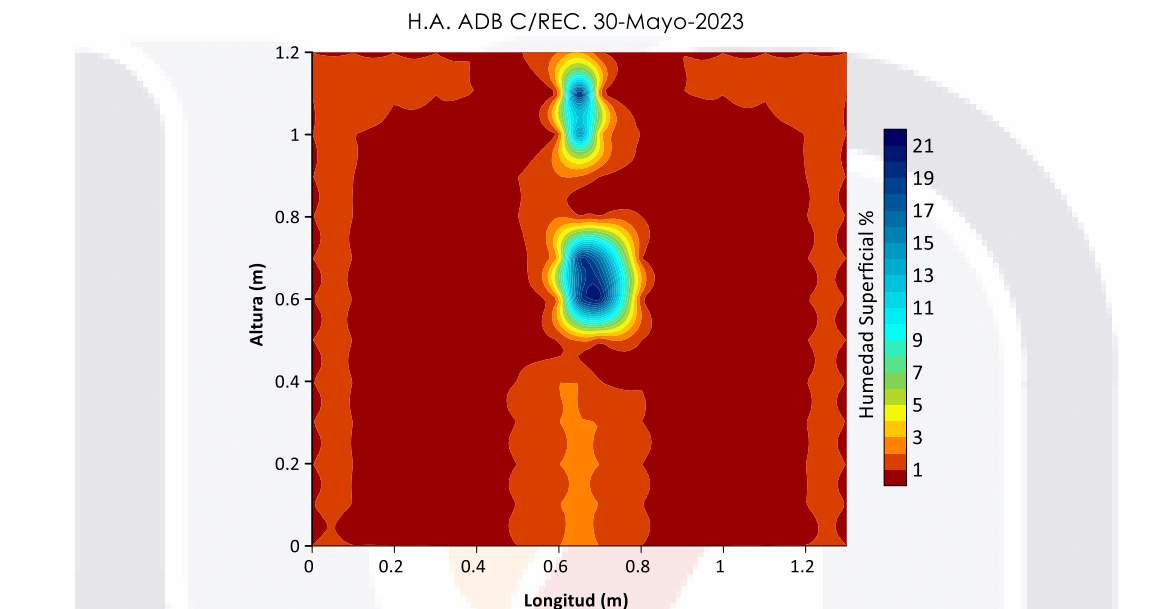


Figura 123: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 123 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 30 de mayo de 2023. Las humedades en el muro de adobe con recubrimiento debido a la humedad accidental, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 22% en el centro debido a la tubería al centro del muro entre 0.55 a 0.80 m de altura.

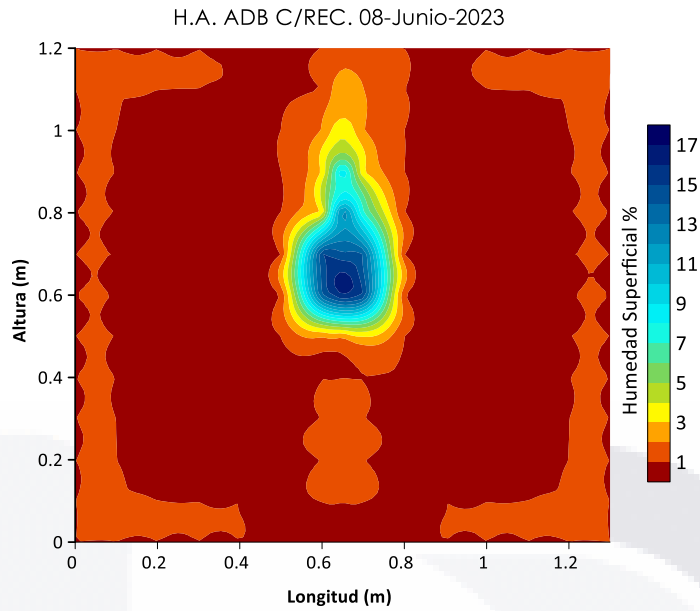


Figura 124: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 124 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 08 de junio de 2023. Las humedades en el muro de adobe con recubrimiento debido a la humedad accidental, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta debido a la tubería al centro del muro entre 0.55 a 0.80 m de altura.

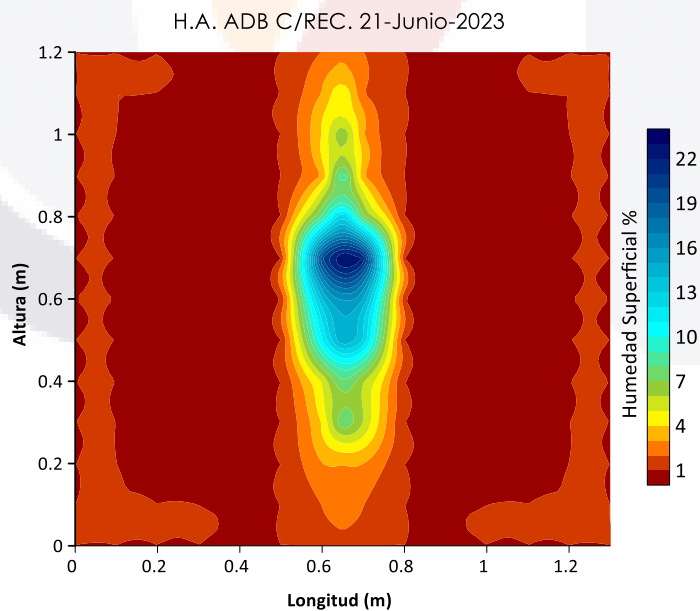


Figura 125: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 125 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 21 de junio de 2023. Las humedades en el muro de adobe con recubrimiento debido a la humedad accidental, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 22% debido a la tubería al centro del muro entre 0.55 a 0.80 m de altura.

6.3.2. MURO DE ADOBE SIN RECUBRIMIENTO

6.3.2.1. TERMOGRAFÍA INFRARROJA

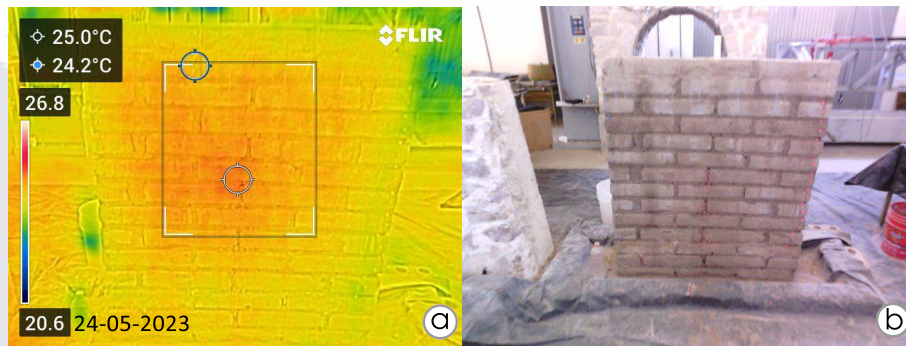


Figura 126: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 126, muestran las mediciones tomadas durante el día 24 de mayo del 2023. El periodo seleccionado corresponde al inicio de la campaña de humedad accidental en muro de adobe. Se observa temperaturas en el rango de 24.2°C a 25.0°C. En este periodo de la medición aún no se presentan humedades visibles.

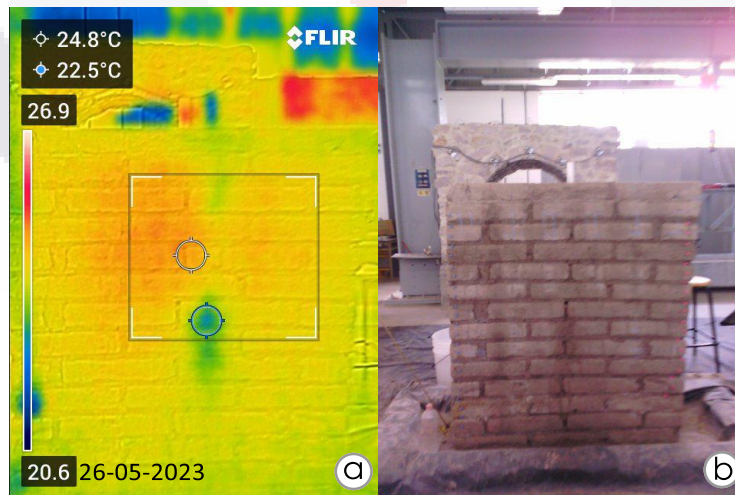


Figura 127: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 127, muestran las mediciones tomadas durante el día 26 de mayo del 2023. El periodo seleccionado corresponde a dos días transcurridos del inicio de la campaña de humedad accidental en muro de adobe. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.60 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 22.5°C a 24.8°C.

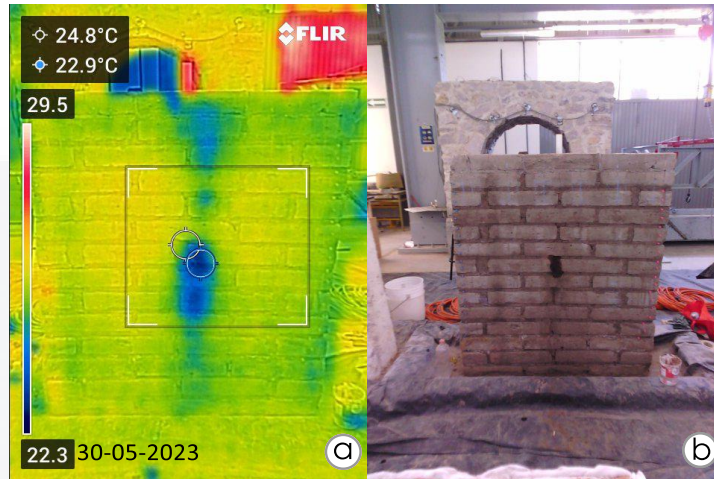


Figura 128: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 128, muestra las mediciones tomadas durante el día 30 de mayo del 2023. El periodo seleccionado corresponde a 6 días después del inicio de la campaña de humedad accidental en muro de adobe. Se observa la altura del frente húmedo ubicado a 0.60 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 22.9°C a 24.8°C.

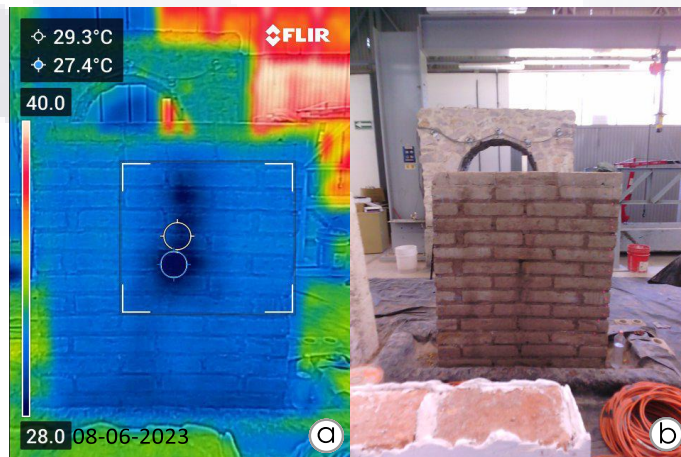


Figura 129: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 129, muestra las mediciones tomadas durante el día 08 de junio del 2023. El periodo seleccionado corresponde a 9 días después de la anterior captura en el muro de adobe. Se observa la altura del frente húmedo ubicado a 0.60 hasta 1.10 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 27.4°C a 29.3°C.

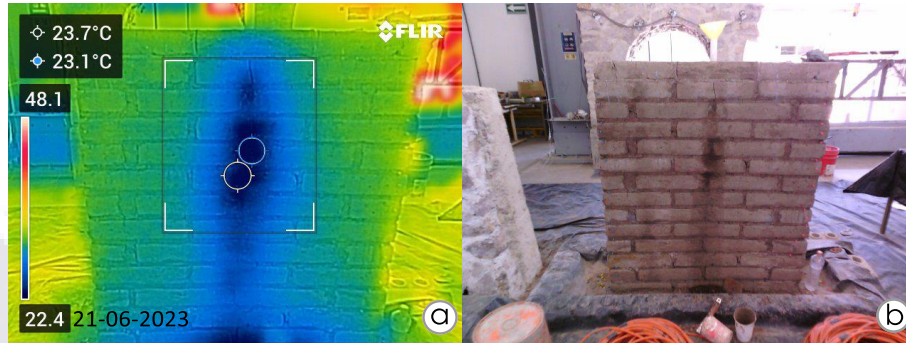


Figura 130: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 130, muestra las mediciones tomadas durante el día 21 de junio del 2023. El periodo seleccionado corresponde al término de monitoreo de la humedad accidental en el muro de adobe. Se observa la altura del frente húmedo ubicado a 0.50 m hasta 1.10 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 23.1°C a 23.7°C.

6.3.2.2. HIGRÓMETRO

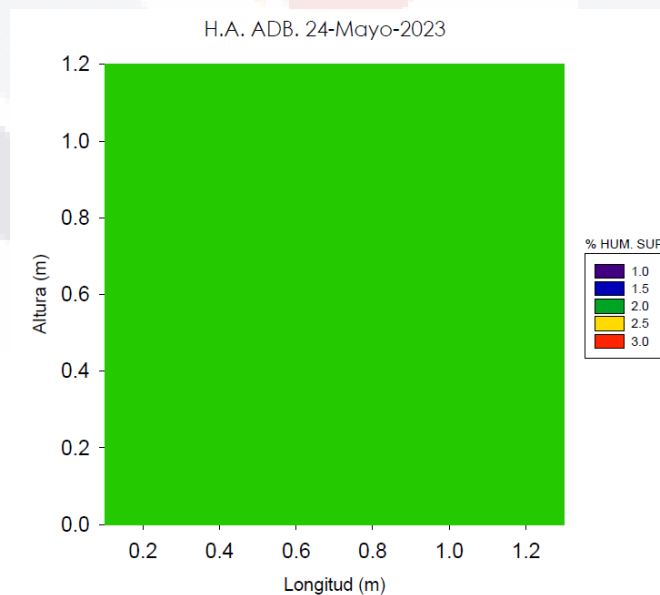


Figura 131: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Sigmaplot. Imagen del autor.

La figura 131 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 24 de mayo de 2023. Las humedades en el muro de adobe sin recubrimiento son representadas de un solo color con el 2% de humedad superficial debido que no existe frente húmedo superficial en el periodo estudiado.

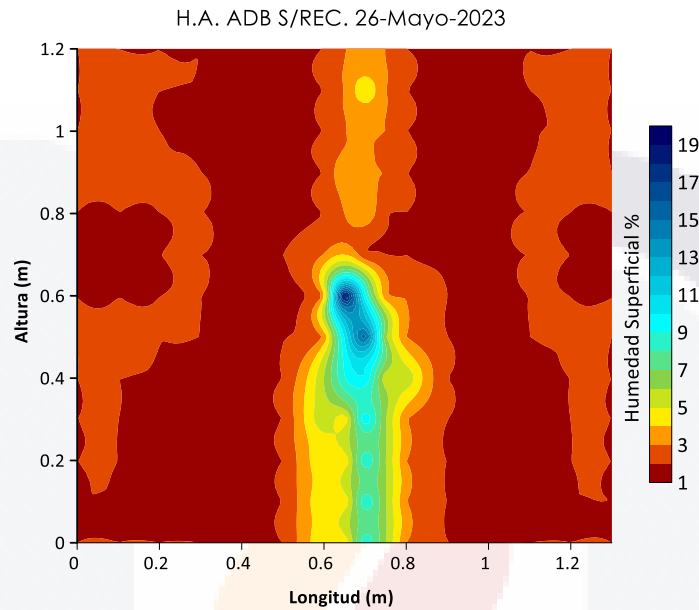


Figura 132: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 132 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 26 de mayo de 2023. Las humedades en el muro de adobe sin recubrimiento debido a la humedad accidental, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 20% en el centro del muro donde se ubica la tubería entre 0.45 a 0.65 m de altura.

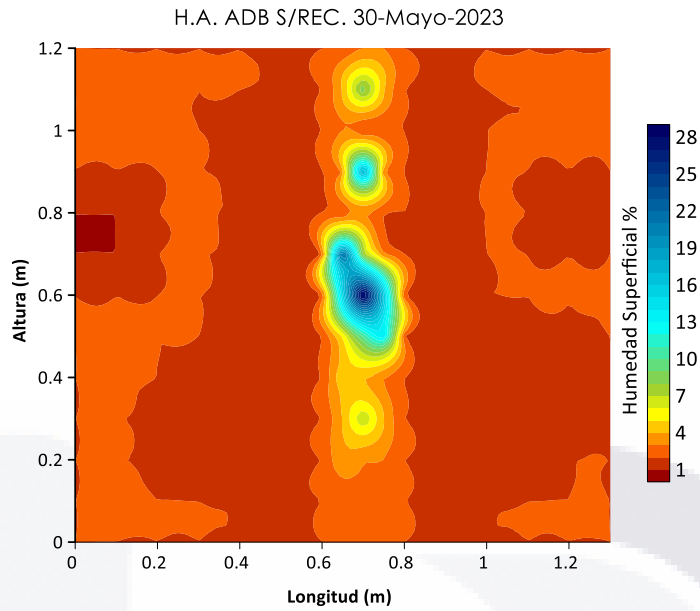


Figura 133: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 133 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 30 de mayo de 2023. Las humedades en el muro de adobe sin recubrimiento debido a la humedad accidental, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 30% en el centro del muro donde se ubica la tubería entre 0.5 y 0.70 m de altura.

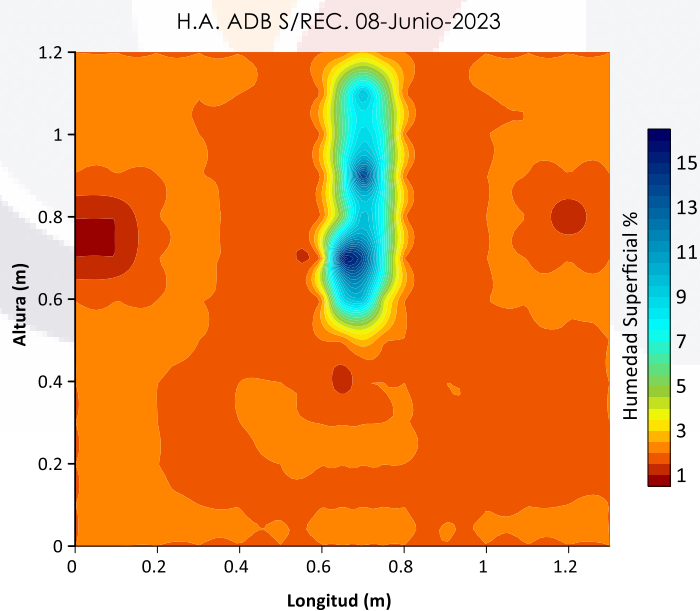


Figura 134: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 134 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 08 de junio de 2023. Las humedades en el muro de adobe sin recubrimiento debido a la humedad accidental, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 16% en el centro del muro donde se ubica la tubería entre 0.60 a 0.80 m de altura.

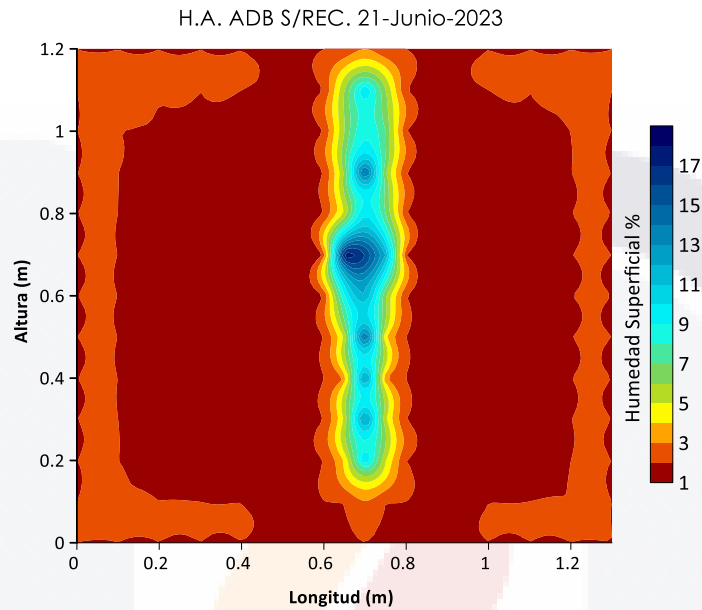


Figura 135: Datos de Higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 135 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 21 de junio de 2023. Las humedades en el muro de adobe debido a la propagación de la humedad accidental, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 18% en el centro del muro donde se ubica la tubería, entre 0.60 y 0.8 m de altura.

6.3.3. MURO DE MAMPOSTERIA DE PIEDRA

6.3.3.1. TERMOGRAFÍA INFRARROJA

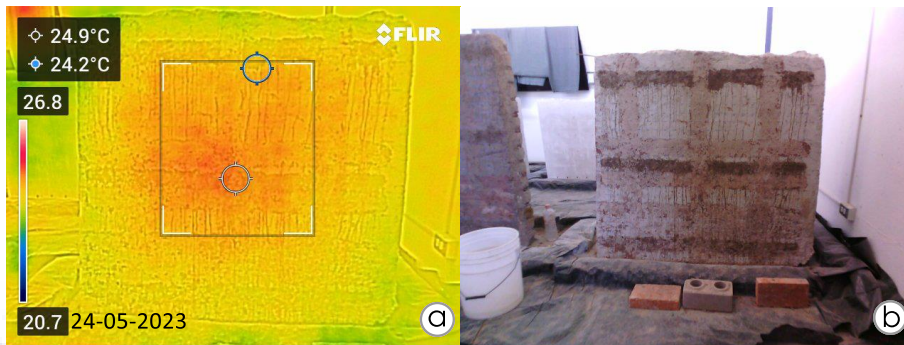


Figura 136: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 136, muestra las mediciones tomadas durante el día 24 de mayo del 2023. El periodo seleccionado corresponde al inicio de la campaña de humedad accidental en muro de adobe. Se observa temperaturas en el rango de 24.2 °C a 24.9 °C.

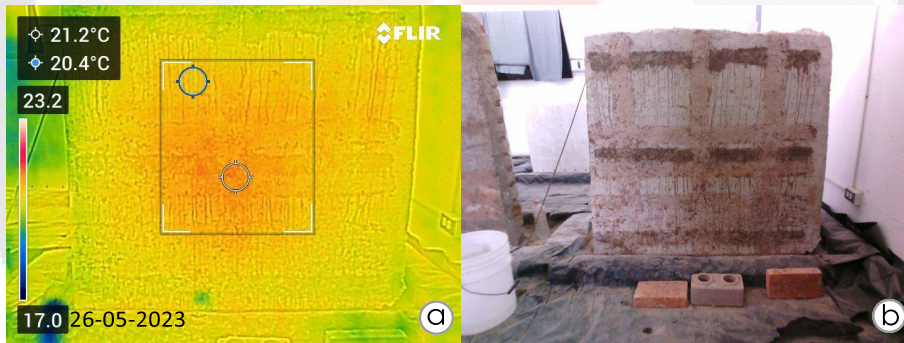


Figura 137: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 137, muestra las mediciones tomadas durante el día 26 de mayo del 2023. El periodo seleccionado corresponde a dos días transcurridos del inicio de la campaña. Se observa temperaturas en el rango de 20.4 °C a 21.2 °C.

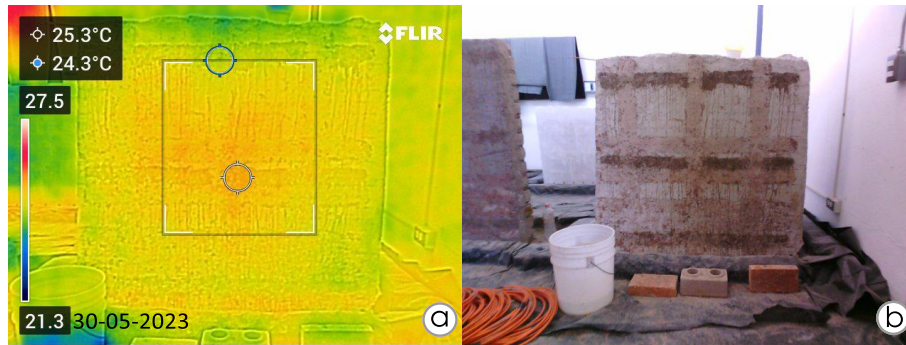


Figura 138: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 138, muestra las mediciones tomadas durante el día 30 de mayo del 2023. El periodo seleccionado corresponde a 6 días después del inicio de la campaña. Se observa temperaturas en el rango de 24.3 °C a 25.3 °C.

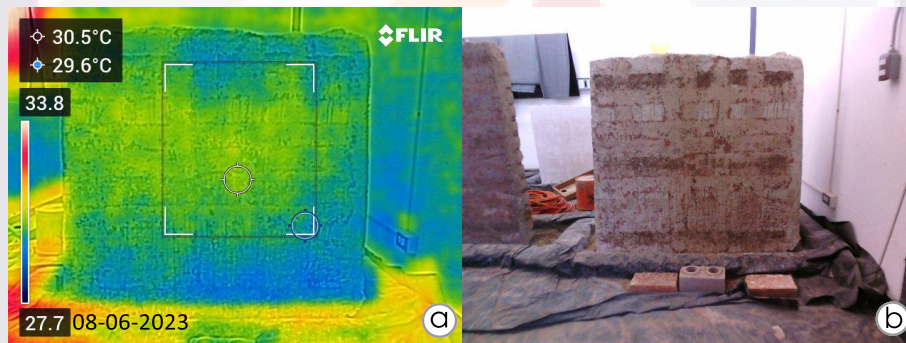


Figura 139: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 139, muestra las mediciones tomadas durante el día 08 de junio del 2023. El periodo seleccionado corresponde a 9 días después de la anterior medición. Se observan temperaturas en el rango de 29.6 °C a 30.5 °C.

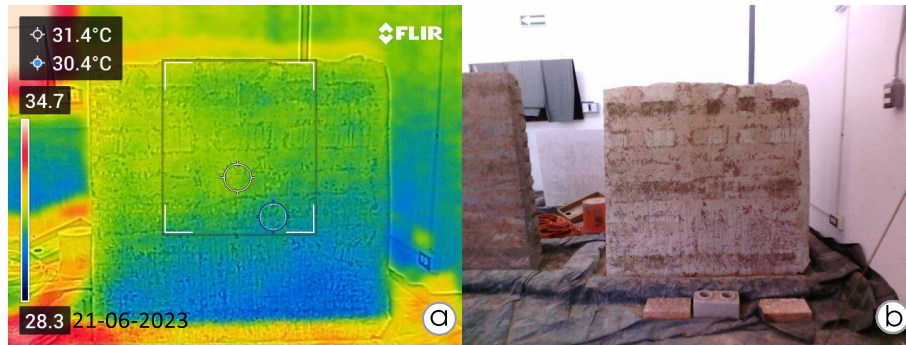


Figura 140: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad accidental en muro mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 140, muestra las mediciones tomadas durante el día 21 de junio del 2023. El periodo seleccionado corresponde al término de monitoreo de la humedad. Se observa temperaturas en el rango de 30.4 °C a 31.4 °C.

6.3.3.2. HIGRÓMETRO

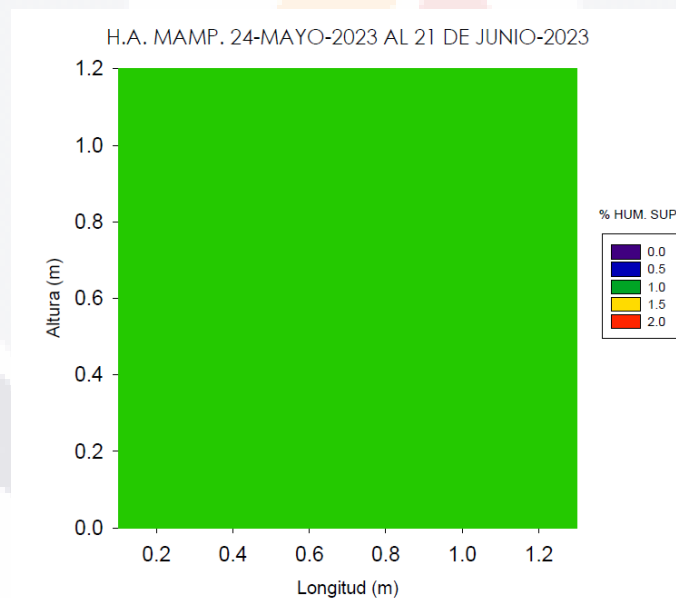


Figura 141: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad accidental en muro mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Sigmaplot. Imagen del autor.

La figura 141 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 21 de junio de 2023. Las humedades en el muro de mampostería de piedra, se ve representado de un solo color con el 1% de humedad superficial debido que no existe frente húmedo superficial en el periodo estudiado.

6.4. HUMEDAD POR FILTRACIÓN
 6.4.1. MURO DE ADOBE CON RECUBRIMIENTO
 6.4.1.1. TERMOGRAFÍA INFRARROJA

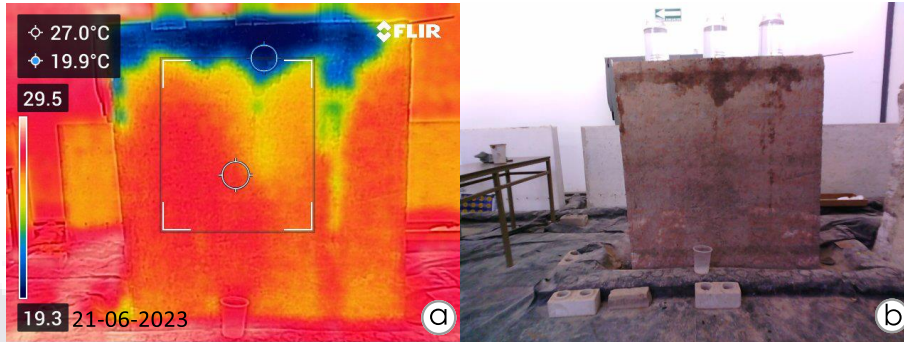


Figura 142: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 142, muestra las mediciones tomadas durante el día 21 de junio del 2023. El periodo seleccionado corresponde al día de comienzo de la prueba. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.90 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 19.9 °C a 27.0 °C.

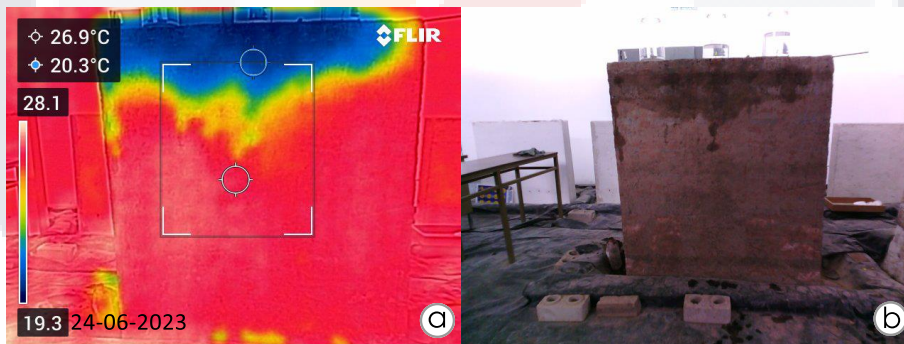


Figura 143: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 143, muestra las mediciones tomadas durante el día 24 de junio del 2023. El periodo seleccionado corresponde a dos días después del comienzo de la prueba. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.70 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 20.3 °C a 26.9 °C.

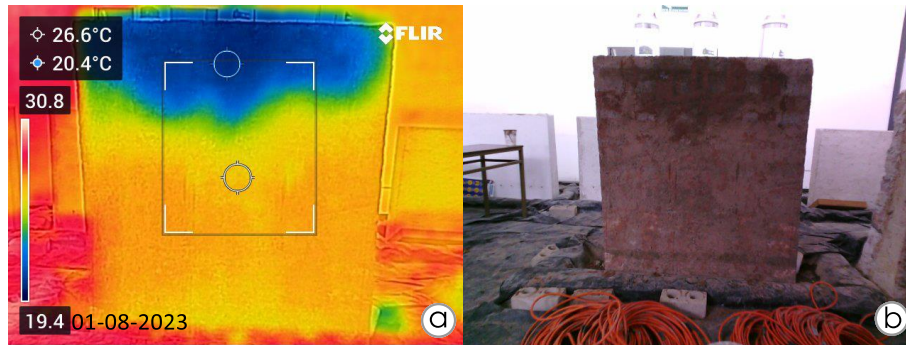


Figura 144: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 144, muestra las mediciones tomadas durante el día 01 de agosto del 2023. El periodo seleccionado corresponde cuando se retoma la prueba. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.70 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 20.4 °C a 26.6 °C.

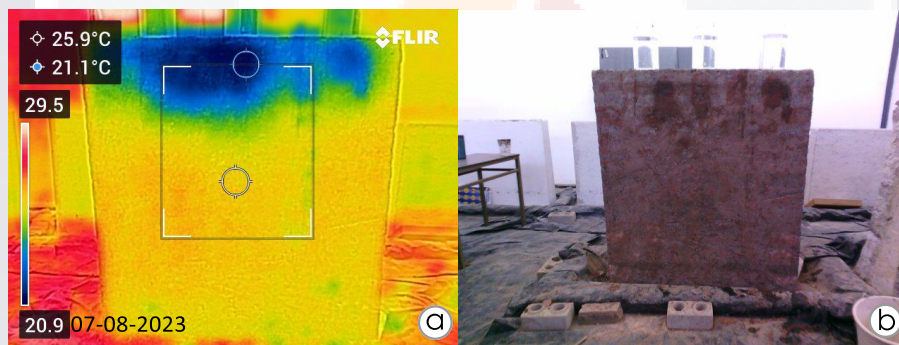


Figura 145: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 145, muestra las mediciones tomadas durante el día 07 de agosto del 2023. El periodo seleccionado corresponde ocho días después de retomar la campaña. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.90 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 21.1 °C a 25.9 °C.

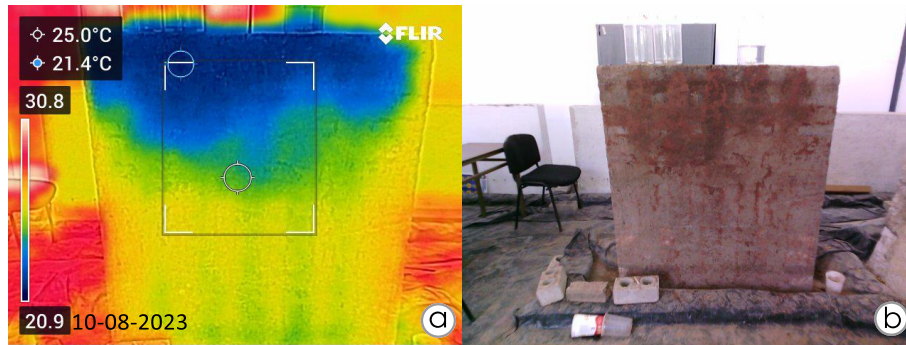


Figura 146: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro adobe con recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 146, muestra las mediciones tomadas durante el día 10 de agosto del 2023. El periodo seleccionado corresponde la finalización de la prueba. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.60 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 21.4 °C a 25.0 °C.

6.4.1.2. HIGRÓMETRO

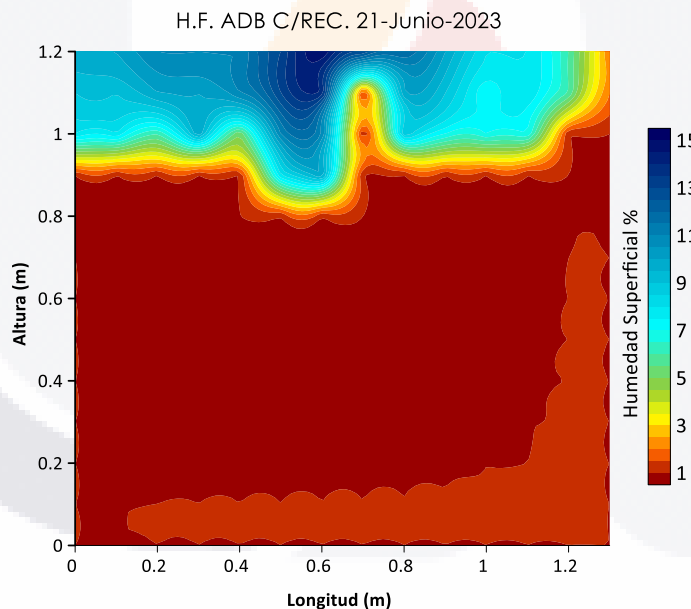


Figura 147: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 147 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 21 de junio de 2023. Las humedades en el muro de adobe con recubrimiento debido a la propagación de la humedad por filtración, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 15% en la parte superior del muro concentrándose de forma variable de entre 0.1 y 1 m de longitud y desde 0.95 a 1.2 m de altura.

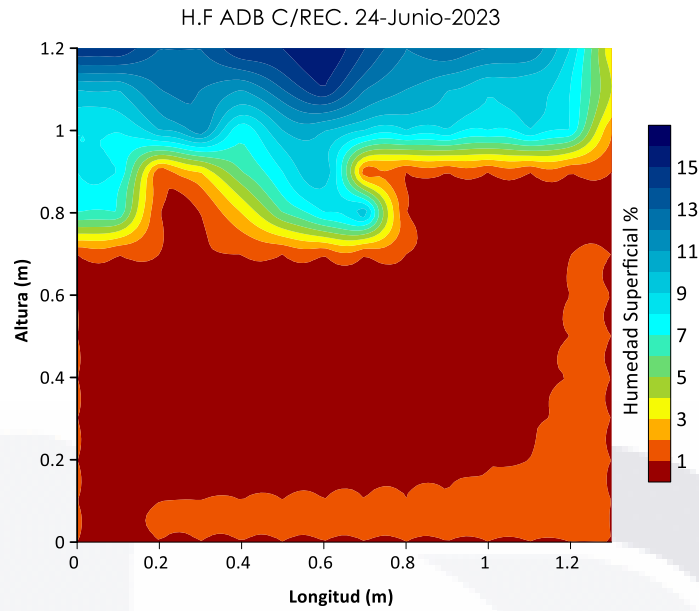


Figura 148: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 148 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 24 de junio de 2023. Las humedades en el muro de adobe con recubrimiento debido a la propagación de la humedad por filtración, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 16% concentrándose de forma variable entre 0.95 a 1.2 m de altura. De 0.75 a 0.95 se presenta una distribución variable de humedad entre 0.1 y 0.75 m de longitud.

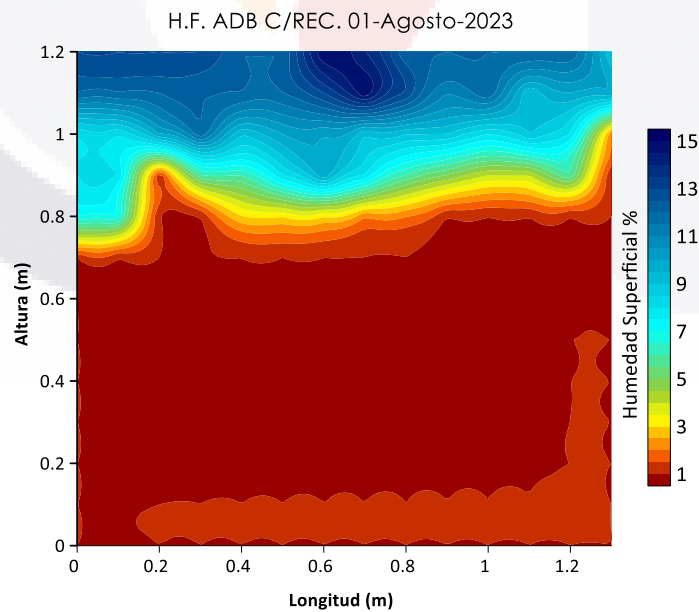


Figura 149: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 149 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 01 de agosto de 2023. Las humedades en el muro de adobe con recubrimiento debido a la propagación de la humedad por filtración, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 15% concentrándose de forma variable desde 0.85 a 1.2 m de altura.

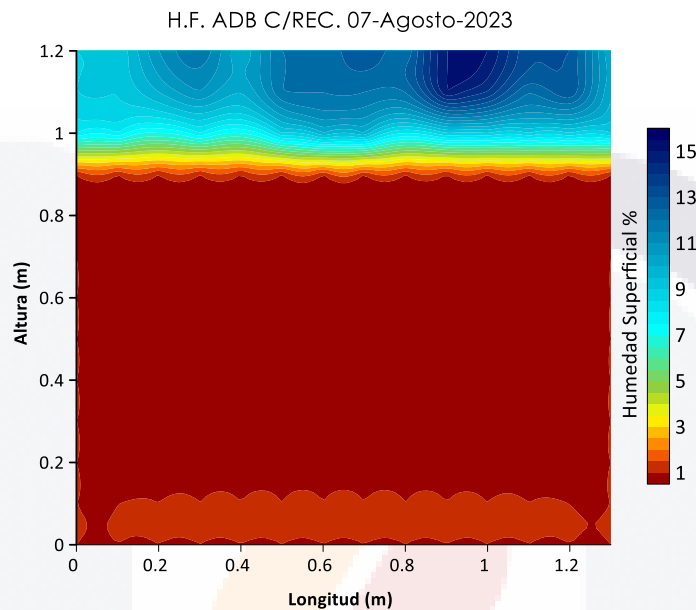


Figura 150: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 150 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 07 de agosto de 2023. Las humedades en el muro de adobe con recubrimiento debido a la propagación de la humedad por filtración, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 15% concentrándose de manera uniforme desde 1 a 1.2 m de altura.

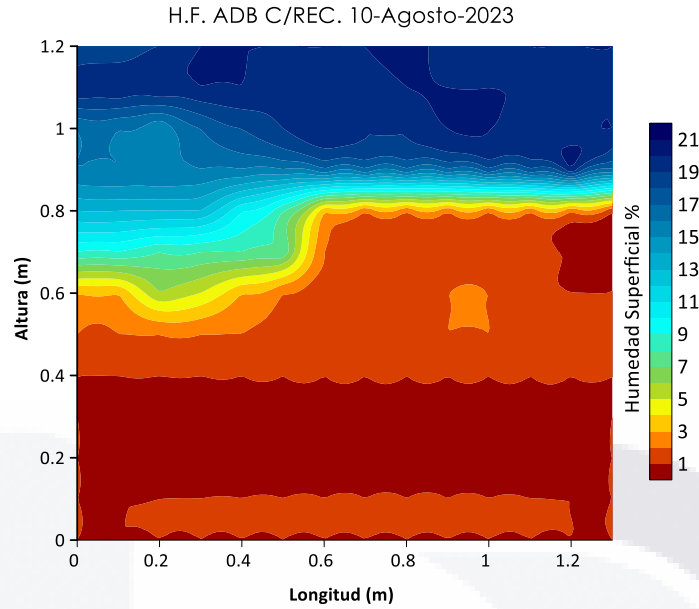


Figura 151: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro adobe con recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 151 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 10 de agosto de 2023. Las humedades en el muro de adobe con recubrimiento debido a la propagación de la humedad por filtración, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 21% concentrándose de manera uniforme desde 0.85 a 1.2 m de altura. De 0.70 a 0.95 m se distribuye de forma variable de 0.1 a 0.55 m de longitud.

6.4.2. MURO DE ADOBE SIN RECUBRIMIENTO

6.4.2.1. TERMOGRAFÍA INFRARROJA

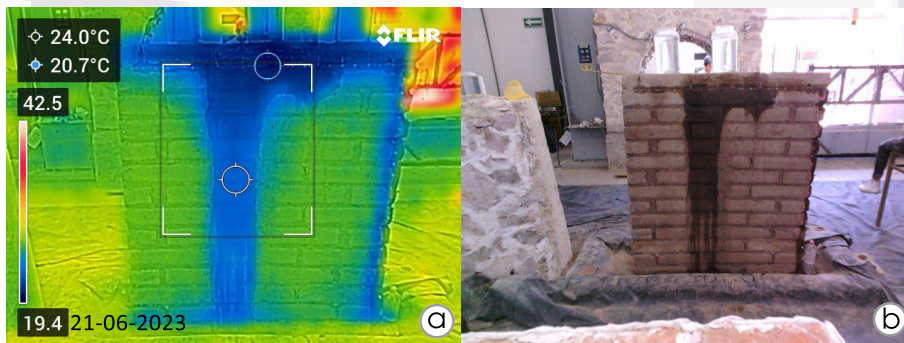


Figura 152: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 152, muestra las mediciones tomadas durante el día 21 de junio del 2023. El periodo seleccionado corresponde al día de comienzo de la prueba. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 1.0 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 20.7 °C a 24.0 °C.

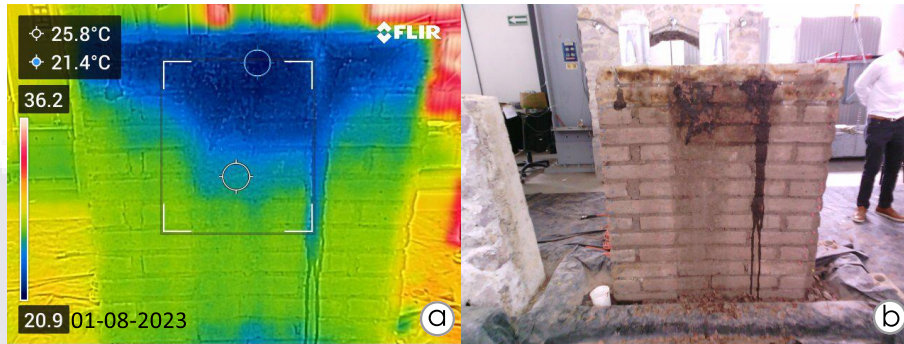


Figura 153: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 153, muestra las mediciones tomadas durante el día 01 de agosto del 2023. El periodo seleccionado corresponde cuando se retoma la prueba. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.95 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 21.4 °C a 25.8 °C.

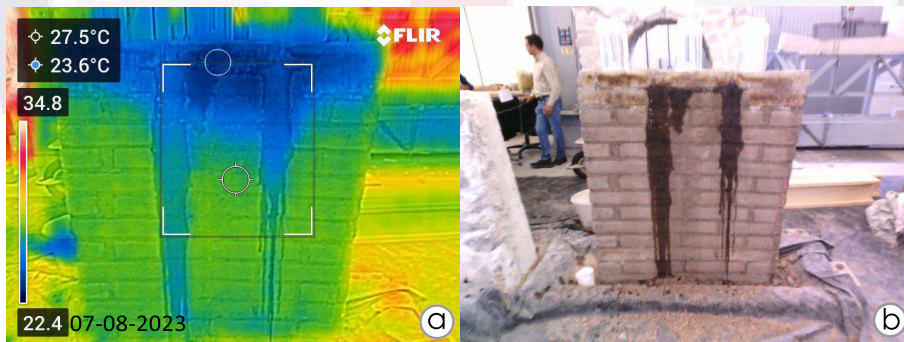


Figura 154: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 154, muestra las mediciones tomadas durante el día 07 de agosto del 2023. El periodo seleccionado corresponde ocho días después de retomar la campaña. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.95 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 23.6 °C a 27.5 °C.

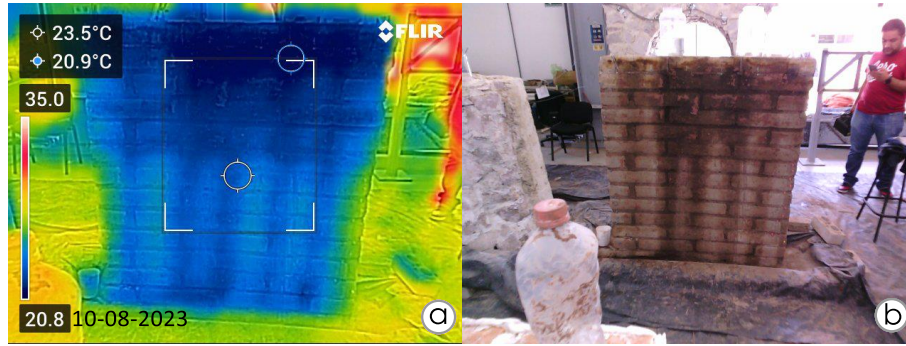


Figura 155: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro adobe sin recubrimiento. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 155, muestra las mediciones tomadas durante el día 10 de agosto del 2023. El periodo seleccionado corresponde la finalización de la prueba. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.70 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 20.9 °C a 23.5 °C.

6.4.2.2. HIGRÓMETRO

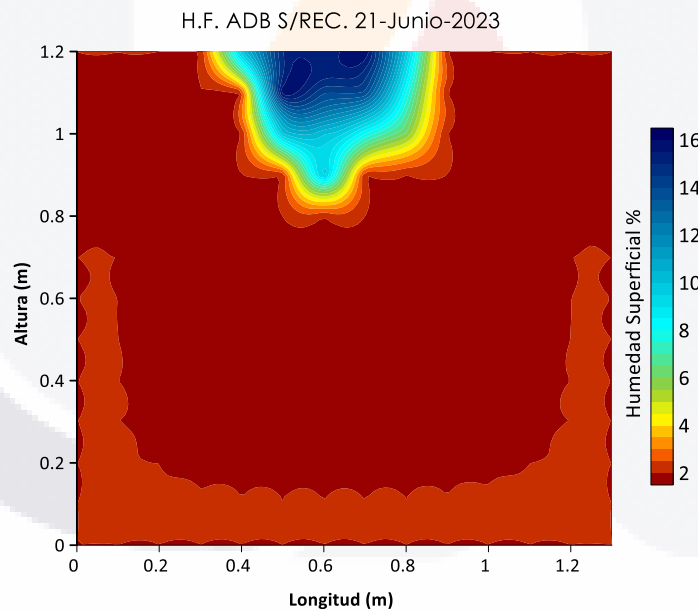


Figura 156: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 156 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 21 de junio de 2023. Las humedades en el muro de adobe sin recubrimiento debido a la propagación de la humedad por filtración, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 16% concentrándose de forma radial en la parte superior central entre 0.4 y 0.85 m de longitud a partir de 1.0 m hasta 1.20 m.

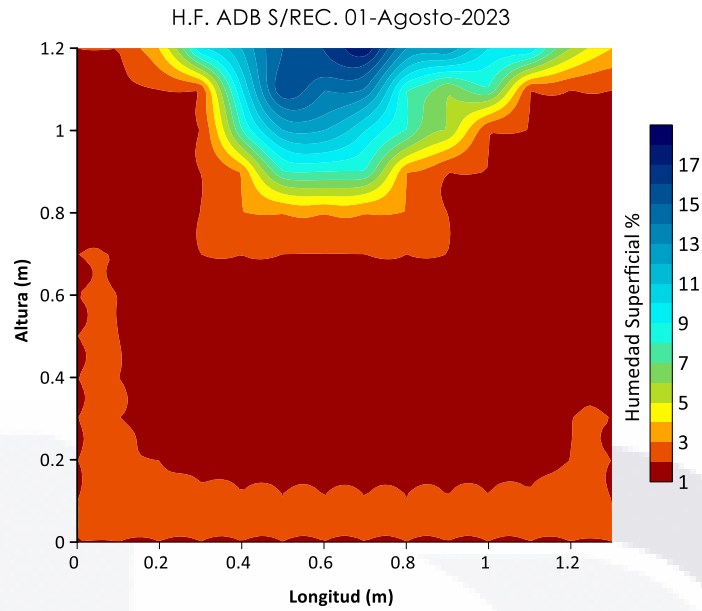


Figura 157: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 157 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 01 de agosto de 2023. Las humedades en el muro de adobe sin recubrimiento debido a la propagación de la humedad por filtración, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 18% concentrándose de forma radial en la parte superior central entre 0.3 y 0.7 m de longitud a partir de 0.9 m hasta 1.20 m.

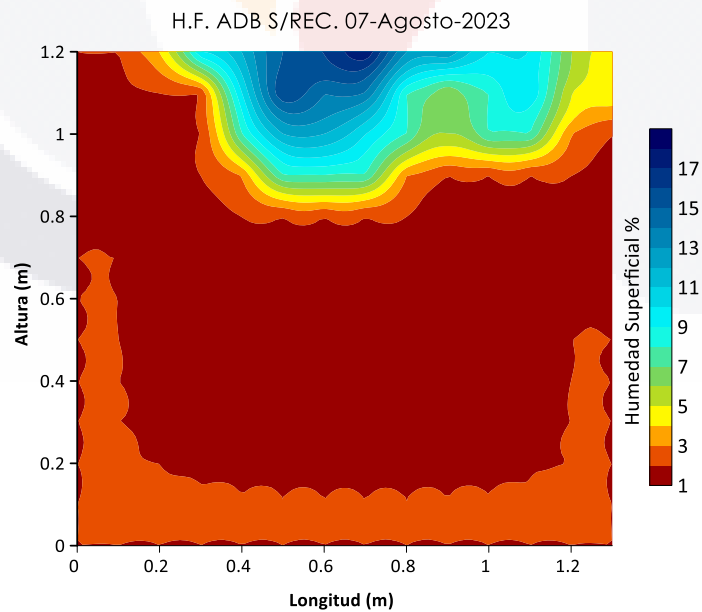


Figura 158: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 158 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 07 de agosto de 2023. Las humedades en el muro de adobe sin recubrimiento representados por la propagación de la humedad por filtración, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 18% propagándose de forma variable en la zona central del muro a partir de 0.9 m de altura.

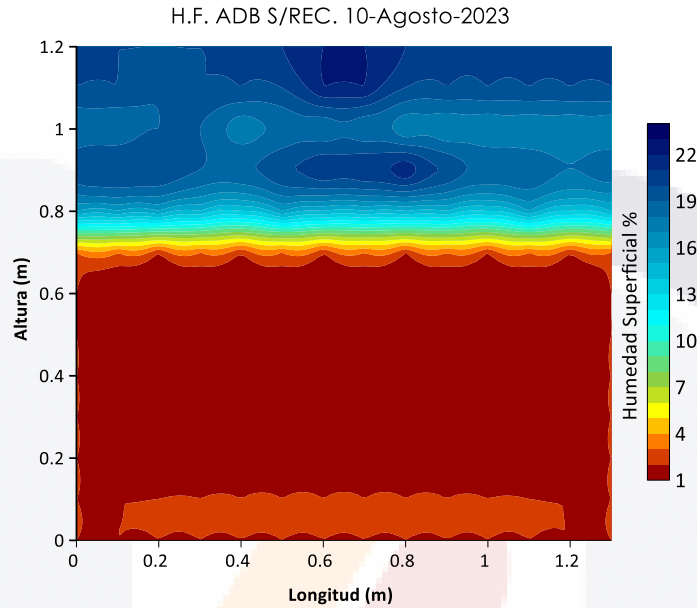


Figura 159: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro adobe sin recubrimiento. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 159 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 10 de agosto de 2023. Las humedades en el muro de adobe sin recubrimiento debido a la propagación de la humedad por filtración, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 22% concentrándose en la parte superior del muro a una altura desde 0.75 a 1.2 m.

6.4.3. MURO DE MAMPOSTERÍA DE PIEDRA

6.4.3.1. TERMOGRAFÍA INFRARROJA

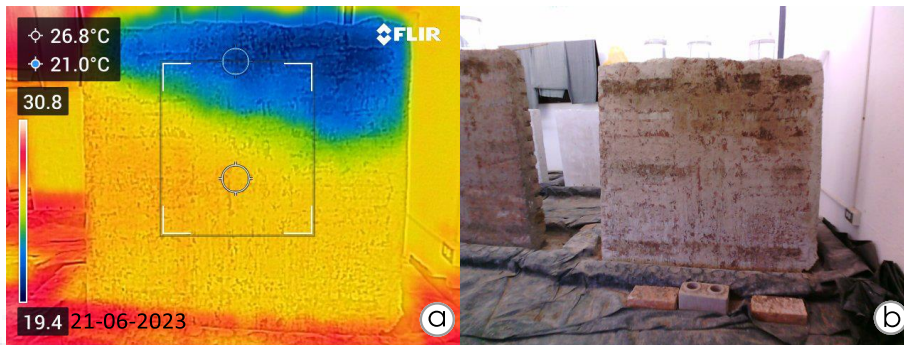


Figura 160: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 160, muestra las mediciones tomadas durante el día 21 de junio del 2023. El periodo seleccionado corresponde al día de comienzo de la prueba. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.85 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 21.0 °C a 26.8 °C.

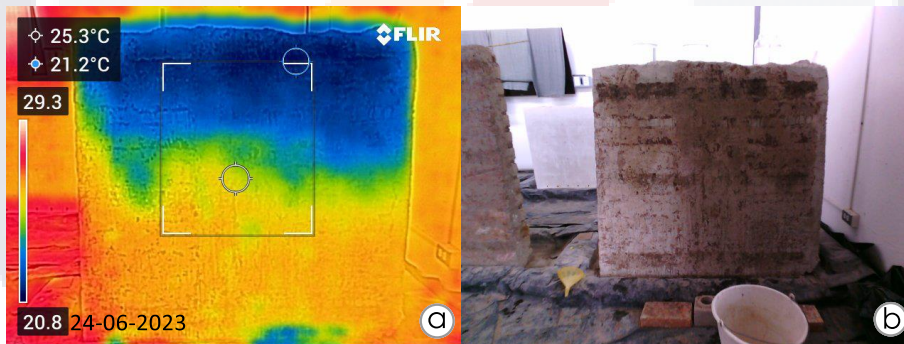


Figura 161: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 161, muestra las mediciones tomadas durante el día 24 de junio del 2023. El periodo seleccionado corresponde a dos días después del comienzo de la prueba. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.70 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 21.2 °C a 25.3 °C.

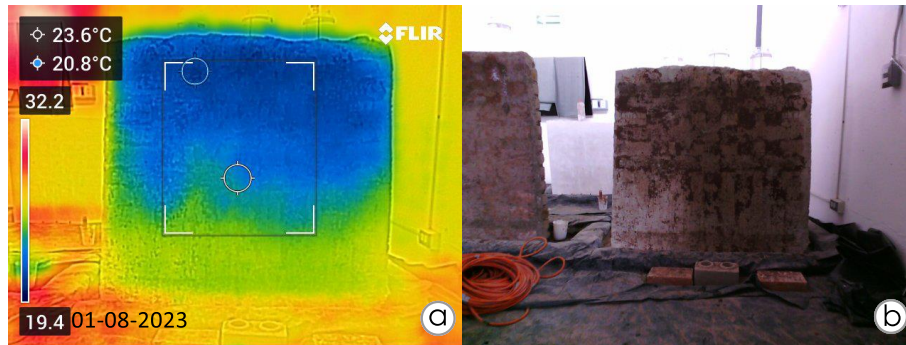


Figura 162: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 162, muestra las mediciones tomadas durante el día 01 de agosto del 2023. El periodo seleccionado corresponde cuando se retoma la prueba. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.50 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 20.8 °C a 23.6 °C.

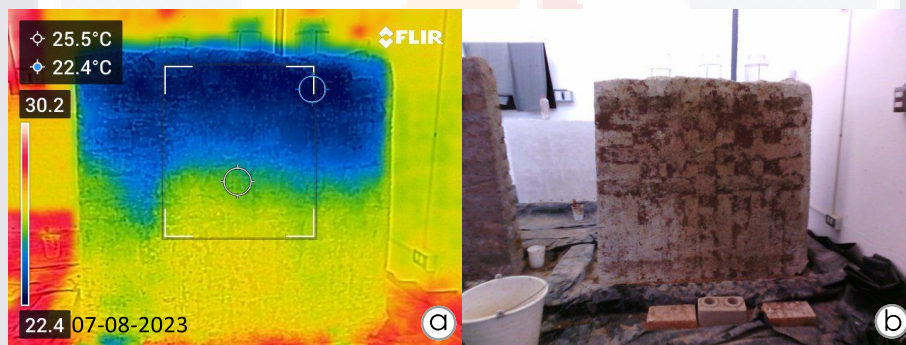


Figura 163: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 163, muestra las mediciones tomadas durante el día 07 de agosto del 2023. El periodo seleccionado corresponde ocho días después de retomar la campaña. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.60 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 22.4 °C a 25.5 °C.

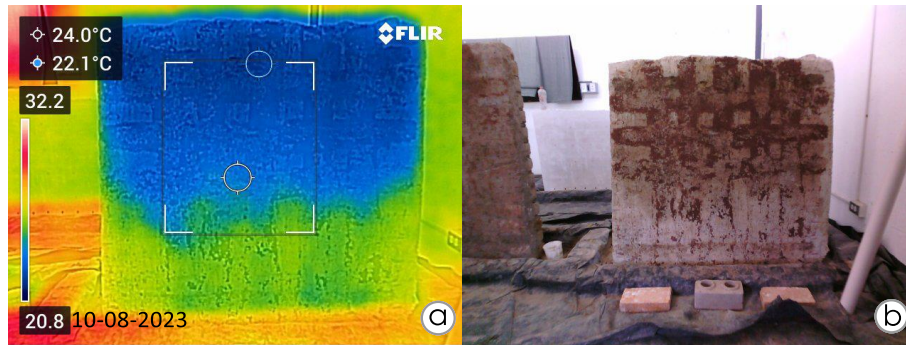


Figura 164: Imágenes de termografía infrarroja. Humedad por filtración en muro mampostería de piedra. Procesamiento en software Flir Tools. Imagen del autor.

La figura 164, muestra las mediciones tomadas durante el día 10 de agosto del 2023. El periodo seleccionado corresponde la finalización de la prueba. Se observa la altura del frente húmedo ubicada a 0.50 m con respecto al nivel de piso terminado, además se registran temperaturas en el rango de 22.1 °C a 24.0 °C.

6.4.3.2. HIGRÓMETRO

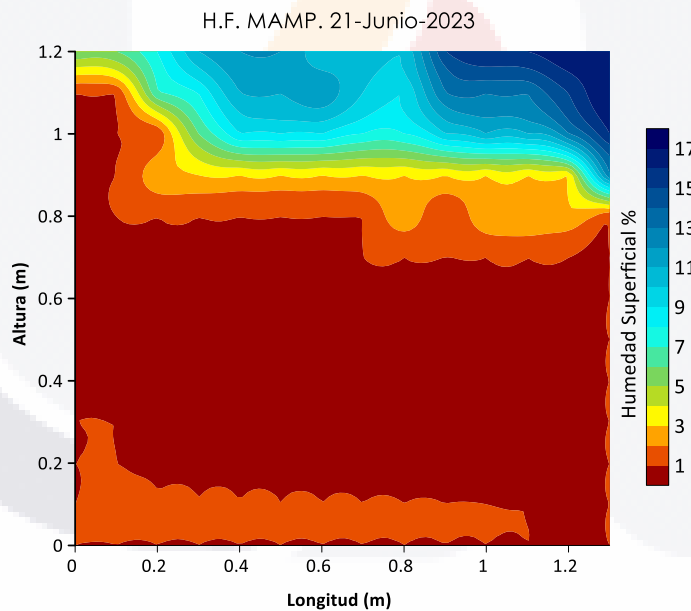


Figura 165: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro de mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 165 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 21 de agosto de 2023. Las humedades en el muro de mampostería de piedra debido a la propagación de la humedad por filtración, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 17% concentrándose en la parte superior derecha del muro entre 0.90 m y 1.20 m de altura.

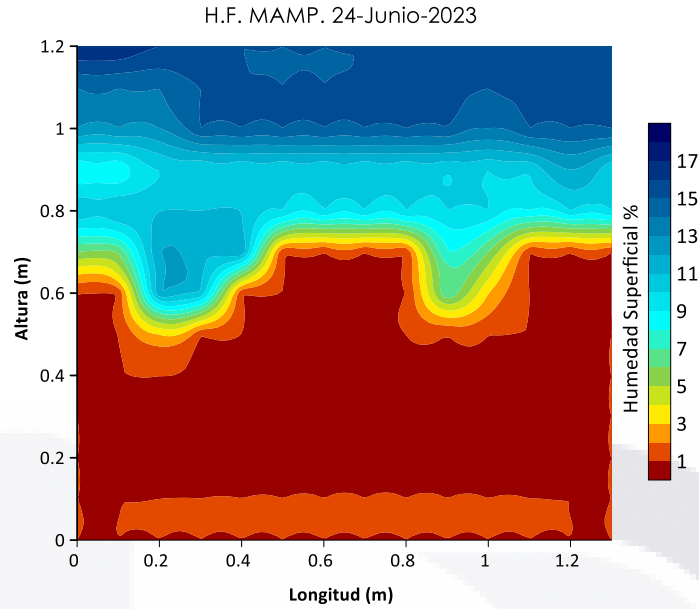


Figura 166: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro de mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 166 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 24 de junio de 2023. Las humedades en el muro de mampostería de piedra debido a la propagación de la humedad por filtración, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 21% distribuyéndose uniformemente entre 0.9 y 1.2 m de altura. Por debajo de 0.9 a 0.6 m de altura la distribución es variable.

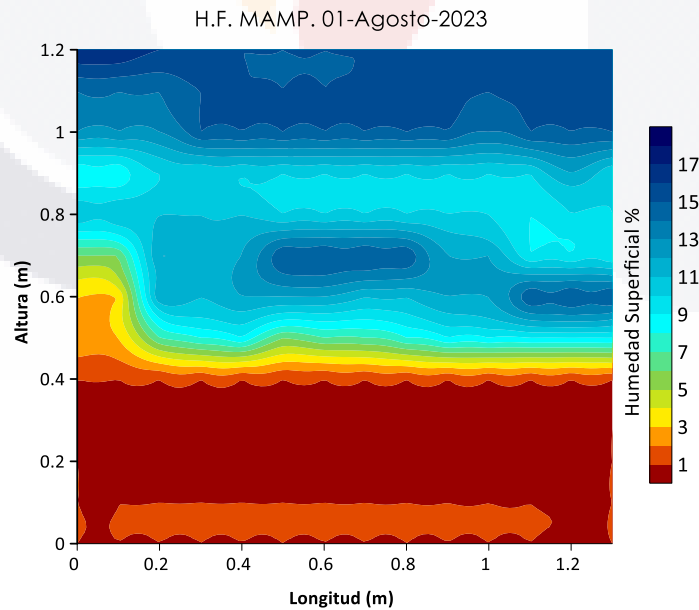


Figura 167: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro de mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 167 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 01 de agosto de 2023. Las humedades en el muro de mampostería de piedra debido a la propagación de la humedad por filtración, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 17% concentrándose uniformemente entre 0.9 y 1.2 m de altura. Por debajo de 0.9 m hasta 0.5 m de altura disminuye la humedad superficial y la distribución es variable.

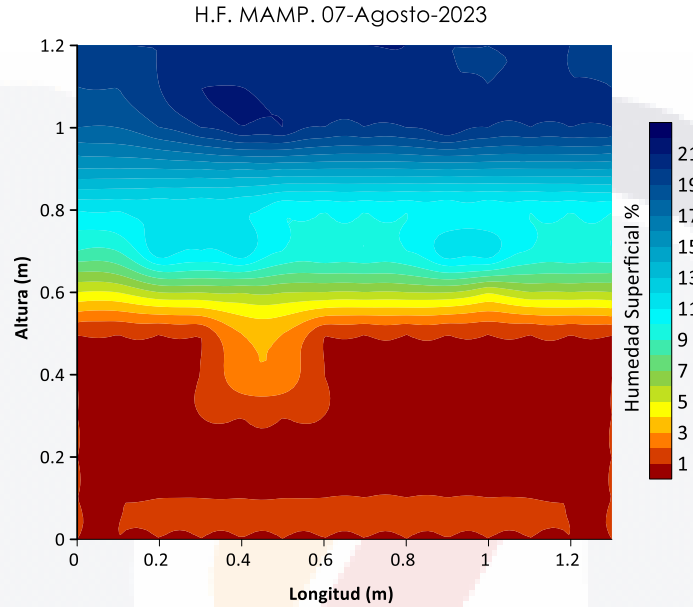


Figura 168: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro de mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 168 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 07 de agosto de 2023. Las humedades en el muro de mampostería de piedra debido a la propagación de la humedad por filtración, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 21% concentrándose uniformemente entre 0.9 y 1.2 m de altura. Por debajo de 0.9 m hasta 0.6 m de altura disminuye la humedad superficial.

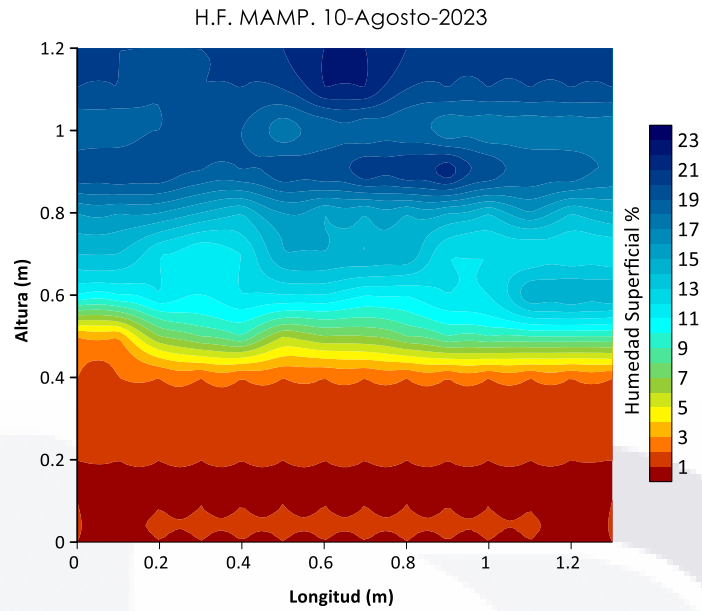


Figura 169: Datos de higrómetro representando la humedad superficial. Humedad por filtración en muro de mampostería de piedra. Mapa de contornos elaborado en Surfer 16. Imagen del autor.

La figura 169 corresponde a las mediciones de humedad superficial obtenidas el 10 de agosto de 2023. Las humedades en el muro de mampostería de piedra debido a la propagación de la humedad por filtración, presenta porcentajes de humedad superficial de hasta 22% concentrándose uniformemente entre 0.8 y 1.2 m de altura. Por debajo de 0.8 m hasta 0.55 m de altura disminuye la humedad superficial.



CAPÍTULO VII
DISCUSIÓN

CAPITULO VII DISCUSIÓN

7. DISCUSIÓN

7.1. CALIBRACIÓN EN MURO DE ADOBE

En el muro de adobe con recubrimiento (Figura 65), de acuerdo con los datos obtenidos con la técnica de termografía Infrarroja, no existe humedad superficial 45 días después de la etapa de construcción. En cambio, la información dada por el higrómetro (Tabla 7), muestra un porcentaje mínimo del 1% constante, relacionado con la humedad del recubrimiento. Sin embargo, en el muro en su cara sin recubrimiento, la imagen térmica (Figura 66), no presenta humedad superficial visible, mientras que, los datos arrojados por el higrómetro (Tabla 8, Figura 66), indican valores de humedad superficial en el rango de 2 al 3% dependiendo de la ubicación de la medición (en bloque de adobe o en la junta) así mismo, se infiere que los porcentajes obtenidos son atribuidos al material.

Los datos obtenidos del modelo eléctrico (Figura 170b) se relacionan con la humedad superficial que aún existe en el muro, obteniendo valores de resistividad de 200-250 Ohm-m (color cian-verde) a una profundidad de hasta 0.05 m aproximadamente. Mientras que, a una profundidad de 0.06 m, se encuentran valores de 40,000-100,000 Ohm-m (color naranja-rojo) los cuales se asocian a un material seco (Figura 170c).

7.2. CALIBRACIÓN EN MURO DE MAMPOSTERÍA DE PIEDRA

Dentro del análisis superficial que se llevó a cabo en el muro de mampostería de piedra, los resultados térmicos (Figura 67) no muestran humedad alguna, del mismo modo, los datos obtenidos por el higrómetro (Tabla 9) muestran una humedad dada por el recubrimiento del 1% constante.

Sin embargo, en el análisis del modelo 3D de tomografía eléctrica (Figura 171b) muestra que pasando la humedad (color azul marino) a 0.05 m generada por los electrodos, se encuentran valores de resistividad de 600-100,00 Ohm-m (Color amarillo-naranja-rojo) lo cual, indica que el muro se encuentra en estado seco a una profundidad de 0.12-0.22 m generando anomalías resistivas en amarillo y rojo (Figura 171c).

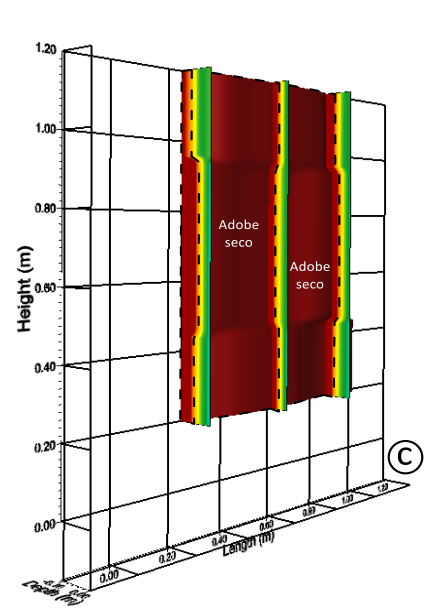
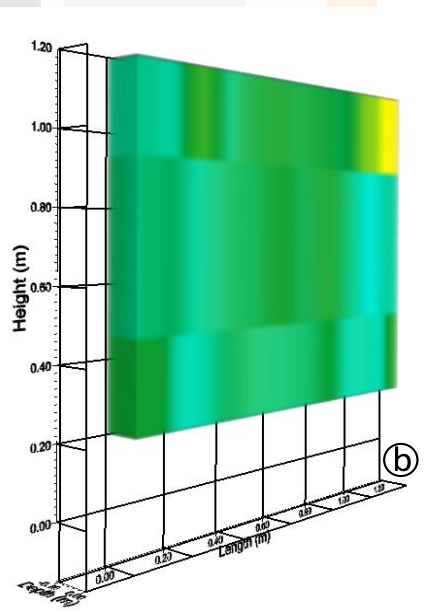
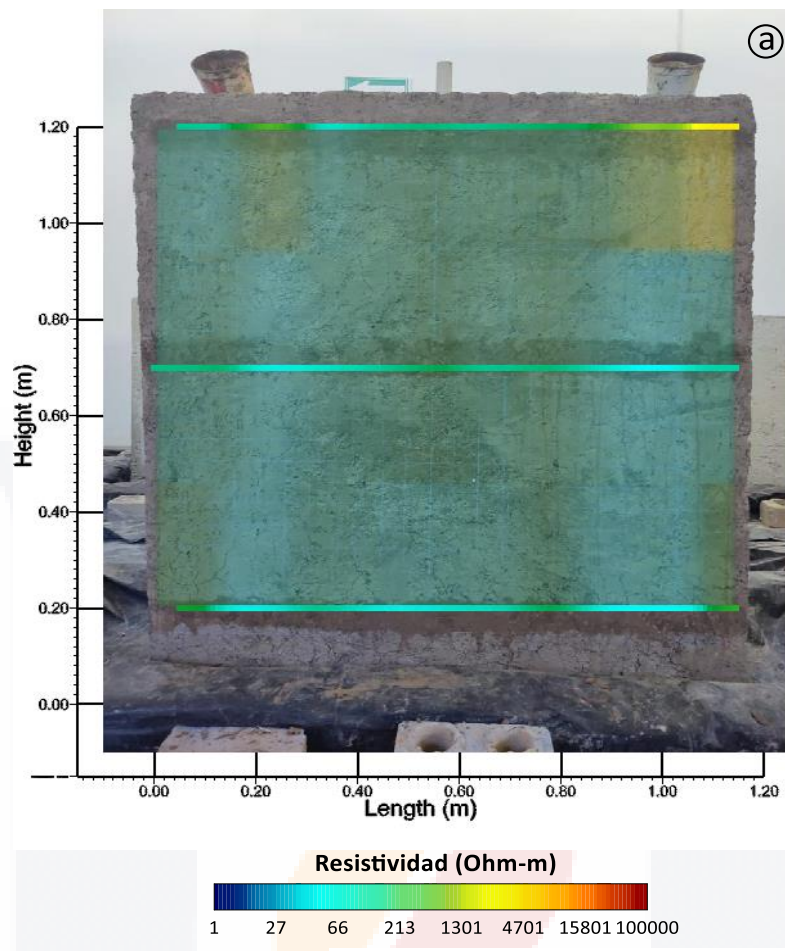


Figura 170: Modelo 3D de Tomografía de Resistividad Eléctrica del muro de adobe. Modelo de calibración. Procesamiento en Voxler. Imagen del autor.

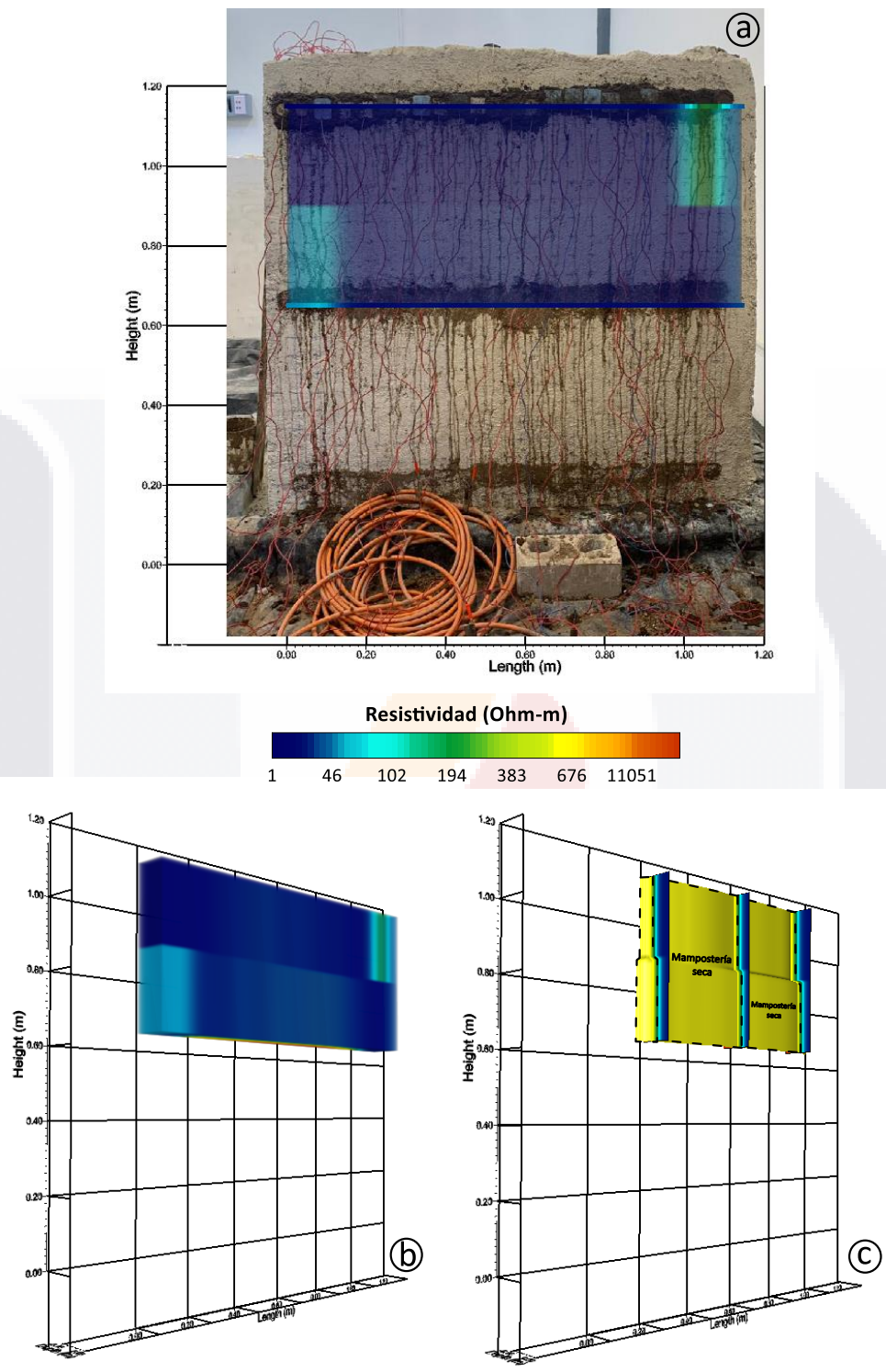


Figura 171: Modelo 3D de tomografía de resistividad eléctrica en muro de mampostería de piedra. Modelo de calibración. Procesamiento en Voxler. Imagen del autor.

7.3. HUMEDAD POR CAPILARIDAD EN MURO DE ADOBE

La humedad por capilaridad presenta un comportamiento que depende de las características y el tipo de material a evaluar. El análisis del muro de adobe con recubrimiento se inicia con la relación de técnicas superficiales: termografía e higrómetro (figura 71), en las cuales se tiene una presencia de humedad visible (representada por el color azul) indicando el cambio de temperatura en el muro. Así mismo, se observa que la velocidad de absorción del muro es de 0.20 m al segundo día, aunque existen variaciones, debido a que en algunas áreas de la imagen se tiene registro de 0.16 m de altura. Por otro lado, si esta misma medición se analiza con su modelo en higrómetro (Figura 78), se afirma que, el frente húmedo es de 0.20 m aproximadamente. Sin embargo, el mayor porcentaje de humedad se encuentra de 0-0.15 m de altura.

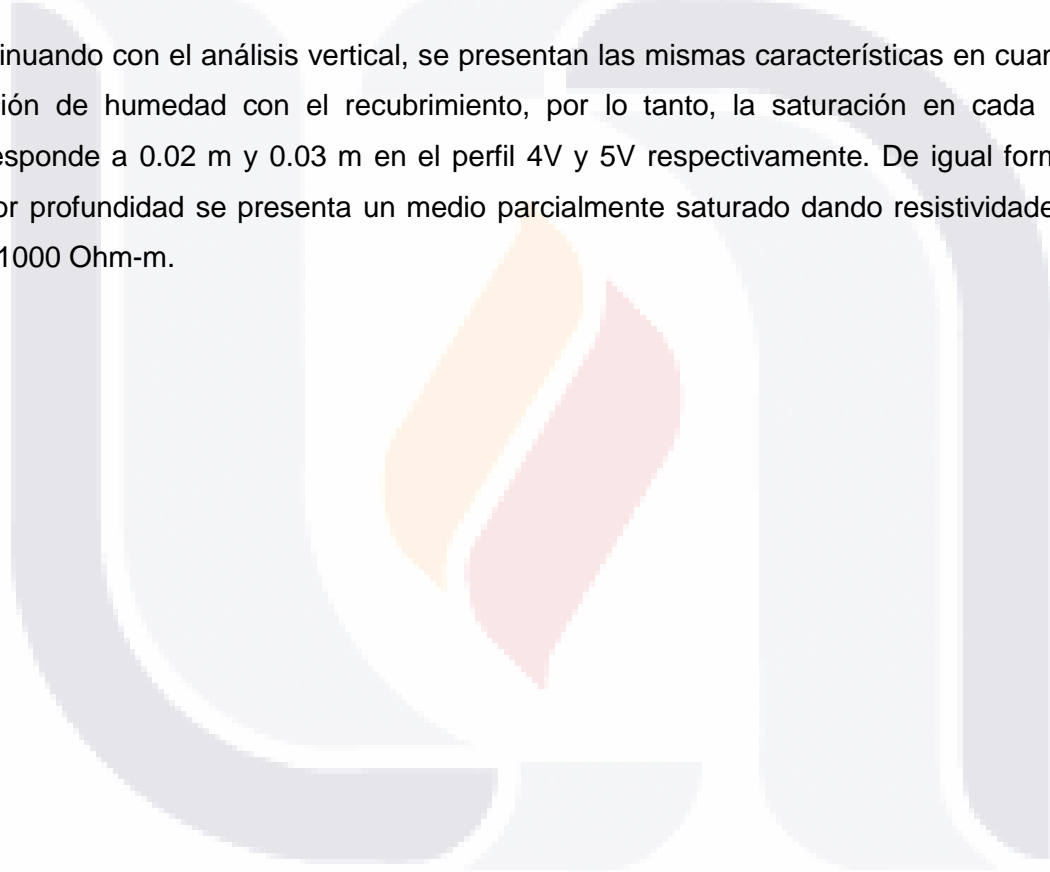
En la Figura 73, se observa que mientras transcurren los días, la humedad asciende y su espectro termográfico aumenta, dada la velocidad de absorción variable de 0.34 m en su lado izquierdo y 0.30 m del lado derecho (0.048 m de absorción por día). Teniendo en consideración la gráfica del higrómetro (Figura 80) en donde se tiene registro de humedad superficial hasta los 0.24 m, al relacionar ambas técnicas (higrómetro y termografía) se observa una diferencia en la humedad superficial de 0.1 m con respecto a los resultados de IT con 0.34 m de altura de la humedad superficial.

Habiendo transcurrido casi 15 días, en los resultados de IT (Figura 75) se muestra el comportamiento de la humedad con velocidad de absorción de entre 0.35-0.40 m (equivalente a 0.06 m de absorción por día). Si bien, el espectro térmico muestra que existen dos diferentes transiciones (tonos de azul), en la Figura 82, se confirma que el mayor porcentaje de humedad superficial se ve concentrado de 0-0.20 m de altura, mientras que en los 0.20 m de altura restantes la propagación es variable con una disminución en el contenido de humedad.

En la última medición de IT (figura 70) se muestra una propagación significativa en el ascenso de humedad, teniendo en cuenta velocidad de absorción máxima de hasta 0.50 m en el centro del muro. Sin embargo, los resultados del higrómetro del día 7 de febrero (Figura 84), revelan que, el ascenso en los extremos se ve afectado llegando a una altura de 0.30-0.39 m respectivamente. Además, se observa el mayor porcentaje de humedad superficial entre 0.15-0.30 m de altura a lo largo del muro.

Si bien, las técnicas superficiales ayudan a reconocer las zonas de humedad superficial, en el caso de la técnica ERT permite analizar el comportamiento interno del muro. En la Figura 85, en los perfiles horizontales eléctricos se observa una humedad superficial de 0.02 m de profundidad la cual es asociada con la humedad que se genera a lo largo del muro sobre la línea de electrodos para reducir la resistencia de contacto. Por lo tanto, la saturación generada por el fenómeno capilar en el segundo y tercer perfil es de 0.03 m y 0.05 m de profundidad respectivamente, lo que nos indica un medio saturado (color azul) con bajas resistividades de 1-30 Ohm-m. Sin embargo, a mayor profundidad se encuentra un medio parcialmente saturado dejando resistividades de 100-1000 Ohm-m (color cian-verde olivo).

Continuando con el análisis vertical, se presentan las mismas características en cuanto la relación de humedad con el recubrimiento, por lo tanto, la saturación en cada perfil corresponde a 0.02 m y 0.03 m en el perfil 4V y 5V respectivamente. De igual forma, a mayor profundidad se presenta un medio parcialmente saturado dando resistividades de 100-1000 Ohm-m.



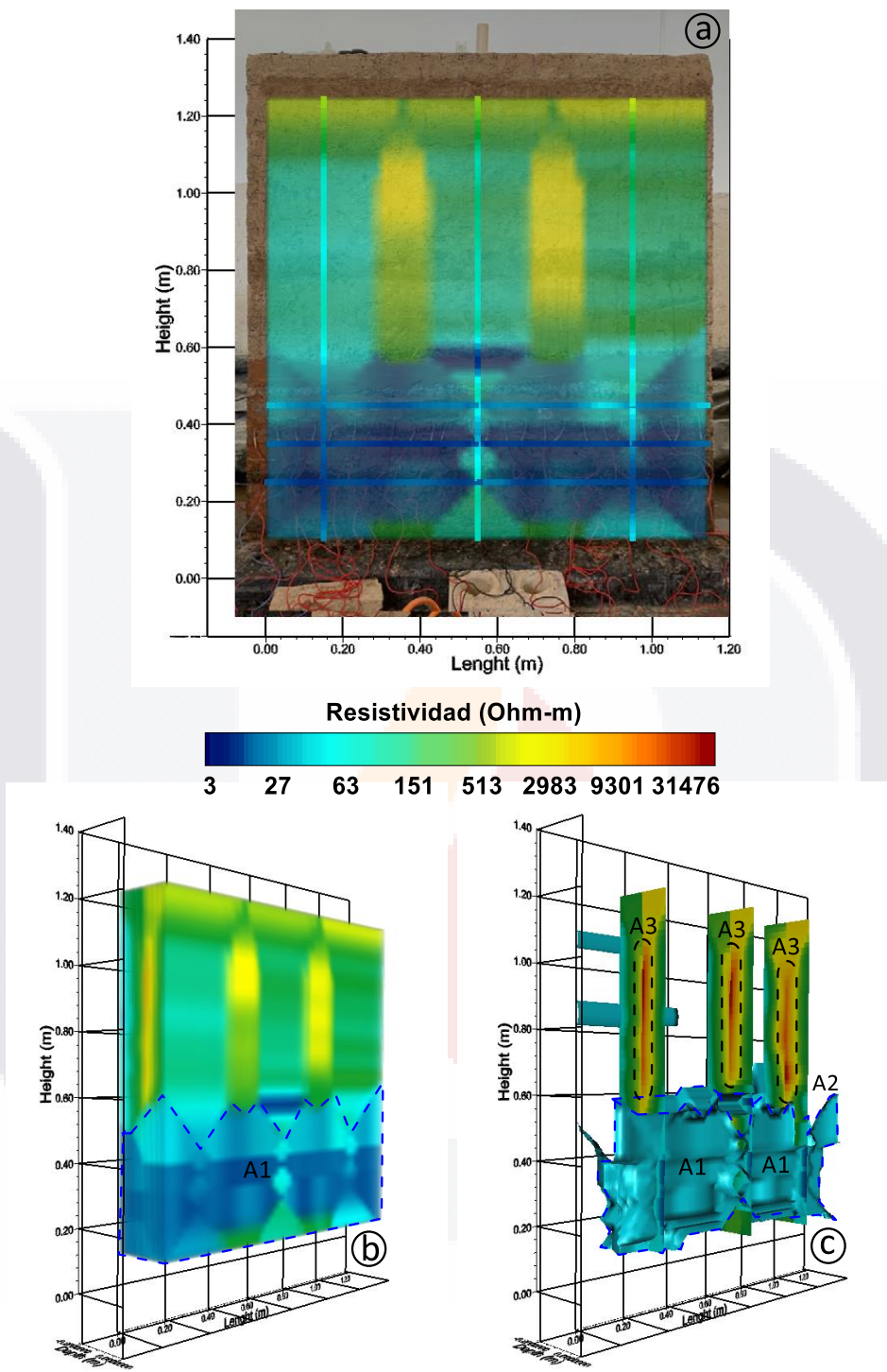


Figura 172: Modelo 3D de tomografía de resistividad eléctrica en el muro de adobe. Modelo de humedad por capilaridad. Procesamiento en Voxler. Imagen del autor.

Por otra parte, para tener una evaluación completa del fenómeno capilar, es necesario analizar el muro de adobe sin recubrimiento iniciando con las técnicas superficiales. En la Figura 86, se observa el espectro térmico con humedad superficial, su comportamiento resalta debido a las pequeñas *campanas de Gauss* que se forman. Esto se debe a que el agua busca ascender de forma fácil, es decir, que al toparse con el adobe (bloque) un material que tiene consolidación, porosidad y cuenta con dimensiones establecidas, tiene mayor dificultad al saturarlo, en cambio, si la humedad se propaga por la junta el cual es un material a base de arcillas, material orgánico, pero no consolidado, en el cual es menor la dificultad que tiene al ascender hasta el siguiente obstáculo (siguiente hilada) (figura 173). Debido a este comportamiento la velocidad de absorción varía de 0.10-0.16 m respectivamente. Por otra parte, los datos del higrómetro, no son preciso puesto que solo se visualiza la humedad a una altura de 0.10 m (Figura 93).

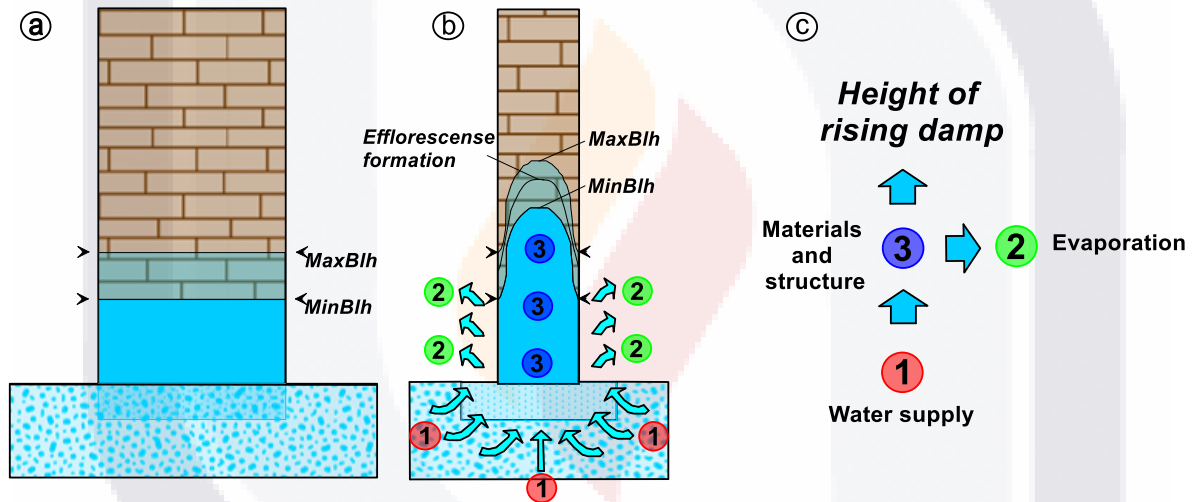


Figura 173: a) Diagrama esquemático de un muro de mampostería que muestra el equilibrio entre el ascenso por capilaridad y la evaporación. b) Esquema de los tres factores que determinan la altura de la humedad ascendente. Combinación de diagramas de Franzoni y Giaccone (Franzoni, 2014; Franzoni, 2018; Giaccone et al., 2020).

Franzoni y Giaccone describen que el fenómeno capilar en la prueba de estudio presenta un comportamiento lineal en su frente húmedo superficial (figura 173a), mientras que, al interior del muro se observan *Campanas de Gauss* representando el nivel de ascenso capilar, la evaporación y el nivel de presencia de eflorescencias (figura 173b). Sin embargo, el muro de adobe y mampostería de piedra presenta un comportamiento distinto puesto que, la humedad superficial tiende a formar *Campanas de Gauss* mientras que, al interior

del muro presenta una saturación lineal (figura 172c) (Franzoni, 2014, 2018; Giaccone et al., 2020).

Por otro lado, se considera que, si el tiempo de exposición al fenómeno capilar es mayor, las condiciones interiores y superficiales presentarán un comportamiento similar al antes establecido.

En la Figura 88, medición realizada 7 días después, se observa que la propagación de humedad continúa con la misma tendencia. Aunque en este punto, la velocidad de absorción fue de 0.20-0.25 m (0.035 m por día) dependiendo de las *campanas de Gauss* formadas. Mientras que en la Figura 95, de acuerdo al higrómetro, la humedad ascendió hasta 0.30 m, observando la mayor concentración de humedad a 0.20 m de altura a lo largo del muro.

En un periodo de casi 15 días de haber iniciado, en la Figura 90, se muestra el espectro térmico sin tanta variación en el frente húmedo, mismo que presenta una humedad constante tanto en juntas como en los bloques de adobe, teniendo una absorción de 0.30-0.35 m (0.058 m por día) de altura. Acorde con la Figura 97, la humedad superficial en el muro alcanza hasta 0.35 m de altura a lo largo del muro, teniendo en cuenta que los porcentajes de mayor humedad superficial se mantienen a 0.20 m de altura.

Por último, en la Figura 92, se muestra el comportamiento térmico que tuvo al final la prueba y de acuerdo a la imagen, la humedad se mantuvo al igual que la Figura 98, aunque a diferencia de la anterior, en los laterales mostró una disminución de humedad provocada por evaporación dejando una velocidad de absorción de 0.25-0.30 m de altura. De manera similar, los datos del higrómetro en Figura 99, muestra un comportamiento entre 0-0.20 m de longitud la humedad superficial está a 0.25 m de altura mientras que de 0.30-1.10 m de longitud, la humedad se presenta a 0.30 m de altura. En esta etapa de la medición, se hacen presentes patologías como eflorescencias a lo largo del muro (Figura 174).

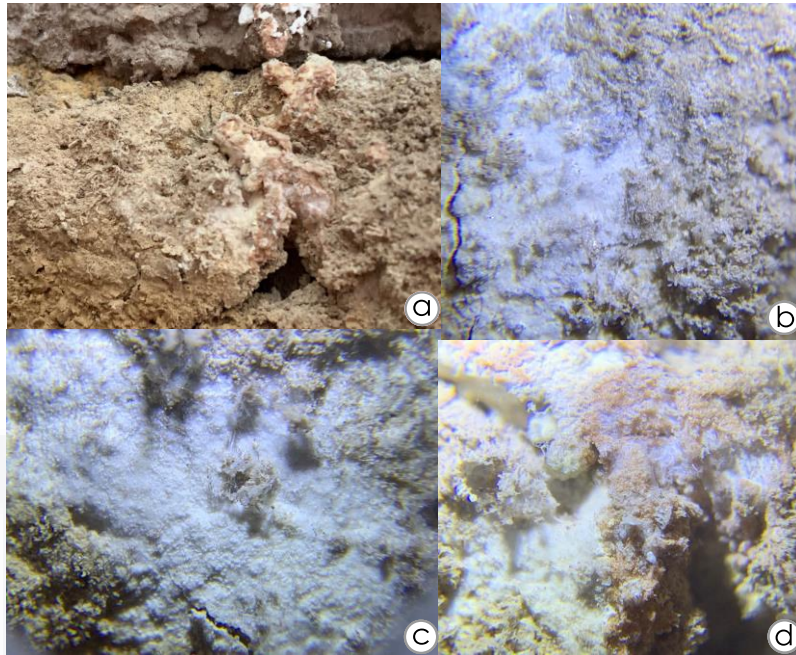


Figura 174: Eflorescencias en muro de adobe debido a la humedad por capilaridad. Imagen del autor.

Las mediciones realizadas con el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica en el muro de adobe con recubrimiento no fueron concluyentes, debido que el arreglo “Wenner” a medida en que profundiza pierde precisión. Se determinó que para obtener datos certeros del muro se debía complementar con mediciones ahora en su lado sin recubrimiento, puesto que, al hacerlo a la misma posición y altura, los datos completarían un modelo tridimensional donde al profundizar solo hasta 0.12 m de un lado y del otro, al unirlos, se tendría un análisis tridimensional con mayor precisión y detalle de la sección completa.

En la Figura 100, en los perfiles horizontales, descartando la humedad causada por los electrodos, se observa una propagación de humedad con una profundidad de 0.04-0.05 m obteniendo valores de resistividad de 1-30 Ohm-m (color azul). Mientras que, a mayor profundidad se observa un medio 100-500 Ohm-m indicando un medio parcialmente saturado (Color verde).

Un factor importante a considerar en el análisis de los perfiles verticales es que, la ubicación de cada una de las mediciones se encuentra sobre las juntas verticales de cada hilada, puesto que, se asocia la humedad constante, aunque en la parte superficial del perfil resaltan resistividades de entre 30-60 Ohm-m (tonos de azul-cian). Sin embargo,

continuyendo con su profundidad se toma en cuenta valores de 100-500 Ohm-m asociados a un medio parcialmente saturado.

Acorde con los perfiles eléctricos en ambos lados, la Figura 172b, corresponde a la unión de los perfiles de la Figura 85 y 100, formando así un modelo tridimensional del comportamiento interno de la humedad. Sin embargo, para una mejor visualización del fenómeno capilar en el muro de adobe en la Figura 172c, se muestra los diferentes tipos de anomalías como: A1: representa la volumetría dada por ascenso de la humedad alcanzando hasta 0.60 m de altura. No obstante, se determina que la humedad penetra de forma superficial para posteriormente saturar el interior. Sin embargo, al no penetrar de manera constante debido a los obstáculos (composición del muro), la humedad tiende a formar *campanas de Gauss*, lo que presenta la anomalía A2. Aunado al fenómeno capilar, la anomalía A3, se presenta debido al no estar saturado al interior, existen valores altamente resistivos de 30,000-100,000 Ohm-m, indicando que el ladrillo se encuentra en estado seco a una profundidad de 0.08-0.17m, lo que confirma que, la humedad se concentra en los primeros centímetros de profundidad en ambas caras.

7.4. HUMEDAD POR CAPILARIDAD EN MURO DE MAMPOSTERÍA DE PIEDRA

La humedad por capilaridad se propaga de manera distinta dependiendo a las características del medio, por el cual, el muro de mampostería de piedra es analizado bajo la misma metodología implementando NDT: Termografía Infrarroja, Higrómetro y Tomografía de Resistividad Eléctrica. Las pruebas fueron sometidas solo a su cara con recubrimiento debido a que, la cara sin recubrimiento no fue careada adecuadamente limitando a realizar una comparativa entre sus lados.

Teniendo en consideración que las juntas de mortero en el muro de mampostería de piedra es un material poroso y permeable, se observa que desde el primer día de medición de IT (Figura 101), la presencia de humedad alcanzó una velocidad de ascendencia 0.17-0.20 m de altura respectivamente, existiendo mayor saturación en el lado inferior derecho. Mientras que, en el patrón de humedad detectado por higrómetro (Figura 108) se muestra que la humedad superficial detectada ronda hasta los 0.30 m de altura, aunque ésta afirma que el mayor porcentaje registrado se encuentra en la parte inferior derecha con 19% de humedad superficial. Sin embargo, el contraste que se tiene a la figura 102, es mínima debido a la velocidad de ascendencia registrada de 0.18-0.30 m indicando que aumentó 0.10 m más la

propagación en el lapso de un día transcurrido. Por otro lado, comparando los datos del higrómetro y la termografía, existe congruencia entre los datos de humedad y temperatura, es decir, la zona con alto contenido de humedad superficial coincide con los bajos valores de temperatura y las zonas secas presentan altos valores de temperatura (Figura 109).

Analizando días subsecuentes en la figura 103, muestra un aumento significativo en la imagen térmica debido a que, en comparativa con las anteriores mediciones, la velocidad de ascendencia se encuentra de 0.55-0.60 m de altura. En contraste con la figura 104, se observa que a pesar de tener una absorción similar, la concentración del porcentaje en el frente húmedo es mayor uno del otro. Sin embargo, existe una discrepancia entre los resultados de higrómetro en cada modelo, puesto que, la figura 110 y figura 111, asocia el mayor porcentaje de humedad superficial al centro del muro. Resaltando que en la Figura 111, la propagación se encuentra con una variación en la altura de 0.05-0.10 m.

Por último, las figuras 105, 106 y 107, presentan resultados similares en la velocidad de ascendencia final de 0.75-0.80 m. En contraste con la IT, el higrómetro muestra una congruencia en la humedad superficial y la velocidad de absorción. La Figura 112 y 113, son relativamente similares en el cual, existe una variación en las concentraciones de humedad en la parte media derecha del muro y en la parte media central, respectivamente. Por otro lado, comienza la aparición de bajos porcentajes de humedad distribuidos en los laterales y centro indicando ausencia de humedad, es decir, la humedad se localiza a una altura no mayor a 0.50 m, dando paso a la evaporación, una disminución de la tensión superficial y restando humedad a mayor altura.

Para complementar el análisis superficial, la figura 115 muestra perfiles eléctricos donde los primeros dos perfiles horizontales (ERT CAP MAMP 1H Y ERT CAP MAMP 2H) muestran resistividades menores (color azul) a una profundidad de 0.02 m, dicho esto, la saturación solo estaba concentrada en el recubrimiento. Los perfiles restantes (ERT CAP MAMP 3H, ERT CAP MAMP 4H Y ERT CAP MAMP 5H) al visualizar una profundidad de 0.04-0.08 m existe un medio parcialmente saturado de 100-1000 Ohm-m (color cian-verde-amarillo). De igual manera, los perfiles verticales muestran un comportamiento similar a los perfiles horizontales, donde la humedad abarca mayor profundidad en la base del muro y disminuyendo la fuerza de propagación a una altura de 0.70 m, alcanzando, aunque con menor fuerza la longitud total del muro. Del mismo modo, que el muro de adobe, el método presenta imprecisiones a partir de 0.12m de profundidad por lo que se deduce que aproximadamente a una altura de 0.50 m el muro se encuentre en estado seco.

Al igual que en el muro de adobe, se realiza un modelo tridimensional creado con los perfiles 2D mostrados en la Figura 115. En este caso, el comportamiento de propagación de humedad corresponde a la velocidad de absorción obtenida durante la prueba, dando así una relación con las técnicas superficiales. Sin embargo, en las Figura 175c muestra que a pesar de no haber un modelo completo del muro existen anomalías similares que en el adobe como resistividades de 58 Ohm-m indicando saturación de humedad a una altura de 0.80m (A1), el comportamiento en campana debido el comportamiento de la propagación capilar (A2) y, por último, presencia de altas resistividades al centro del muro dadas por el material en estado seco (A3).



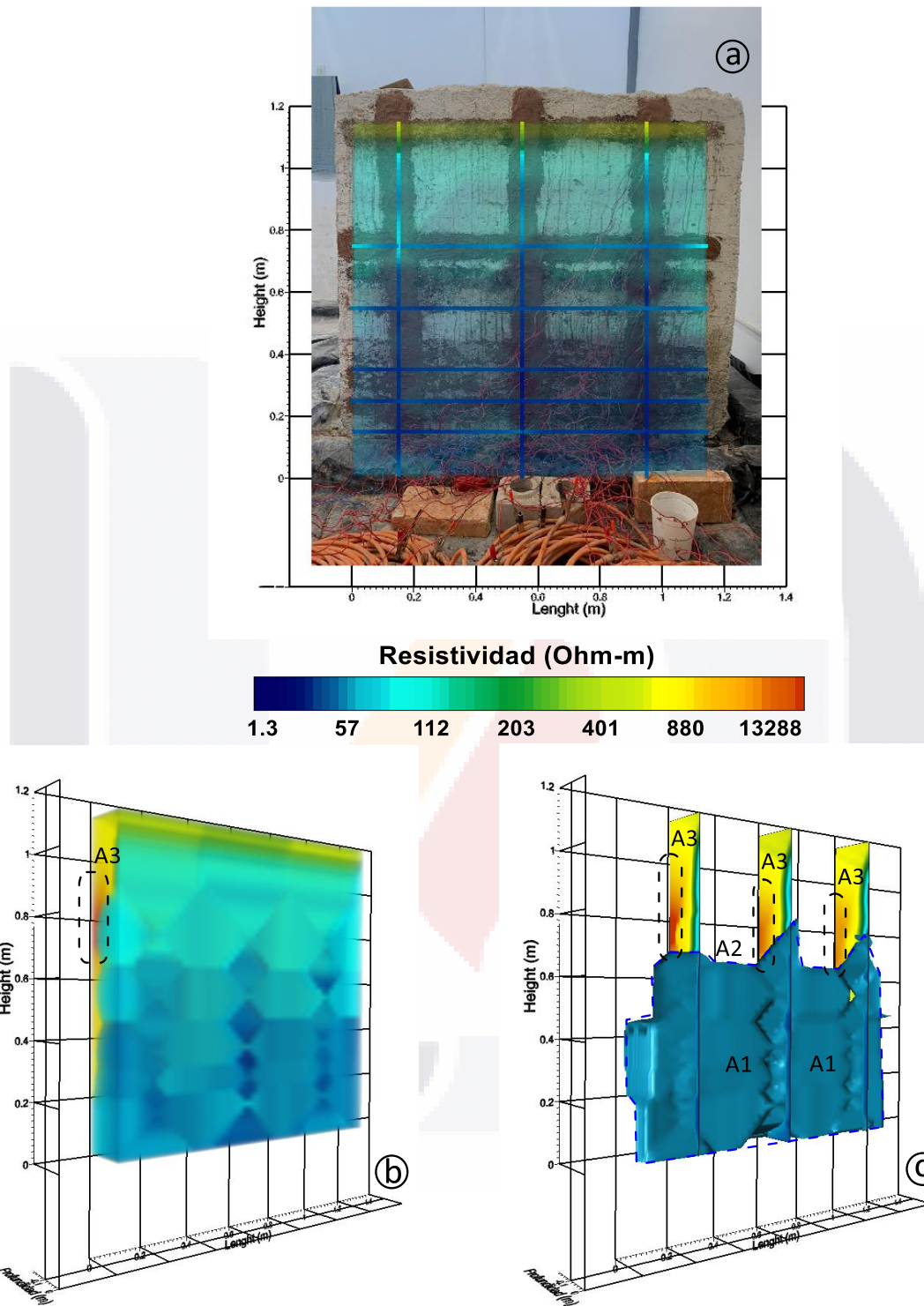


Figura 175: Modelo 3D de Tomografía de Resistividad Eléctrica de muro de mampostería de piedra. Modelo de humedad por capilaridad. Procesamiento en Voxler. Imagen del autor.

7.5. HUMEDAD ACCIDENTAL EN MURO DE ADOBE

La humedad accidental es un fenómeno donde tiene presencia por medio de estructuras dañadas como bajadas pluviales es por eso que, de acuerdo a la simulación de este fenómeno al interior del muro, se muestra el comportamiento que presenta.

Desde el inicio de la campaña experimental hasta la primera medición Figura 116, no muestra ninguna presencia de manchas superficiales de humedad. El modelo de higrómetro, la Figura 121 muestra el mismo porcentaje de humedad superficial que su fase de calibración representando así, la humedad del recubrimiento.

A medida que se registraba la segunda y tercera medición (Figura 117 y Figura 118, respectivamente), las imágenes muestran que existe pequeños puntos de humedad localizados a una distancia no mayor a 0.50 m una de la otra. Sin embargo, se observa que la mancha a 0.60 m con respecto al piso, es asociada con el inicio del tubo que se localiza al interior del muro. La diferencia entre las figuras anteriores es que con ayuda de la termografía se distingue que en la segunda imagen (Figura 118) existe mayor saturación y exposición semejante a los modelos del higrómetro (Figura 122 y Figura 123, respectivamente) donde el porcentaje de humedad superficial es de 4% y 20% respectivamente.

La humedad registrada en la Figura 118 a diferencia de la Figura 119, presenta un contraste en la parte superior central del muro. La diferencia consta de que existía un porcentaje de humedad alto, además, se observa que en un periodo de 9 días existió evaporación en el muro reduciendo el porcentaje de humedad superficial de 22% a 3% (Figura 123 y Figura 124).

Sin embargo, haciendo un comparativo con la Figura 119 y la Figura 120, en las últimas mediciones del muro de adobe con recubrimiento, se observa que la propagación alcanzó un ancho de 0.30 m con respecto al centro, y 0.60-0.70 m de alto (Figura 125), obteniendo una humedad superficial de 22% a una altura de 0.70 m.

Existió una diferencia entre las imágenes térmicas y las imágenes normales, dado que las condiciones de temperatura no son visibles al ojo humano, mientras que, con ayuda de la termografía se determinó la presencia de zonas de humedad. No obstante, uno de los factores presentes en cualquiera de las humedades analizadas es la evaporación esto debido a diversos factores como cambios de temperatura, características del material, etc. Así mismo, aunque el tubo se encuentra al centro del muro, el agrietamiento del

recubrimiento permitió en ciertos casos, que el agua saliera por esas pequeñas fisuras y se generaran zonas con mayor concentración de humedad.

A diferencia de la cara con recubrimiento, uno de los aspectos a contemplar es que además de tener la certeza que el tubo se encuentra al centro del muro también existe una junta paralela a él. Por otro lado, la fuerza con la que cae el agua dentro del tubo ejerce una presión en todos sus sentidos desgastando la junta cercana al tubo.

De acuerdo a la primera medición Figura 126, al igual que en el lado con recubrimiento, no existe presencia alguna de humedad visible ni infrarroja, de tal caso que, la Figura 131 con los datos del higrómetro, muestra una humedad superficial constante de 2%, humedad asociada al material.

Sin embargo, en la Figura 127 se tiene una pequeña percepción de humedad que se confirma en la imagen térmica, la cual, hace presencia del mismo modo a una distancia de 0.60 m con respecto al piso asumiendo que ahí se encuentra colocado el tubo, por lo tanto, la mayor concentración que pudiera presentarse. En la Figura 132, a pesar de que la zona de humedad tiene un mínimo de radio, presenta un porcentaje de humedad de 20%.

Siguiendo con la Figura 128, nos muestra que, al ojo humano, se observa humedad concentrada en la junta de la hilada de 0.09 m y un ancho de 0.04 m. Por otro lado, la imagen térmica muestra que además de la zona visible, empieza a existir humedad en toda la junta predominando en la parte media superior del muro, aunque en menor porcentaje de humedad. Dicho esto, la Figura 133 revela tres zonas mínimas de humedad perceptible con el Higrómetro, destacando el centro del muro con una mancha a una altura de 0.50-0.70 m a una longitud de 0.60-0.80 m del muro.

Del mismo modo que en el análisis anterior, en la Figura 129 en contraste con la figura 128, no existe el punto saturado en la junta lo cual podría deberse al efecto de la evaporación. La figura 134 presenta una disminución del porcentaje de humedad de 16% con respecto a la figura 133 que registraba una humedad de 30%. En este periodo de la prueba, existe un factor importante el cual, debido a lo antes mencionado, la junta se ve afectada por la saturación y fuerza generada por el agua provocando deslave del material y agujeros, lo que permitía el escape del agua (fuga) a presión, lo cual alteraría las mediciones del área.

Por consiguiente, al obtener los últimos datos (Figura 130 y Figura 135), se vieron afectados y alterados dadas las condiciones expresadas anteriormente.

7.6. HUMEDAD ACCIDENTAL EN MURO DE MAMPOSTERÍA DE PIEDRA

Como se mencionó anteriormente, cada material cuenta con características físicas y mecánicas distintas, mismas que ayuda a tener una mayor propagación de humedad mientras que otros actúan de barrera. Además, otro factor importante a destacar es el espesor del muro. Es por eso que, en el muro de mampostería de piedra no se notaron cambios superficiales ante la humedad accidental. A pesar de se sometió el muro a condiciones de humedad por un mes (suministro de 40 litros por día), no se registró humedad en ninguna de las cinco imágenes termográficas (Figura 136,137,138,139 y 140). Así mismo, se cotejaba dicha información con la implementación del higrómetro y tampoco hubo respuesta. Dado que en cada registro de datos coincidían en el mismo porcentaje, se optó por realizar solo un modelo que representara la condición de humedad (Figura 141) ya que el porcentaje de humedad era de 1%, significando la humedad del mortero.

7.7. HUMEDAD POR FILTRACIÓN EN MURO DE ADOBE

Para la detección de la humedad por filtración en el muro de adobe, se implementaron técnicas superficiales con ayuda de la cámara termográfica y el higrómetro.

Después de haber analizado dos condiciones de humedad distintas (capilaridad y accidental), el muro ya presentaba grietas en el recubrimiento y en la parte del canalón donde se sometería a las condiciones por filtración, es decir, se esperaba que en vez de contener el agua en la parte superior del muro y que el agua a su vez fuera filtrando gradualmente, estos problemas propiciarían altas concentraciones de humedad superficial las cuales serían evidentes en los resultados de las técnicas.

Como se muestra en la primera imagen (Figura 142b), a pesar de que presentaba humedad visible, solo era apreciable en tres zonas presentando manchas de distintas formas y la central se mostraba más notoria. Sin embargo, la Figura 142a muestra la imagen térmica del muro destacando que la humedad no se concentraba en esas zonas si no a lo largo del muro con una concentración mayor al centro. Teniendo en cuenta los datos del higrómetro, se observa un mapa de contornos parecido al térmico registrando una humedad superficial de 15% (Figura 147).

Conforme transcurrían los días, se mostró mayor presencia de humedad y propagación uniforme de la filtración del agua (Figura 143). Así mismo, en la Figura 148 se observa que

la presencia de humedad detectada con el higrómetro es de 0.70-0.90 m de altura, aunque existiendo mayor concentración de 0.90-1.20 m de altura. Del mismo modo, el mayor porcentaje de humedad superficial estaba situado al centro del muro con 18%.

De acuerdo con el registro anterior, en la Figura 144, muestra el mismo patrón de humedad, no obstante, aunque tenga las mismas características en el frente húmedo, el porcentaje de humedad superficial baja a 15% como se muestra en la figura 149. Por otro lado, realizando una comparativa de la Figura 145 con la Figura 144, se aprecia que, en el transcurso de 6 días el muro tuvo evaporación en los laterales. Sin embargo, a pesar de presentar esta condición, la humedad se mantuvo constante en la parte superior del muro (Figura 150).

En la etapa final de medición, en la figura 146, los resultados térmicos nuevamente arrojaron una filtración y saturación mayor al penúltimo registro. La zona de mayor concentración de humedad se encuentra a 0.80m y una humedad variable a una altura de 0.50-0.80 m a una longitud de 0-0.60 m, existiendo un porcentaje de humedad superficial de 22% de 0.90-1.20 m.

El muro de adobe al no contar con recubrimiento, se anticipaba un comportamiento similar al que presentó cuando se analizó la humedad accidental. Aunque el agua no estaba siendo suministrada a presión, al llegar a un grado de saturación alto, ocasionó el deslave de las juntas y por ende agujeros por donde al agua brotaba y escurría por el muro, dando como resultado altas concentraciones de humedad superficial, sin embargo, es probable que el centro de la sección estuviera seco.

De acuerdo con la explicación anterior, en la figura 152 se observa humedad en las juntas al igual que en los bloques de adobe de la hilada subsecuente, por lo tanto, los datos del higrómetro de la figura 156, se descartaron los datos presentados por el escurrimiento de las juntas dejando solo las zonas predominantes y de estudio. Se obtuvo que la humedad superficial es de 16%.

A pesar de los contratiempos, se hizo reparaciones en las juntas donde se presentaban los escurrimientos, como se muestra en la figura 153, que corresponde a la segunda medición. Como se observa existe humedad superficial, sin embargo, continúan las fugas en ciertas juntas que son perceptibles y estas resaltan en la imagen térmica. Por otro lado, siguiendo el patrón de humedad dado por la termografía, en la Figura 157 se determinó los porcentajes contenidos en la superficie obteniendo 20% de humedad superficial.

Si bien en la medición anterior existía una fuga, conforme transcurrieron los días, propicio que la junta del lado izquierdo de la Figura 154b, presentara escurrimiento por su grado de saturación. A su vez, se confirma que sigue existiendo presencia de humedad en la parte superior del muro en las 3 primeras hiladas. Al tomar lectura con el higrómetro, se tomó en cuenta el mismo patrón que la anterior medición obteniendo como resultado 18% de humedad en el muro (Figura 158).

A medida que se continuaba humedeciendo, el deterioro en las juntas era mayor. En la Figura 155 se observa que las juntas verticales son las más afectadas debido a las fugas. Era de suponer que el estar reparando las juntas cada vez que se deslavaba, se alteraba los datos, debido a que propiciaban que el muro se humedeciera por completo. Sin embargo, la imagen térmica se observa que la mayor concentración de humedad se seguía localizando en la parte superior por lo que al hacer el mapa de contorno de humedad por medio de los resultados del higrómetro (figura 159), se muestra la concentración y saturación donde se tenía un 25% de humedad superficial.

7.8. HUMEDAD POR FILTRACIÓN EN MURO DE MAMPOSTERÍA DE PIEDRA

El fenómeno por filtración en el muro de mampostería presenta un comportamiento de absorción continuo debido a la porosidad del mortero. Es por eso que la filtración se presenta de manera constante y notoria pudiendo ser detectada con facilidad por medio de las NDT superficiales.

A simple vista no se logra apreciar de forma notoria la humedad superficial, sin embargo, por medio de las marcas de bentonita que se encontraban en el muro de pruebas anteriores se pudo notar la presencia de humedad. Es decir, si el muro se encontraba en estado seco, la bentonita se encontraba de un tono rosado, mientras que, si había humedad, la bentonita se tornaba oscura (figura 160).

En el caso en la figura 160b, si bien, la humedad no se alcanzaba a percibir en la parte superior de una manera homogénea, se veía la humedad en un tipo triángulo invertido, dejando el pico a su lado derecho, mientras que con la figura 160a, se observa que la humedad filtró una cuarta parte del muro. Confirmando la retícula de medición, se realiza la medición por medio del higrómetro (Figura 165), donde no se observa el mismo patrón de triángulo invertido, sin embargo, se identifica a la esquina superior derecha con mayor humedad superficial con 18%.

Conforme avanzó la campaña, la humedad tuvo un descenso constante y casi homogéneo en su superficie (Figura 161). Dicho cambio no se apreció de forma notoria a simple vista, solo fue posible observarlo con la técnica de termografía. El comportamiento de humedad de acuerdo con el higrómetro (Figura 166), coincide que la humedad se infiltró de manera constante a una altura de 0.70 m, mientras que de 0.50-0.70 m, era discontinuo y en ciertas zonas. Por otro lado, además de concentrarse en un solo lado, también se dispersa por la parte superior del muro, dando una humedad del 20%, lo que indica un ascenso.

A mitad de la prueba, en la imagen térmica de la figura 162 se aprecia la humedad por encima de la mitad del muro, lo que coincide con el modelo de contornos (figura 167). Por lo tanto, se confirma la presencia de humedad desde 0.4 a 1.2 m de altura, con datos de 20%, igual que el registro anterior.

Sin embargo, al llegar a un punto máximo de saturación, inicia la evaporación en el muro como se observa en el registro térmico (figura 163), donde la humedad detectada se localiza por encima de la mitad del muro, semejante a la Figura 154. Así mismo, en la figura 168 se observa que la humedad por encima del 10% al 22% se encuentra a una altura de 0.70-1.20 m.

Para finalizar, la última medición (Figura 164) registra una similitud con la figura 162, debido que nuevamente la humedad se observa a una altura de 0.40 a 1.2 m, mientras que, en los resultados del higrómetro, se observa un aumento de humedad superficial, con un 24%.



CAPÍTULO VIII
CONCLUSIONES

CAPITULO VIII: CONCLUSIONES

8. CONCLUSIONES

8.1. CONCLUSIONES GENERALES

Con base en los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

Las técnicas no destructivas y mínimamente invasivas son una opción viable para la detección de humedades en los edificios históricos. Las NDT a evaluar fueron Termografía Infrarroja, Higrómetro y Tomografía de Resistividad Eléctrica.

Tanto la termografía como el higrómetro, son técnicas de detección superficial. La termografía brinda una imagen térmica el cual, por medio de la ausencia de la temperatura es posible visualizar el comportamiento de la humedad en las zonas analizadas, mientras que el higrómetro arroja datos en porcentaje de la humedad superficial que se encuentra en el área de estudio. Considero que las técnicas superficiales son de fácil implementación, aunque a diferencia de la cámara termográfica, en el higrómetro se tiene que realizar una conversión de datos arrojados por el equipo (porcentaje) a coordenadas con el fin de graficar los resultados y se obtenga un mejor análisis.

La Tomografía de Resistividad Eléctrica, se considera una de las técnicas más completas y que mejores resultados brinda, debido a que por medio de resistividades se logra conocer la porosidad, la absorción, el grado de saturación, entre otras características mediante cálculos y análisis más detallados, empleando las fórmulas como la de Archie, así como mediante la caracterización de materiales en laboratorio y la correlación de datos. Si bien, la técnica es la más precisa, se tienen algunas desventajas como son:

- Los tiempos de medición son altos, sobre todo al inicio debido a la colocación del equipo y de los electrodos, sin embargo, después de colocado el equipo cada medición se realiza en aprox. 40 minutos. Aunque comparado con las otras técnicas, sigue siendo muy elevado el tiempo de su implementación.
- Tiempos de procesamiento elevados. Debido a que el procesamiento implica diversos software y etapas que van desde la filtración de datos, elaboración de perfiles en 2D y finalmente un modelo tridimensional, el procesamiento de cada perfil 2D implica aprox. medio día y un modelo 3D con 15 perfiles conlleva aprox. 15 días.

- Se requiere asegurar una adecuada colocación y adherencia de los electrodos en la superficie de contacto del muro para reducir las resistencias de contacto (RC) a rangos adecuados recomendados en la literatura.
- El elevado costo del equipo y los electroestimuladores limitan su utilización. En el caso de los electroestimuladores, durante la calibración costó trabajo, tiempo y dinero la adaptación de la técnica ya que en un inicio se empleó el arreglo dipolo-dipolo lo que generó que muchos electrodos se quemaran, además de emplear agua salina, lodo y bentonita para la sujeción y adecuada inyección de corriente en la superficie del muro, este último (la bentonita) resultó el material idóneo, disminuyendo las resistencias de contacto por debajo de 2 K Ω -m.
- Si bien, la técnica que más información arroja sobre el comportamiento de la humedad es la Tomografía de Resistividad Eléctrica, existen factores que la encarecen y la hacen la menos viable a implementar debido al costo y nivel de análisis para obtener un buen producto.

De acuerdo con los criterios de implementación de las NDT y los resultados obtenidos, se determina que para una mejora en la obtención de datos es necesario para el higrómetro, modificar la retícula de medición a cada 0.05 m esto debido a la sección del muro y a la precisión en la propagación de humedad. Por otro lado, las distancias entre cada medición de la Tomografía de Resistividad Eléctrica, es necesario establecerlas a no más de 0.20 m de distancia una de otra, ya que a medida que se cuenta con una mayor separación se pierde información debido a la interpolación de datos que realiza el perfil anterior con el nuevo, llegando a perder información importante para el análisis.

Únicamente en la humedad por capilaridad fue posible emplear las tres técnicas (Higrómetro, IT y ERT) debido a los tiempos reducidos establecidos en la maestría y al interés en la complejidad del fenómeno capilar.

De acuerdo con los resultados analizados por el fenómeno en el muro de adobe y mampostería de piedra, se determina que es necesario seguir una secuencia en las técnicas no destructivas dadas por: Termografía Infrarroja, Higrómetro y Tomografía de Resistividad Eléctrica.

Humedad por Capilaridad

Con base a los resultados de la prueba capilar, se determina que el recubrimiento en ambos muros (adobe y mampostería de piedra) juega un papel importante debido a sus características ya sea mortero o tierra cruda y se considera que puede propiciar o bloquear el flujo capilar.

Humedad Accidental

Los resultados del fenómeno son distintos en cada muro debido que, en el caso del adobe, se pudo observar humedades a simple vista y posteriormente confirmarlo con IT, sin embargo, en el muro de mampostería no tuvo respuesta alguna ante la presencia de humedad por lo que se infiere que, algunas de las condicionantes por el cual no se observa el fenómeno son las dimensiones del muro, porosidad de la piedra y del recubrimiento, y tiempo de exposición a la humedad.

Humedad por Infiltración

Si bien, la humedad se infiltra de manera paulatina, con ayuda de las técnicas superficiales se pudo detectar de manera precisa la humedad, del mismo modo que su porcentaje de humedad.

Cabe aclarar que, si bien no se desarrolla una metodología en la tesis, en la práctica si se diseñó una metodología la cual se ve reflejada en una explicación detallada de los procedimientos realizados para cada técnica.

Los resultados de las tres técnicas muestran que el recubrimiento de mortero cemento arena, cumple una función de medio conductor de humedad, sin embargo, también, se considera como un elemento nocivo que bloquea la evaporación.

Para cualquier análisis de las humedades, se deberá tomar en cuenta factores como porosidad, absorción, saturación y evaporación. Estos factores ayudan a observar cuál es el comportamiento y por qué se propaga la humedad de tal forma.

8.2. CONCLUSIONES PARTICULARES

- a) Se hizo una revisión documental de los métodos existentes y se determinó los de mayor y de fácil acceso en la universidad.
- b) Para cada uno de los métodos seleccionados se llevó a cabo una prueba de calibración que consistió en la revisión y ajuste de parámetros y materiales adecuados, así como un procedimiento a seguir para la determinación y caracterización de las humedades.
- c) Se realizó un proceso comparativo entre las técnicas empleadas en cada tipo de humedad, determinando el alcance, la efectividad y practicidad para la detección y caracterización de las humedades.

8.3. NICHOS DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo con el último párrafo de las conclusiones generales, para lograr un análisis a profundidad y con mayor precisión es importante conocer las propiedades de los materiales, a fin de poder entender el fenómeno de la humedad, de manera que es de suma importancia llevar a cabo una campaña experimental de caracterización de los materiales empleados en los muros, realizando pruebas para determinar las propiedades físicas, mecánicas, químicas, petrológicas y petrográficas.

Otra área de oportunidad es, la implementación de las técnicas en muros “in situ” que presenten problemas de humedad, con base en la metodología empleada en este trabajo. El objetivo es comparar los resultados de probetas representativas construidas en laboratorio llevando a cabo simulaciones de humedad con respecto a muros de edificios antiguos en condiciones reales.

Finalmente, después de llevar a cabo la caracterización de materiales y la implementación de las técnicas de detección de humedades en laboratorio e “in situ”, sería posible realizar una simulación de flujo de agua en un medio vertical mediante software especializado como Comsol o Modflow.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, J. A., Martínez-Martínez, S., Martínez-Pagan, P., Zornoza, R., Carmona, D. M., & Faz, A. (2011). *Estudio de estabilidad en depósitos de lodos del Distrito Minero de Mazarrón (SE España): Riesgos potenciales sobre la Rambla de Las Moreras*.
- Angelone, S., Garibay, M. T., & Cauhapé Casaux, M. (2006). *PERMEABILIDAD DE SUELOS*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO.
- Apliter termografía. (s.f.). *FLIR Tools+ (Licencia)—Software de termografía (Windows)*.
<https://www.aplitter.com/producto/flir-tools-software-termografia-windows/>
- Appgeo. (2017). *A comprehensive study for moisture control in cultural heritage using non-destructive techniques | Elsevier Enhanced Reader*.
<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.03.008>
- Argandoña, V. G. R. de, Rodríguez-Rey, A., Calleja, L., Río, L. M. S. del, & Celorio, C. (2008). Capillarity test monitored by X-ray computer tomography in sandstones. A comparative study with standard methods. *Materiales de Construcción*, 58(289–290), Article 289–290.
<https://doi.org/10.3989/mc.2008.v58.i289-290.79>
- ASALE, R.-, & RAE. (s/f). *Humedad | Diccionario de la lengua española*. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. Recuperado el 23 de mayo de 2022, de
<https://dle.rae.es/humedad>
- Azkarate, A. (2003). *EL PATRIMONIO ARQUITECTONICO*. 23.
- Barone, P. M., & Ferrara, C. (2018). Non-Invasive Moisture Detection for the Preservation of Cultural Heritage. *Heritage*, 1(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/heritage1010011>
- Barreira, E., & Almeida, R. M. S. F. (2020). *Infrared Thermography for Building Moisture Inspection*.
- Barreira, E., Almeida, R. M. S. F., & Delgado, J. M. P. Q. (2016). *Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components*.

- Barreira, E., & De Freitas, V. P. (2005). *Evaluation of building materials using infrared thermography.*
- Bernavente, D., Bernabéu, A. M., & Cañaveras, J. C. (2004). *ESTUDIO DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS ROCAS.*
- Bosiljkov, V., Uranjek, M., Žarnić, R., & Bokan-Bosiljkov, V. (2010). An integrated diagnostic approach for the assessment of historic masonry structures. *Journal of Cultural Heritage*, 11(3), 239–249. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.11.007>
- Cardarelli, E., De Donno, G., Scatigno, C., Oliveti, I., Martinez, M. P., & Prieto-Taboada, N. (2016). Geophysical and geochemical techniques to assess the origin of rising damp of a Roman building (Ostia Antica archaeological site). *Microchemical Journal*, 129, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2016.06.006>
- Carta de Atenas. (1931). *CARTA DE ATENAS PARA LA RESTAURACION DE MONUMENTOS HISTORICOS.* 33.
- Carta de Venecia. (1964).
- Cotic, P., Jaglicic, Z., Niederleithinger, E., Effner, U., Kruschwitz, S., Trela, C., & Bosiljkov, V. (2013). *Effect of moisture on the reliability of void detection in brickwork masonry using radar, ultrasonic and complex resistivity tomography.*
- Cuevas, M. M. (2014). *ANÁLISIS SOLUCIONES DE HUMEDADES POR CAPILARIDAD.* 75.
- de Prada Pérez de Azpeitia, F. I. (2016). La termografía infrarroja: Un sorprendente recurso para la enseñanza de la física y la química. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias.*, 1(3), 617–627. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2016.v13.i3.08

- deGroot-Hedlin, C., & Constable, S. (1990). Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *GEOPHYSICS*, 55(12), 1613–1624.
<https://doi.org/10.1190/1.1442813>
- Esteve, S. T. (2016). *Aplicación de la Termografía Infrarroja como ensayo no destructivo (END) en la restauración del patrimonio arquitectónico*. 8, 14.
- Fierro Losada, J. A., Parra Gómez, A. F., & Vásquez Oyola, C. A. (2017). *DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DE LAS COMUNAS 1, 3 Y 5 DEL MUNICIPIO DE GIRARDOT - CUNDINAMARCA*. UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA.
- Final test. (2023). *FLIR-C3-X - Cámara térmica profesional compacta C3-X con MSX y WiFi Resolución de 128 x 96/9 Hz*. FinalTest.com. <https://www.FinalTest.com.mx/product-p/flir-c3-x.htm>
- FLIR MR55 USER MANUAL. (s/f). *FLIR Moisture Meter with Bluetooth® user manual*.
- Fort González, R. (2009). LA PIEDRA NATURAL Y SU PRESENCIA EN EL PATRIMONIO HISTÓRICO. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 16–25.
- Franzoni, E. (2014). Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge. *Construction and Building Materials*, 54, 123–136.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.054>
- Franzoni, E. (2018). State-of-the-art on methods for reducing rising damp in masonry. *Journal of Cultural Heritage*, 31, S3–S9. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.04.001>
- Fray, D., & Jafferson, J. (2016). Solid-State GasSensors. *Elsevier*.
- Gabarrón Sánchez, M. (2013). *EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE RESÍDUOS MINEROS*. Universidad Politécnica de Cartagena.

- García Gómez, I. (2017). "ESTUDIO DE PERMEABILIDAD EN EL ADOBE IMPLEMENTANDO AGREGADOS NATURALES". UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA.
- Garré, F. (2021). *Patrimonio arquitectónico urbano, hecho y rescate: Bases conceptuales e instrumentos de salvaguarda*.
 file:///C:/Users/ivonn/Downloads/Patrimonio_arquitectonico_urbano_preserv.pdf.
 file:///C:/Users/ivonn/Downloads/Patrimonio_arquitectonico_urbano_preserv.pdf
- Giaccone, D., Santamaria, U., & Corradi, M. (2020). *Heritage | Free Full-Text | An Experimental Study on the Effect of Water on Historic Brickwork Masonry*. <https://www.mdpi.com/2571-9408/3/1/3>
- Gil Muñoz, M. T. (2019). *Criterios de diseño y caracterización de las cámaras de aireación, para el tratamiento y prevención de las humedades de capilaridad en edificios de interés patrimonial* [PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid].
<https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.55603>
- Gil Muñoz, M. T., & Lasheras Merino, F. (2018). Cámaras de aireación como sistema de control de la humedad de capilaridad en edificios históricos. Análisis de funcionamiento. *Informes de la Construcción*, 69(548), 233. <https://doi.org/10.3989/id.55476>
- González, G. Í., & de Montes, I. (2007). *CLASIFICACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS Y EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA ASERRADA DE CONÍFERAS DE GRAN ESCUADRÍA PARA USO ESTRUCTURAL*. 236.
- Hierro, J. A., & Fernández, J. M. (2013). Activos culturales y desarrollo sostenible: La importancia económica del Patrimonio Cultural. *Política y Sociedad*, 50(3), Article 3.
https://doi.org/10.5209/rev_POSO.2013.v50.n3.41861
- ICOMOS. (1999). *CARTA DEL PATRIMONIO VERNÁCULO CONSTRUIDO (1999)*.

IMCYC. (2011). *Agregados-Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso*.

Jimenez, S., Scarioni, L., & Vanob, K. (2013). Nota Técnica: Sensores de humedad de tipo capacitivo y resistivo, fabricados con NaCl, KBr y KCl. *Revista INGENIERÍA UC*.

Kirsch, R. (Ed.). (2006). *Groundwater Geophysics*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/3-540-29387-6>

Kouro, S. (2001). *Automatización Industrial: Sensores De Humedad*. UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA.

Kuenzel, H., & Holm, A. (2009). Moisture Control and problem analysis of heritage constructions. *PATORREB, 2009*.

Leucci, G. (2019). *Nondestructive Testing for Archaeology and Cultural Heritage*.

Loke, M. H. (2001). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*.

Loke, M. H., & Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method ¹. *Geophysical Prospecting, 44(1)*, 131–152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>

Martines L., E. (2007). *DEFINICIONES DE HUMEDAD Y SU EQUIVALENCIA*.

Martínez-Pagán, P., Cano, A., Aracil, E., & Arocena, J. (2009). Electrical Resistivity Imaging Revealed the Spatial Properties of Mine Tailing Ponds in the Sierra Minera of Southeast Spain. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics - J ENVIRON ENG GEOPHYS, 14*, 63–76. <https://doi.org/10.2113/JEEG14.2.63>

Matarredonda Terol, L. (1964). *Humedades en la construcción*. 160.

Mendiola Germán, I., Hernández Moreno, S., & Vázquez, A. C. (2014). LA PIEDRA: ELEMETO HISTÓRICO Y DE CALIDAD ESTÉTICA PARA UN DISEÑO ARQUITECTÓNICO SUSTENTABLE. *Revista Legado de Arquitectura y Diseño, 153–163*.

- Mesanza Moraza, A. (2011). *TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS APLICADAS AL PATRIMONIO CONSTRUIDO*. Escuela Politécnica Superior de Ávila. Universidad de Salamanca.
- Mileto, C., & López Manzanares, F. (s/f). *PROCESOS PATOLÓGICOS EN MUROS DE ADOBE. PANORAMA GENERAL DE LOS MECANISMOS DE DEGRADACIÓN DEL ADOBE EN LA ARQUITECTURA TRADICIONAL ESPAÑOLA*.
- Neita Duarte, L. Y., & Peña Rodríguez, E. O. (2011). *PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA Y SU UTILIZACIÓN COMO TÉCNICA PARA MANTENIMIENTO PREDICTIVO*. UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.
- Orbán, Z., & Gutermann, M. (2009). Assessment of masonry arch railway bridges using non-destructive in-situ testing methods. *Engineering Structures*, 31(10), 2287–2298.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.04.008>
- Padilla Cenicerros, R., Orenday Tapia, E. E., Pacheco Martínez, J., García Rubalcava, J. L., & Herrera León, W. H. (2023). *Application of the Electrical Resistivity Tomography Technique in the Assessment of Historical Buildings in the State of Aguascalientes, Mexico*.
- Pipiraite, T. (2017). *HUMEDADES EN EDIFICACIÓN. ESTUDIO DESDE SU ORIGEN HASTA LA ACTUALIDAD, Y APLICACIONES CONTEMPORÁNEAS*. Universitat Politecnica de Valencia.
- Price, C. A., Amoroso, G. G., & Fassina, V. (1984). Stone Decay and Conservation: Atmospheric Pollution, Cleaning, Consolidation and Protection. *Studies in Conservation*, 29(3), 158.
<https://doi.org/10.2307/1506020>
- Querol, M. Á. (2010). *Manual de gestión del Patrimonio Cultural*. Ediciones AKAL.
https://books.google.com.mx/books?id=o_IUjEdHAyMC&lpg=PA11&ots=K7GBrBUplQ&dq=%E2%80%99Cel%20conjunto%20de%20bienes%20muebles%2C%20inmuebles%20e%20in materiales%20que%20hemos%20heredado%20del%20pasado%20y%20que%20hemos%20decidido%20que%20merece%20la%20pena%20proteger%20como%20parte%20de%20n

uestras%20se%20de%20identidad%20social%20e%20hist%C3%B3rica%20%9D%20(Querol%202010%3A%20p.%2011).&pg=PP1#v=onepage&q&f=false

Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. 712.

Rios López, E. (2016). *CARACTERIZACIÓN TÉCNICO–ECONÓMICA DE LA APLICACIÓN DE PINTURA A BASE DE CAL PARA VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL EN EL ESTADO DE AGUASCALIENTES*.
Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Rodríguez, D. A., & Rodríguez, C. J. M. (2017). *APLICACIÓN DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA COMO MÉTODO DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVO DE UN TÚNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD*. 110.

Rosales, A. (2021, abril 5). Temperatura del Punto de Rocío: ¿Qué Significa y Cómo se Puede Calcular? *AKRIBIS*. <https://www.akribis.info/web/temperatura-del-punto-de-rocio-que-significa-y-como-se-puede-calcular/>

Rymarczyk, T., Kłosowski, G., & Kozłowski, E. (2018). *A Non-Destructive System Based on Electrical Tomography and Machine Learning to Analyze the Moisture of Buildings*.

Salas-García, J., Gárfias, J., Llanos, H., & Martel, R. (2010). Diseño y aplicación de instrumentación para la caracterización hidrometeorológica e hidrogeológica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(2), 233–247.

Sanchez Silva, I. I. (2021). *LA RECUPERACIÓN DE LA ARQUITECTURA HABITACIONAL / TRADICIONAL EN EL CENTRO DE LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES, MÉXICO*. Universitat Politècnica de Valencia.

Sass, O., & Viles, H. A. (2009). *Wetting and drying of masonry walls: 2D-resistivity monitoring of driving rain experiments on historic stonework in Oxford, UK*.

Sevruk. (2014). *MEDICION DE LA HUMEDAD DEL SUELO. CAPITULO 15*.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

SigmaPlot 15. (s/f). Addlink Software Científico. Recuperado el 14 de noviembre de 2023, de

<https://www.addlink.es/productos/sigmaplot>

Spodek, J., & Rosina, E. (2009). *Application of Infrared Thermography to Historic Building*

Investigation. <https://doi.org/10.1080/13556207.2009.10785040>

Tejeda Martínez, A. (2018). *LA HUMEDAD EN LA ATMÓSFERA Bases físicas, instrumentos y aplicaciones.*

Vega, E. S., & Camargo, J. M. (2023). *Estudio de Causas y Tratamientos de Humedades en las zonas comunes del Conjunto, Residencial Altos de Tierra Santa, Ubicado en Bogotá D. C.*

Universidad Militar Nueva Granada.

