



Validación experimental de una metodología de monitoreo de bajo costo basada en IoT para el diagnóstico higrotérmico en estructuras de tapia pisada.

Autor: Oscar Fernando Ojeda Ramos

Tutor: Natalia del Pilar Correal Avilán

Facultad de ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia,

Mayo 2026

Resumen

Las estructuras de tapia pisada en Colombia representan un patrimonio construido de gran valor cultural, cuyo desempeño a largo plazo depende principalmente de su comportamiento como un medio poroso reactivo en constante interacción con el entorno higrotérmico. En climas tropicales húmedos, los mecanismos de deterioro no se deben tanto a eventos aislados, sino a procesos acumulativos de fatiga higrotérmica vinculados a la disminución progresiva de la succión matricial, fenómenos que no están adecuadamente abordados en las normativas estáticas actuales.

Este estudio valida experimentalmente un marco metodológico integrado para diagnóstico predictivo, que combina monitoreo IoT (El Internet de las Cosas)¹, modelación multifísica HAMT² (Transferencia Combinada de Calor, Aire y Humedad) y calibración inversa³ de parámetros, aplicado a una edificación de tapia pisada de aproximadamente un siglo de antigüedad en clima tropical húmedo. La metodología incluye la caracterización físico-mecánica e higrotérmica en laboratorio, monitoreo continuo in situ mediante una arquitectura Edge Computing⁴, simulación numérica por elementos finitos y validación estadística conforme a estándares internacionales.

Los resultados permiten cuantificar el régimen higrotérmico del material, identificar vulnerabilidades estructurales no detectables por inspección tradicional, estimar parámetros locales de la SWRC (Curva de retención de agua del suelo)⁵ y definir una clasificación operativa del riesgo higrotérmico con umbrales de alerta temprana basados en un gemelo digital del sistema constructivo. En conjunto, esta metodología demuestra la viabilidad técnica y económica de integrar monitoreo IoT, modelación multifísica y calibración inversa como herramienta para la gestión predictiva del patrimonio construido en tapia pisada.

Palabras clave: *Tapia pisada; diagnóstico higrotérmico; monitoreo IoT; modelación HAMT; calibración inversa; succión matricial; curva de retención hídrica (SWRC); gemelo digital; conservación preventiva; patrimonio en tierra; clima tropical húmedo.*

¹ IoT: Internet of Things; red de dispositivos físicos para adquisición y transmisión de datos en tiempo real (Majumder et al., 2023).

² HAMT: Heat, Air and Moisture Transfer; modelo de transporte acoplado de calor, aire y humedad en medios porosos (Künzel, 1995).

³ Calibración inversa: ajuste de parámetros de un modelo numérico minimizando el error frente a datos experimentales, mediante el algoritmo de Levenberg-Marquardt (Finsterle & Kowalsky, 2010).

⁴ Edge Computing: procesamiento local de datos en el nodo sensor, reduciendo latencia de conectividad (Roostaei et al., 2023).

⁵ SWRC: Soil Water Retention Curve; relación no lineal entre contenido de agua y succión matricial en medios porosos (Van Genuchten, 1980).

1. Introducción

Las estructuras en tapia pisada constituyen un sistema constructivo de ampliamente extendido a nivel global, valorado por su bajo impacto ambiental, eficiencia energética y elevada inercia térmica (Uprety et al., 2024; Waibel et al., 2025). En Colombia, la técnica de la tapia pisada desempeñó un papel predominante en el desarrollo del patrimonio edificado de la región andina y del suroccidente del país entre los siglos XVII y XIX, consolidándose como un testimonio material de alto valor cultural (Sánchez Gama, 2007). No obstante, la durabilidad de estos sistemas constructivos se encuentra condicionada por su naturaleza como medios porosos altamente reactivos, cuya respuesta depende directamente de la interacción con el entorno higrotérmico.

Desde la perspectiva de la física de la construcción, los muros de tapia pisada experimentan procesos acoplados de transferencia de calor, aire y humedad, los cuales controlan su comportamiento mecánico y su evolución patológica. En este contexto, la modelación multifísica HAMT (Heat, Air and Moisture Transfer) se ha consolidado como el marco teórico de referencia para simular el flujo capilar y de vapor en materiales porosos, integrando las leyes de Fourier, Fick y Darcy⁶ en sistemas de ecuaciones diferenciales acopladas (Künzel, 1995; Zhao et al., 2022; Duc & Sawada, 2023).

Sin embargo, la validación experimental de este enfoque se ha desarrollado principalmente en materiales estandarizados y bajo condiciones climáticas de regiones templadas, lo que limita su aplicabilidad en contextos tropicales (Losini et al., 2023; Ouellet-Plamondon et al., 2024). Esta limitación adquiere especial relevancia en zonas como Santander de Quilichao (Cauca, Colombia), donde las condiciones climáticas —caracterizadas por precipitaciones anuales cercanas a los 2.000 mm y humedades relativas que alcanzan el 99 % (IDEAM, 2023)— inducen ciclos severos de saturación y secado en materiales arcillosos ricos en caolinita⁷ (Houben & Guillaud, 1994; Yang et al., 2025).

Bajo estas condiciones, el mecanismo de deterioro dominante no se asocia exclusivamente a cargas estructurales, sino a la degradación progresiva de la cohesión aparente del material, gobernada por la reducción de la succión matricial⁸. Este fenómeno, conocido como fatiga higrotérmica, genera daño acumulativo a nivel microestructural, comprometiendo la estabilidad del paramento sin manifestaciones visibles en etapas tempranas (Fredlund et al., 1978; Jiang et al., 2023; Vulpe & Beckett, 2025).

A pesar de la relevancia de estos procesos, la evaluación del riesgo estructural en edificaciones de tapia pisada en Colombia continúa fundamentándose en enfoques normativos de carácter determinista y estático, como los establecidos en la guía AIS 610-EP-17 (NSR-10) (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2019). Dichos enfoques se basan en parámetros

⁶ La ley de Darcy describe el flujo de un fluido a través de un medio poroso como proporcional al gradiente de presión e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido y la resistencia del medio (permeabilidad). En el contexto HAMT, gobierna el transporte capilar de agua líquida a través de la red de poros del material.

⁷ Caolinita: mineral filosilicato producto de la meteorización de feldespatos en suelos tropicales residuales, caracterizado por baja capacidad de intercambio catiónico y alta estabilidad química.

⁸ Succión matricial: diferencia de presión entre la fase gaseosa y la fase líquida en un medio poroso parcialmente saturado; su reducción a cero implica la pérdida de la cohesión aparente del material.

obtenidos a partir de ensayos puntuales de laboratorio, asumiendo condiciones de isotropía y linealidad que no representan adecuadamente la dinámica higrotérmica real del material. En consecuencia, se genera una brecha metodológica entre el comportamiento físico del sistema y las herramientas empleadas para su diagnóstico, lo que limita la capacidad de anticipar procesos de deterioro y favorece la adopción de estrategias de intervención reactiva (ICOMOS, 2013).

En este contexto, la presente investigación aborda la necesidad de transitar hacia un enfoque de diagnóstico predictivo basado en la integración de monitoreo continuo y modelación multifísica. La incorporación de tecnologías de bajo costo basadas en Internet de las Cosas (IoT), mediante redes de sensores capaces de registrar en tiempo real los gradientes higrotérmicos internos del material, permite superar las limitaciones asociadas a los métodos tradicionales de evaluación estática (Majumder, 2023; Roostaei et al., 2023; Hidalgo-Fort et al., 2024). Asimismo, la aplicación de técnicas de calibración inversa, como el algoritmo de Levenberg-Marquardt⁹, posibilita ajustar los parámetros del modelo HAMT a partir de datos experimentales de campo, incrementando su capacidad predictiva (Finsterle & Kowalsky, 2010; Rouchier et al., 2015; Waibel et al., 2025).

El problema central radica en la ausencia de una metodología integrada, validada experimental y económicamente viable, que permita caracterizar y predecir el comportamiento higrotérmico de muros de tapia pisada en climas tropicales húmedos.

Esta carencia dificulta la identificación precisa de los umbrales críticos de saturación que conducen a la pérdida de cohesión del material, limitando así la implementación de estrategias preventivas basadas en evidencia cuantitativa.

En respuesta a este problema, se plantea como objetivo general validar experimentalmente una metodología de monitoreo de bajo costo basada en IoT para el diagnóstico higrotérmico en estructuras de tapia pisada. Para su cumplimiento, se establecen los siguientes objetivos específicos: (i) caracterizar las propiedades físico-mecánicas e higrotérmicas del material conforme a la normativa vigente, estableciendo una línea base paramétrica; (ii) implementar un sistema de monitoreo IoT con arquitectura de Edge Computing¹⁰ para la adquisición continua de datos en condiciones reales de servicio; (iii) desarrollar y calibrar un modelo multifísico HAMT mediante técnicas de calibración inversa a partir de series temporales experimentales; y (iv) validar la capacidad predictiva del modelo mediante métricas estadísticas reconocidas internacionalmente (Moriasi et al., 2015).

La presente investigación valida experimentalmente un enfoque metodológico integrado que combina monitoreo en tiempo real, modelación numérica y análisis estadístico, aplicado a estructuras de tapia pisada en condiciones de clima tropical húmedo. Este enfoque permite transitar de esquemas de diagnóstico reactivo hacia estrategias de conservación preventiva basadas en monitoreo continuo y capacidad predictiva, con potencial de aplicación en otros contextos tropicales con patrimonio construido en tierra.

⁹ Levenberg-Marquardt: algoritmo de optimización no lineal por mínimos cuadrados que combina el método de Gauss-Newton y el descenso de gradiente, garantizando convergencia estable en espacios de error no convexos.

¹⁰ Edge Computing: paradigma de procesamiento distribuido en el que el cómputo se realiza localmente en el nodo sensor, reduciendo latencia y dependencia de conectividad.

2. Fundamentos Del Comportamiento Higrotérmico En Estructuras De Tapia Pisada

La evaluación predictiva del comportamiento higrotérmico en estructuras de tapia pisada requiere una fundamentación que articule, de manera coherente, los conceptos físicos que gobiernan la degradación del material, los modelos teóricos que permiten simularla y el contexto regulatorio que justifica la transición hacia metodologías de diagnóstico dinámico. Las tres secciones de este capítulo responden a esa articulación.

2.1 Fundamentos físicos del material:

2.1.1. *Tapia pisada como medio poroso reactivo.*

En la física de la construcción, un medio poroso reactivo se define como un material cuya red de poros intercambia masa y energía con el entorno de forma continua y acoplada, de modo que su estado higrotérmico depende tanto de las condiciones instantáneas como de la historia climática acumulada (Duc & Sawada, 2023). La tapia pisada, elaborada con arcillas residuales tropicales, cumple con esta definición.

En suelos residuales tropicales empleados en la construcción en tierra, es frecuente encontrar la presencia de arcillas de baja actividad, particularmente caolinita, cuya configuración mineralógica favorece mecanismos de adsorción superficial mediante la interacción electroquímica de sus grupos hidroxilo con el vapor de agua (Houben & Guillaud, 1994; Yang et al., 2025).

Este comportamiento confiere al material una respuesta higroscópica altamente sensible a las variaciones de humedad relativa ambiental.

En consecuencia, los muros de tapia pisada no pueden ser tratados como sistemas estáticos, sino como medios porosos reactivos cuyo desempeño está gobernado por procesos acoplados de transferencia de calor y humedad.

2.1.2. *Fatiga higrotérmica*

La fatiga higrotérmica se define como un proceso de degradación estructural acumulativa e irreversible, generado por ciclos repetidos de saturación y secado en materiales porosos (Jiang et al., 2023; Vulpe & Beckett, 2025).

Este mecanismo se origina en fluctuaciones de presión intersticial que inducen esfuerzos internos en la matriz arcillosa. Cada ciclo puede superar la resistencia a tracción del material, generando microfisuras progresivas que no siempre presentan manifestaciones visibles en etapas iniciales.

En climas tropicales húmedos, donde los ciclos higrotérmicos son frecuentes y de alta amplitud, la fatiga higrotérmica se consolida como el principal mecanismo de deterioro en estructuras de tapia.

Su naturaleza silenciosa limita la eficacia de la inspección visual convencional, motivando la necesidad de estrategias de monitoreo continuo para detección temprana.

2.1.3. *Succión matricial y Curva de Retención Agua-Succión (SWRC).*

“Desde la mecánica de suelos parcialmente saturados, la succión matricial se define como la diferencia de presión entre la fase gaseosa y la fase líquida en la red de poros del material ($u_a -$

u_w) (Fredlund et al., 1978)”. Este parámetro constituye el principal mecanismo físico que gobierna la cohesión aparente en materiales arcillosos.

A medida que el contenido de humedad aumenta, la succión matricial disminuye progresivamente hasta aproximarse a cero, momento en el cual la cohesión aparente se anula y se incrementa significativamente el riesgo de inestabilidad estructural (Vulpe & Beckett, 2025).

La relación entre el contenido de agua y la succión matricial se describe mediante la Curva de Retención Agua-Succión (SWRC¹¹), que presenta un comportamiento no lineal y con histéresis.¹²

En la tapia pisada, la curva suele ser bimodal, debido a la coexistencia de macroporos (drenaje rápido) y microporos (retención capilar), lo que intensifica la acumulación de daño bajo ciclos repetidos de humedad (Losini et al., 2023; Poupard et al., 2025).

En esta investigación, la SWRC es la variable central para la calibración inversa, vinculando las mediciones de humedad obtenidas mediante IoT con el estado mecánico del material.

2.1.4. Capacidad reguladora de humedad (MBV).

El Moisture Buffering Value (MBV¹³) cuantifica la capacidad de un material para adsorber y liberar humedad en respuesta a variaciones cíclicas de la humedad relativa, expresándose en $g/(m^2 \cdot \%HR)$ conforme al protocolo NORDTEST (Rode et al., 2005).

En materiales de tierra, esta propiedad desempeña un papel dual. Por un lado, contribuye a la estabilización del microclima interior, al amortiguar las fluctuaciones de humedad ambiental. Por otro, bajo condiciones de estrés higrótérmico sostenido, puede favorecer la acumulación progresiva de humedad en el interior del material cuando la capacidad de adsorción supera la de desorción (Jiang et al., 2023; Abdulsamad et al., 2024).

En este sentido, el MBV no solo actúa como indicador de confort higrótérmico, sino también como un parámetro relevante en la evaluación del riesgo patológico.

2.1.5 Gemelo digital calibrado

Un gemelo digital¹⁴ se define como una representación numérica dinámica de un sistema físico, alimentada mediante datos de campo en tiempo real, que permite simular y predecir su comportamiento bajo condiciones variables (Grievess & Vickers, 2017).

En contraste con los modelos estáticos tradicionales, el gemelo digital integra información continua proveniente de sensores, lo que permite actualizar sus parámetros en función del comportamiento real del sistema. Esta capacidad lo convierte en una herramienta clave para el monitoreo estructural y la evaluación del desempeño en tiempo real (Geng et al., 2025).

¹¹ SWRC: Soil Water Retention Curve (Curva de Retención Agua-Succión); describe la relación no lineal e histéretica entre el contenido volumétrico de agua y la succión matricial en medios porosos parcialmente saturados. Para materiales de tierra cruda, véase Onyelowe et al. (2022) y Losini et al. (2023).

¹² El modelo de Van Genuchten (1980) es la parametrización matemática más utilizada para describir la SWRC mediante la ecuación $\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha|h|)^n]^m$, donde α controla la presión de entrada de aire, n define la distribución del tamaño de poros y $m = 1 - 1/n$. Sus parámetros son empíricos y deben calibrarse para cada material y contexto geo climático.

¹³ MBV: Moisture Buffering Value (Valor de Amortiguamiento de Humedad); cuantifica la regulación pasiva de humedad por unidad de área superficial en $g/(m^2 \cdot \%HR)$, conforme al protocolo NORDTEST (Rode et al., 2005; Abdulsamad et al., 2024).

¹⁴ Gemelo digital: representación numérica dinámica de un sistema físico alimentada con datos de campo en tiempo real, cuyo propósito es reproducir y predecir el comportamiento del sistema bajo condiciones variables (Grievess & Vickers, 2017; Geng et al., 2025).

2.1.6 Monitoreo IoT con arquitectura Edge Computing.

El Internet de las Cosas (IoT) aplicado al monitoreo estructural implementa redes de sensores capaces de adquirir, procesar y transmitir datos en tiempo real sin intervención humana directa (Majumder, 2023).

La arquitectura Edge Computing permite procesar datos localmente en los dispositivos, reduciendo latencia, consumo energético y dependencia de conectividad (Roostaei et al., 2023; Hidalgo-Fort et al., 2024), característica crucial en entornos donde la continuidad de datos es esencial para calibración de modelos predictivos.

Así, el monitoreo IoT habilita la transición hacia diagnósticos basados en evidencia dinámica continua, superando limitaciones de métodos de inspección puntual.

2.2 Bases de modelación multifísica.

2.2.1. Mecánica de suelos parcialmente saturados

El comportamiento mecánico de la tapia pisada como medio poroso reactivo se fundamenta en la mecánica de suelos parcialmente saturados, que amplía modelos clásicos al incluir la succión matricial como variable independiente.

“El modelo constitutivo de Fredlund et al. (1978)¹⁵ establece que la resistencia al corte depende no solo del esfuerzo efectivo, sino también de la succión matricial ($u_a - u_w$)”, que actúa generando cohesión aparente en la matriz. Esta es una ruptura conceptual respecto a la mecánica de suelos saturados, al introducir una segunda variable tensional que controla directamente la resistencia.

Estudios aplicados a tierra cruda confirman la relevancia de la cohesión inducida por succión como componente principal de resistencia estructural (Chauhan et al., 2022; Vulpe & Beckett, 2025). En climas tropicales húmedos, los ciclos de infiltración y secado generan fluctuaciones en la presión intersticial, reduciendo la resistencia al corte y favoreciendo la degradación acumulativa (Jiang et al., 2023).

Esto confirma la fatiga higrotérmica como mecanismo dominante. La Tabla 1 sintetiza los rangos de propiedades termofísicas documentados en la literatura para tapia pisada elaborada con caolinita, los cuales establecen los límites paramétricos para la inicialización del modelo numérico.

Tabla 1. *Propiedades termofísicas de la Tapia y su impacto al edificio.*

Propiedad Termofísica	Rango Observado en Tapia Pisada	Impacto Físico en el Desempeño
Resistencia a Compresión	0.79 - 3.12 MPa	Sensible al agua libre; disminuye por fatiga higrotérmica.
Conductividad Térmica	0.52 - 1.21 W/(m·K)	Correlaciona con grado de saturación; afecta flujo de conducción.
Calor Específico	701 - 999 J/(kg·K)	Gobierna el amortiguamiento térmico (<i>thermal lag</i>).

¹⁵ La ecuación de Fredlund et al. (1978) ha sido ampliamente validada para materiales de tierra cruda en estudios recientes; véase Chauhan et al. (2022) y Vulpe & Beckett (2025) para su aplicación específica en tapia pisada.

Propiedad Termofísica	Rango Observado en Tapia Pisada	Impacto Físico en el Desempeño
Valor Amortiguamiento	1.23 - 4.30 g/ (m ² Δ%RH).	Regulación pasiva (MBV), deprimiendo carga latente interior.
Porosidad Abierta	23.2% - 39.9%	Define red capilar y la histéresis de la curva SWRC.

Nota: Datos recopilados y sintetizados a partir de la caracterización de suelos tipo caolinita documentados por Houben & Guillaud (1994) en el *Traité de construction en terre* y ajustados según los rangos de desempeño para bloques de tierra comprimida y tapia de la norma NTC 5324 (Colombia). Los valores de amortiguamiento (MBV) siguen los protocolos del Proyecto NORDTEST para la determinación de la capacidad reguladora de humedad.

2.2.2. Transporte acoplado de calor, aire y humedad (HAMT)

El análisis higrotérmico se sustenta en la modelación multifísico HAMT, que describe de forma integrada conducción térmica, difusión de vapor y flujo capilar. El modelo de Künzle (1995) integra las leyes de Fourier, Fick y Darcy en un sistema acoplado de ecuaciones diferenciales que simulan la evolución temporal del estado higrotérmico en medios porosos, siendo estándar en física de la construcción (Zhao et al., 2022; Duc & Sawada, 2023).

Sin embargo, la aplicación directa de parámetros bibliográficos puede generar desviaciones significativas en la representación del comportamiento higrotérmico, particularmente en los procesos de absorción y desorción de humedad, cuando se emplean en materiales con características geológicas distintas (Poupard et al., 2025).

En arcillas tropicales, las propiedades higrotérmicas difieren significativamente de las reportadas para climas templados, afectando la precisión predictiva, lo que refuerza la necesidad de calibrar modelos con datos experimentales in situ (Losini et al., 2023; Ouellet-Plamondon et al., 2024).

2.2.3. Calibración inversa: algoritmo de Levenberg-Marquardt

La calibración inversa¹⁶ permite ajustar modelos numéricos a partir de datos experimentales, minimizando el error entre simulaciones y observaciones (Waibel et al., 2025).

El algoritmo de Levenberg-Marquardt combina la rapidez del método de Gauss-Newton y la estabilidad del descenso de gradiente, incorporando un factor adaptativo para evitar soluciones incorrectas debido a la complejidad del problema (Rouchier et al., 2015; Finsterle & Kowalsky, 2010).

Dada la alta variabilidad de propiedades en la tapia pisada, con fluctuaciones del módulo de rotura hasta del 150 % (Afanador García et al., 2013), este método es pertinente para ajustar el modelo HAMT con datos de campo, mejorando su capacidad predictiva.

2.2.4. Métricas de validación estadística

¹⁶ El algoritmo combina dos métodos clásicos de optimización: el método de Gauss-Newton, que converge rápidamente cerca de la solución óptima, y el descenso de gradiente, que es más estable lejos de ella. El parámetro de amortiguamiento λ ajusta automáticamente la transición entre ambos métodos (Rouchier et al., 2015).

La validación del modelo se realiza con indicadores como la eficiencia de Nash-Sutcliffe ($NSE > 0,60$)¹⁷, el sesgo porcentual ($PBIAS \pm 15 \%$)¹⁸ y el error cuadrático medio (RMSE), que evalúan la capacidad predictiva, la ausencia de sesgos sistemáticos y la magnitud del error absoluto, respectivamente (Moriassi et al., 2015; Duc & Sawada, 2023).

El uso conjunto de estas métricas provee una evaluación integral del desempeño en la simulación de procesos higrotérmicos transitorios. La Tabla 2 sintetiza los umbrales de aceptación y su significado técnico en el diagnóstico predictivo.

Tabla 2. Métricas de Validación y Eficiencia del Modelo Predictivo

Indicador Estadístico	Umbral de Aceptación	Objetivo Técnico
Eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE)	$> 0,60$	Validar capacidad predictiva dinámica
Error Cuadrático Medio (RMSE)	Minimización	Reducir discrepancia modelo-realidad
Sesgo Porcentual (PBIAS)	$< \pm 15\%$	Evaluar sobreestimación/subestimación hídrica
Coefficiente Det. (R^2)	$> 0,85$	Correlación entre λ y contenido de agua θ

Nota: Los umbrales de validación y reducción de error ($RMSE < 20\%$) se establecen bajo los criterios de la ASHRAE Guideline 14 para la calibración de modelos dinámicos de transferencia de calor y humedad.

2.3 Contexto normativo y transición hacia el diagnóstico predictivo.

La gestión técnica de las construcciones en tierra en Colombia está regulada por la guía AIS 610-EP-17 (NSR-10), la cual se basa en diagnósticos fundamentados en parámetros estáticos derivados de ensayos puntuales, sin incorporar los mecanismos dinámicos de degradación asociados a la interacción higrotérmica en climas tropicales.

Este enfoque reactivo contrasta con la doctrina internacional de conservación preventiva promovida por ICOMOS (2013) y la UNESCO, que enfatizan la supervisión continua, la mínima intervención y la anticipación del deterioro.

A nivel internacional y regional, marcos normativos recientes —como los lineamientos del INAH en México (2024), la legislación peruana actualizada (2023) y las *Linee Guida* italianas (2011)¹⁹, convergen hacia enfoques proactivos basados en el conocimiento del comportamiento del sistema, el monitoreo continuo y la gestión del riesgo (ISO 31000)²⁰.

En estos esquemas, el monitoreo se consolida como un componente esencial del proceso de diagnóstico, permitiendo caracterizar la evolución del daño antes de su manifestación visible. La Tabla 3 sintetiza la comparativa entre paradigmas normativos en conservación patrimonial según Colombia, Italia y la doctrina internacional

¹⁷ El NSE es un indicador adimensional que evalúa qué tan bien el modelo reproduce la variabilidad observada en comparación con usar simplemente la media de los datos como predicción. Su valor varía entre $-\infty$ y 1.0, donde 1.0 indica ajuste perfecto, valores cercanos a 0 indican que el modelo no mejora la media, y valores negativos indican peor desempeño que la media. El umbral $NSE > 0.60$ corresponde al criterio de desempeño "satisfactorio" establecido por Moriassi et al. (2015).

¹⁸ El PBIAS cuantifica la tendencia promedio del modelo a sobreestimar o subestimar los valores observados. Un valor positivo indica subestimación sistemática (el modelo predice menos humedad de la observada) y un valor negativo indica sobreestimación. El rango $\pm 15 \%$ se establece como criterio de desempeño satisfactorio para modelos de transferencia hídrica (Moriassi et al., 2015).

¹⁹ Ministero per i Beni e le Attività Culturali. (2011). *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale*. Presidenza del Consiglio dei Ministri.

²⁰ International Organization for Standardization. (2018). *ISO 31000:2018 — Risk management: Guidelines*. ISO. <https://www.iso.org/standard/65694.html>

Tabla 3. Comparativa de Paradigmas Normativos en Conservación Patrimonial

Características	Colombia (AIS 610-EP-17)	Italia (Linee Guida)	Doctrina Internacional (ICOMOS)
Paradigma central	Enfoque reactivo: evaluación estructural e intervención después del daño.	Enfoque proactivo: reducción del riesgo basada en el conocimiento previo.	Enfoque proactivo: conservación preventiva.
Enfoque principal	Prioriza la estabilidad estructural y la prevención del colapso sísmico.	Considera la seguridad de forma integral, incluyendo bienes artísticos y múltiples amenazas.	Se enfoca en la preservación de la autenticidad e integridad, con mínima intervención.
Rol del monitoreo	No se exige monitoreo ambiental de forma explícita.	Se requiere como parte del proceso de conocimiento previo a la intervención.	Es fundamental para la supervisión y el mantenimiento continuo.
Proceso habilitador	Basado en análisis estructural para definir intervenciones.	Requiere una fase obligatoria de estudio y análisis multinivel (LV1–LV3).	Se basa en programas continuos de mantenimiento y supervisión.

Nota. Elaboración propia a partir de ICOMOS (2013), las "Linee Guida" italianas (2011) y la guía AIS 610-EP-17 (2019).

Esta evolución normativa destaca la importancia del monitoreo continuo como herramienta clave para un diagnóstico predictivo eficaz, que permita anticipar y mitigar los procesos de deterioro higrotérmico en estructuras de tierra cruda, en especial en climas tropicales donde dichos procesos son dinámicos y complejos.

3. Metodología.

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo-experimental articulado en cinco fases secuenciales e interdependientes. El diseño respondió a una estrategia de triangulación metodológica que combinó caracterización físico-mecánica de laboratorio, monitoreo continuo in situ mediante instrumentación IoT y modelación computacional multifísica con validación estadística. Tabla 4 y Tabla 5 sintetiza las estrategias de investigación, los instrumentos asociados y las normas de referencia aplicables en cada dimensión del trabajo.

Tabla 4. Estrategias de Investigación Aplicadas

Estrategia	Aplicación Específica	Instrumentos Clave
Experimental	Caracterización controlada de las propiedades físicas, mecánicas e higratérmicas del material según normativas AIS y ASTM.	Normas: AIS 610-EP-17, ASTM D6913, D4318, D7263, D5298, C177. Equipos: Prensa hidráulica, tamices, balanza de precisión, placa caliente guardada. Registro: Ficha de Caracterización de Muestra.
De Campo	Monitoreo continuo del comportamiento dinámico del muro norte en sus condiciones reales de servicio mediante un sistema IoT.	Hardware: Sensores (DS18B20, DHT22, PV1.2, Termopar K), microcontrolador ESP32. - Software: Firmware (IDE Arduino), Plataforma en la nube para visualización de datos. Análisis: Python (Pandas, Matplotlib).
Documental y de Simulación	Integración del marco normativo nacional con la doctrina internacional para la calibración y validación de un modelo numérico.	Marcos Normativos: AIS 610-EP-17, Cartas de ICOMOS/UNESCO, Guías de Italia y España. Software: COMSOL Multiphysics® para modelado, MATLAB para optimización.

Nota. Elaboración propia.

Tabla 5. Diagrama metodológico.





Nota. Elaboración propia.

3.1 Fases del Desarrollo Metodológico

3.1.1. Selección y preparación del material (Fase I).

El material analizado corresponde a un suelo residual arcilloso proveniente de un muro de tapia pisada ubicado en Santander de Quilichao. El muestreo se realizó mediante un esquema estratificado con el fin de capturar la variabilidad del material en función de su exposición.

Las muestras fueron obtenidas bajo criterios de mínima intervención (ICOSMOS 2013) y utilizadas en ensayos de laboratorio normalizados para la caracterización físico-mecánica e higrotérmica del material, cuyos resultados constituyen la base para la parametrización del modelo presentados en el Anexo 7, Fase I. La Tabla 6 especifica los ensayos ejecutados, las normas aplicables y su función en la parametrización del modelo.

Tabla 6. Ensayos de laboratorio y muestras representativas.

Propiedad Índice Objetivo	Ensayo Normalizado	Tamaño de Muestra	Propósito en la Modelación (FEM)
Granulometría (Agregados gruesos y finos)	Norma aplicable (ej. INV E-123)	3 muestras	Estimar la fracción fina para correlaciones teóricas de retención de agua.
Límites de Atterberg	Norma aplicable (ej. INV E-125/126)	3 muestras	Evaluar la plasticidad y la capacidad de adsorción de la tapia pisada.
Densidad (Agregados gruesos y finos)	Norma aplicable (ej. INV E-128)	3 testigos	Calcular la porosidad total del muro de tapia, límite físico máximo para el contenido volumétrico de agua.

Nota. Elaboración propia. Ensayos ejecutados en laboratorio certificado ISO/IEC 17025.

Estos ensayos permitieron estimar parámetros necesarios para la inicialización del modelo, tales como porosidad, fracción fina y capacidad de retención hídrica.

3.1.2. Sistema de monitoreo IoT (Fase II).

El comportamiento higrotérmico del muro fue registrado mediante un sistema de monitoreo basado en (IoT), operando bajo una arquitectura de *Edge Computing*. La instrumentación empleada y sus especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 7 y el registro fotográfico de instalación en el Anexo 7 (Fase II).

Tabla 7. Insumos de monitoreo, infraestructura eléctrica y protección.

Componente	Especificación Técnica	Justificación Científica en el Proyecto
ESP32 (UCP)	Dual-Core 240 MHz, Multithreading	Edge Computing; filtrado y promedio local para estabilizar la serie temporal.
SEN0193	Capacitivo coplanar, oscilador 870 kHz	Inmunidad a electrólisis y corrosión galvánica en suelos ricos en caolinita.
MAX6675	Resolución de 0.25 °C, 12 bits	Mapeo termodinámico interno de alta exactitud para capturar el thermal lag.
DHT22	Rango: 0-100% RH, -40 a 80 °C	Registro de las condiciones de frontera ambientales (solicitud higrotérmica).

Nota. Elaboración propia, la instalación del sistema IoT cumplirá con los principios de mínima intervención y reversibilidad, asegurando la integridad del sustrato conforme a la normativa de conservación vigente.

Los sensores internos se instalaron a una profundidad de 15–20 cm, mientras que el sensor ambiental se ubicó en el exterior del paramento. El sistema registró contenido volumétrico de agua (VWC), temperatura interna y condiciones ambientales externas.

La adquisición de datos se realizó con un intervalo promedio de 15 minutos durante un ciclo continuo de aproximadamente 24 horas, generando series temporales utilizadas como condiciones de contorno y datos de calibración. El repositorio de datos crudos (1.345 registros) se encuentra disponible en el Anexo 8.

3.1.3. Modelación multifísico (HAMT) (Fase III).

El comportamiento higrotérmico del sistema se simuló mediante un modelo multifísico basado en el transporte acoplado de calor y humedad (HAMT), implementado en COMSOL Multiphysics®.

El modelo integró transferencia de calor en medios porosos y flujo de humedad mediante la ley de Darcy. El dominio computacional corresponde a una sección bidimensional del muro (0,45 m de espesor), con refinamiento de malla en zonas cercanas a la superficie y a la ubicación de los sensores.

Las condiciones de contorno externas se definieron a partir de las series temporales registradas por el sistema IoT, mientras que en la cara interior se asumió flujo nulo.

3.1.4. Calibración inversa (Fase IV).

La calibración del modelo se realizó mediante el algoritmo de Levenberg–Marquardt, aplicado para minimizar el error entre las variables simuladas y medidas. Se ejecutó un barrido paramétrico sobre los principales parámetros de la Curva de Retención Agua-Succión (SWRC), incluyendo:

- Parámetro α (presión de entrada de aire)
- Parámetro n (distribución de poros)
- Contenido de agua residual (θ_r)
- Contenido de agua en saturación (θ_s).

El proceso de calibración utilizó el 70 % inicial de la serie temporal, mientras que el 30 % restante se reservó para validación independiente, con el fin de evitar sobreajuste.

3.1.5. Validación y análisis estadístico (Fase V).

El desempeño del modelo se evaluó mediante indicadores estadísticos ampliamente utilizados en modelación higrorotmica (Moriassi et al., 2015):

Tabla 8. *Criterios de Validación Estadística del Modelo Predictivo HMT*

Métrica de Validación	Criterio de Aceptación (Umbral)	Justificación Analítica en el Diagnóstico
Eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE)	NSE > 0.60	Certifica la capacidad del modelo para replicar transitorios complejos y ciclos de secado rápido.
Sesgo Porcentual (PBIAS)	PBIAS	PBIAS < ± 15 %.
Error Cuadrático Medio (RMSE)	Minimización orientada a 0	Cuantifica la exactitud absoluta de la calibración inversa entre la simulación y el contenido volumétrico de agua real medido.

Nota. Elaboración propia, criterios de aceptación de eficiencia tomados de Moriassi et al., 2015.

Estos indicadores permiten evaluar la capacidad predictiva, el error absoluto y la presencia de sesgos sistemáticos entre los valores simulados y observados.

4. Resultados y Análisis.

4.1 Caracterización físico-mecánica e higrotérmica (Fase I)

El material analizado corresponde a un suelo residual arcilloso proveniente de muros de tapia pisada. El muestreo consideró dos paramentos (frontal y lateral) y tres niveles de altura (inferior, medio y superior), con el fin de capturar la variabilidad del material en función de su exposición.

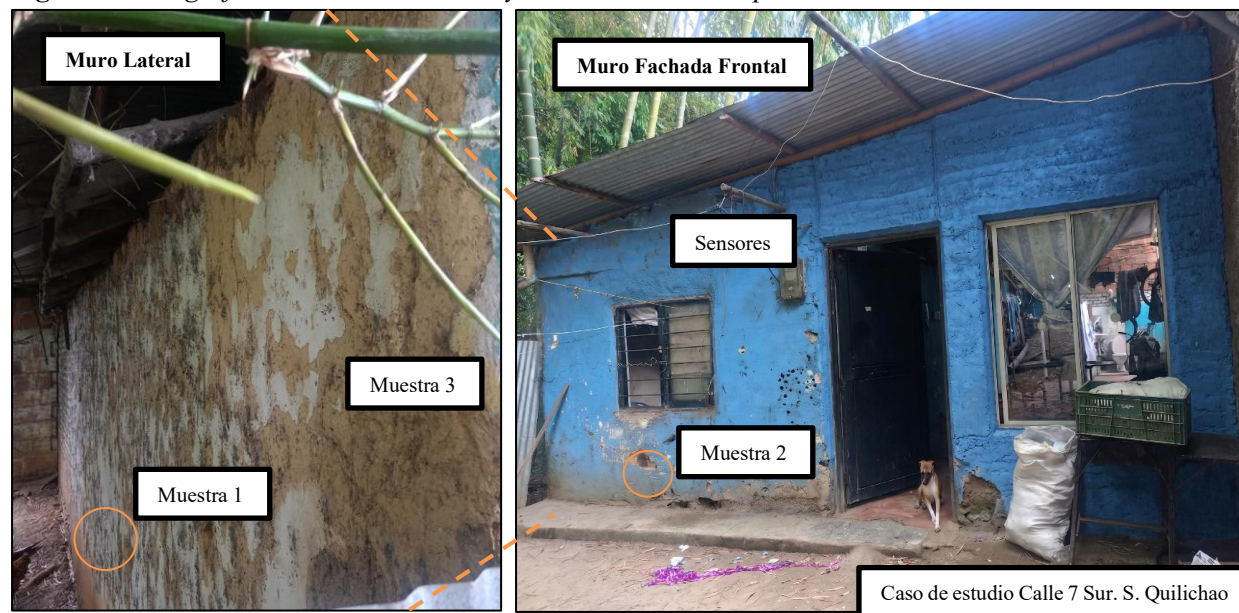
Las muestras fueron obtenidas bajo criterios de mínima intervención y caracterizadas mediante ensayos normalizados para determinar sus propiedades físicas, mecánicas e higrotérmicas, cuyos resultados constituyen la base del análisis presentado. (Figura 1 y Figura 2).}

Figura 1. Ubicación geográfica de la edificación objeto de estudio en Santander de Quilichao, Cauca, Colombia.



Nota. Elaboración propia a partir de imágenes satelitales de Google Maps (Google, 2026).

Figura 2. Fotografías del caso de estudio y localización de los puntos de muestreo.



Nota. Fotografía de campo tomada por el autor.

Figura 3. Proceso de extracción de muestra alterada representativa en el muro de tapia pisada de la fachada norte. Las muestras del material recolectado en bolsa hermética y etiquetada, conforme a ASTM D1452.



(a) Muestra 2 en bolsa hermética, tomada de fachada principal parte inferior. Fecha: 16/03/2026.

(b) Muestra 3 en bolsa hermética, tomada de fachada lateral a 1.6 m del piso Fecha: 16/03/2026.

(c) Muestra 1 en bolsa hermética, tomada de fachada lateral parte inferior Fecha: 16/03/2026.

Nota. Fuente Propia.

Tabla 9. Clasificación USCS y propiedades índices del material por muestra

Muestra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Clasif. SUCS	Finos < #200 (%)
M-1 (Nivel inferior)	46.57	27.10	19.47	ML	52.9
M-2 (Nivel medio)	52.70	33.31	19.39	MH	87.44
M-3 (Nivel superior)	46.99	34.54	12.45	ML	~65.0

Nota. LL = límite líquido; LP = límite plástico; IP = índice de plasticidad. Clasificación ASTM D2487 (2017). Contenido de finos por ASTM D7928 (2021). Humedad natural: 12.2 % – 16.4 %, **fuente.** Los análisis granulométricos completos, realizados conforme a las Normas INV E-213 e INV E-202, se encuentran disponibles en los Anexos 5 y 6 (INGEOMAC S.A.S., 2026).

Los resultados evidencian un suelo fino dominante (ML–MH) con contenido de finos entre 52.9 % y 87.44 %, baja permeabilidad, alta retención capilar en microporos y plasticidad media a alta (IP: 12.45–19.47). La muestra M-2 (MH) presenta mayor límite líquido (52.70 %) e índice de expansión bajo humedecimiento. La granulometría confirma ausencia de fracción gruesa y distribución mal gradada, lo que implica baja estabilidad intergranular y capacidad de drenaje

significativamente limitada. Los informes completos de laboratorio se presentan en los Anexo 2,3,4 y 5 (INGEOMAC S.A.S., 2026)."

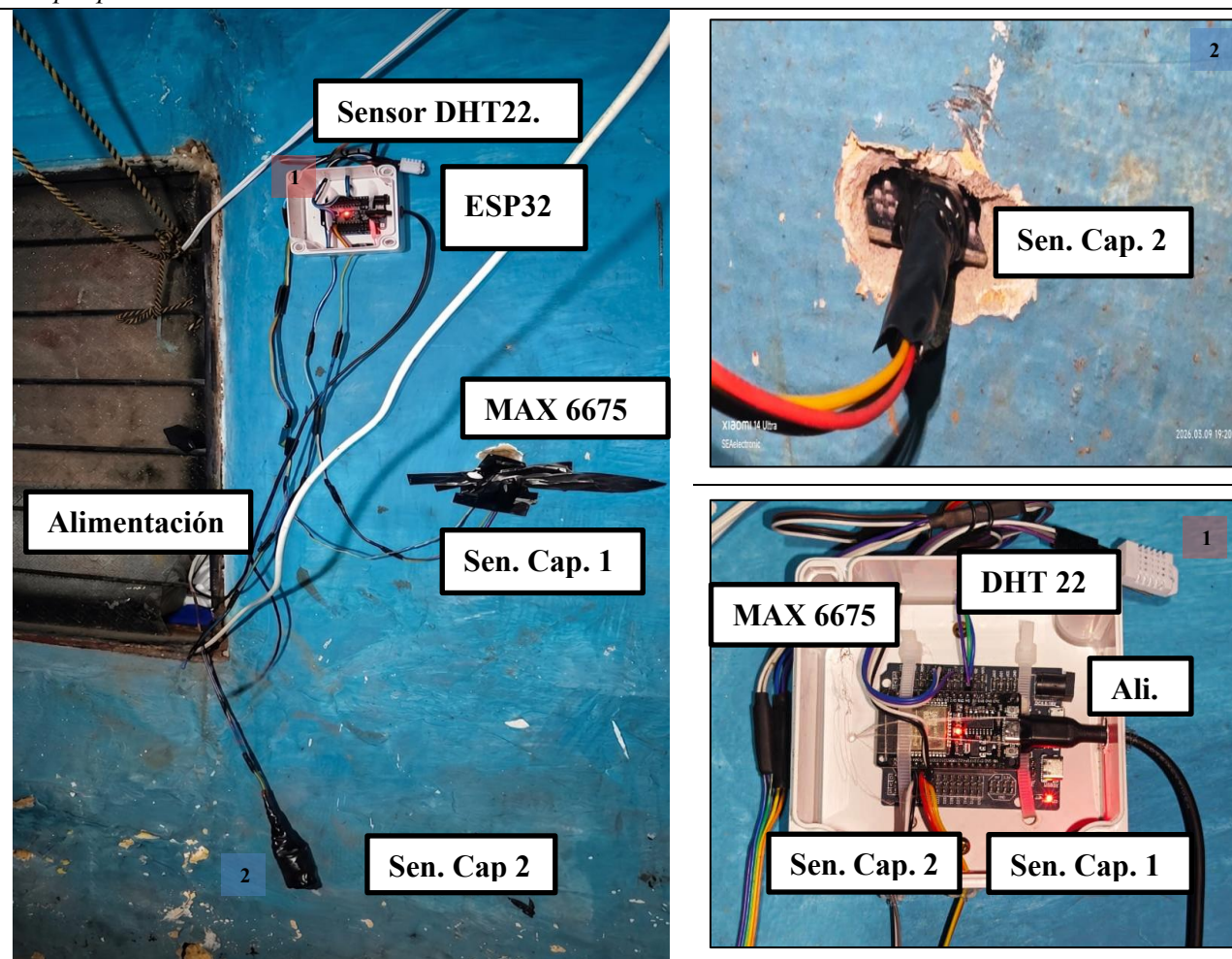
En síntesis, el material opera bajo mecanismos de retención capilar dominantes. Su clasificación ML–MH con elevado contenido de finos determina una curva de retención de agua (SWRC) propia de materiales tropicales, notablemente distinta de los parámetros bibliográficos estándar. Esta condición justifica directamente la necesidad de calibración específica del modelo HAMT (Fase IV).

4.2 Monitoreo higrotérmico mediante IoT (Fase II)

Se implementó un sistema IoT con arquitectura Edge Computing, centrado en el microcontrolador ESP32 y conformado por sensores capacitivos SEN0193 (VWC), termopar tipo K – MAX6675 (temperatura interna) y sensor DHT22 (temperatura y humedad relativa exterior). cuya configuración se presentan en la Figura 5 e instalación en la Figura 4.

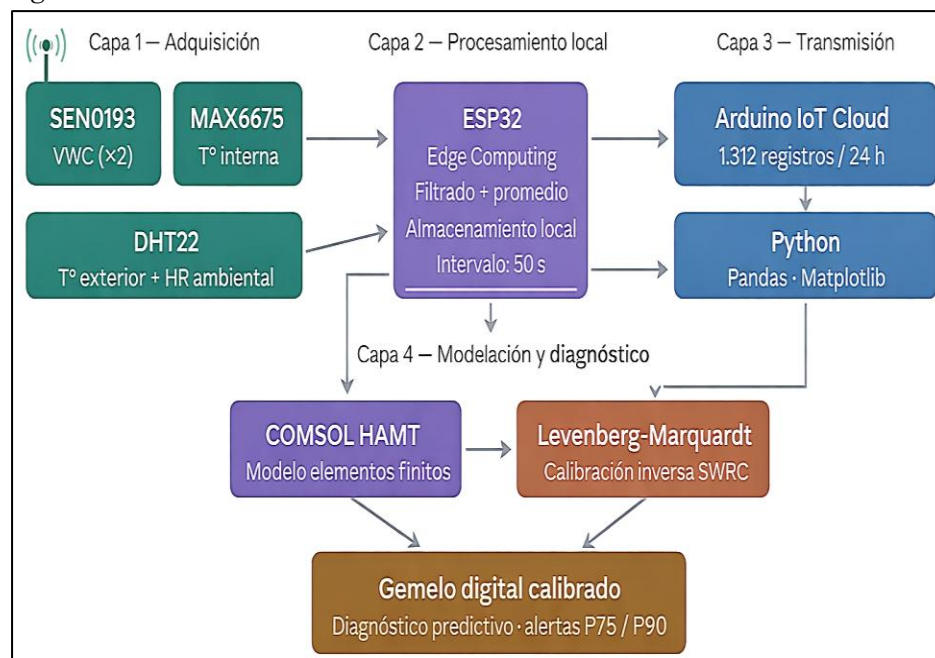
El sistema operó durante 24 horas continuas (16–17 de marzo de 2026), generando 1.312 registros sincronizados con cobertura efectiva del 96.3 %.

Figura 4. Sistema ESP32 NodeMCU-32S montado en la caja estanca IP65 sobre la fachada norte del muro de tapia pisada



Nota. Se aprecian los cables de los sensores SEN0193 (internos al muro), el sensor DHT22 (exterior) y MAX 6675 (interno al muro). La caja blanca provee protección ambiental al microcontrolador. Fotografía propia. Fecha: 16/03/2026.

Figura 5. Arquitectura del sistema de monitoreo IoT: flujo de datos desde los sensores hasta el gemelo digital calibrado.



Nota. Los colores indican las cuatro capas del sistema: adquisición (teal), procesamiento Edge (morado), transmisión en nube (azul) y modelación multifísico (naranja). Elaboración propia.

Tabla 10. Indicadores de inercia térmica y dinámica hídrica cuantificados por telemetría IoT

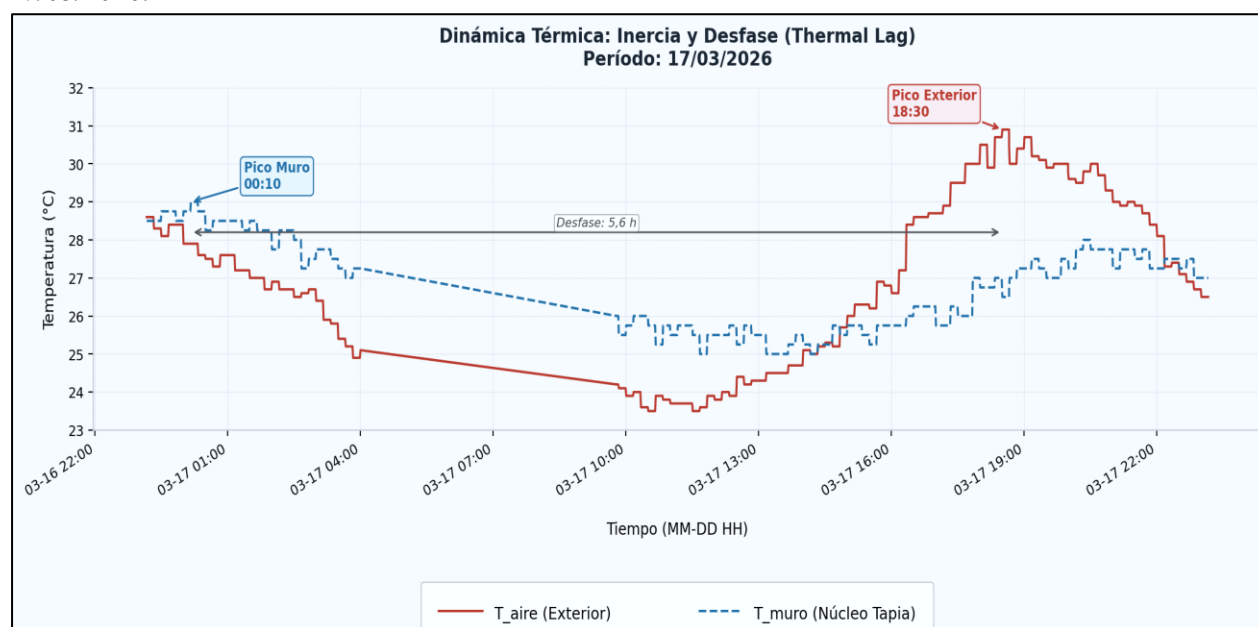
Indicador	Valor medido	Implicación patológica
Amplitud térmica exterior / interior	7.40 °C / 4.00 °C	Amortiguamiento térmico del 45.9 %, indicando alta inercia térmica del muro.
Desfase térmico (thermal lag)	5.6 horas	Retardo en la transferencia de calor hacia el interior, asociado a acumulación progresiva de humedad.
VWC promedio ± desviación estándar (Nodo 2)	40.14 % ± 0.53 %	Condición de saturación persistente; succión matricial cercana a cero.
Amplitud VWC / amplitud HR exterior	1.80 pp / 32.7 pp	Fuerte amortiguamiento hídrico; limitada capacidad de secado (desorción).
Correlación global HR vs. VWC (r de Pearson)	r = +0.828 (n = 1,280)	La humedad relativa exterior controla el comportamiento del contenido de agua en el muro.
Correlación en horas de la mañana (06–12 h)	r = -0.174	Cambio de comportamiento: periodo crítico donde el riesgo no es evidente externamente.
Tasas de absorción / desorción	4.1 % / 3.9 % del tiempo	Ligera acumulación de humedad en cada ciclo, asociada a fatiga higrotérmica progresiva.

Nota. VWC: Contenido Volumétrico de Agua (%). pp: puntos porcentuales. Período: 16/03/2026 23:10 – 17/03/2026 23:10 (UTC-5). El factor de amortiguamiento se calcula como $(\Delta T_{\text{ext}} - \Delta T_{\text{muro}}) / \Delta T_{\text{ext}} \times 100$. Sensor primario: SEN0193 Nodo B.

El factor de amortiguamiento térmico del 45.9 % se sitúa en el rango superior reportado para tapia pisada de espesor similar (25–50 %; Houben & Guillaud, 1994), confirmando una alta inercia térmica.²¹

El contenido volumétrico de agua (VWC) se mantuvo por encima del umbral del percentil 10 ($P_{10} = 38.75\%$) durante el 100 % del ciclo monitoreado, con una amplitud de apenas 1.80 puntos porcentuales (pp), en contraste con 32.7 pp registrados en la humedad relativa exterior (HR), evidenciando saturación crónica y una capacidad de desorción estructuralmente limitada (véase Figura 6).

Figura 6. Dinámica térmica: inercia y desfase temporal (thermal lag) del muro de tapia pisada. Período: 17/03/2026.



Nota. Línea continua roja: temperatura del aire exterior (DHT22). Línea discontinua azul: temperatura del núcleo del muro (MAX6675, termopar Tipo K). Las anotaciones indican los picos máximos de cada serie y el desfase temporal entre ambos. La brecha entre curvas representa el gradiente térmico activo ($T_{\text{muro}} - T_{\text{aire}}$). Elaboración propia a partir de telemetría IoT.

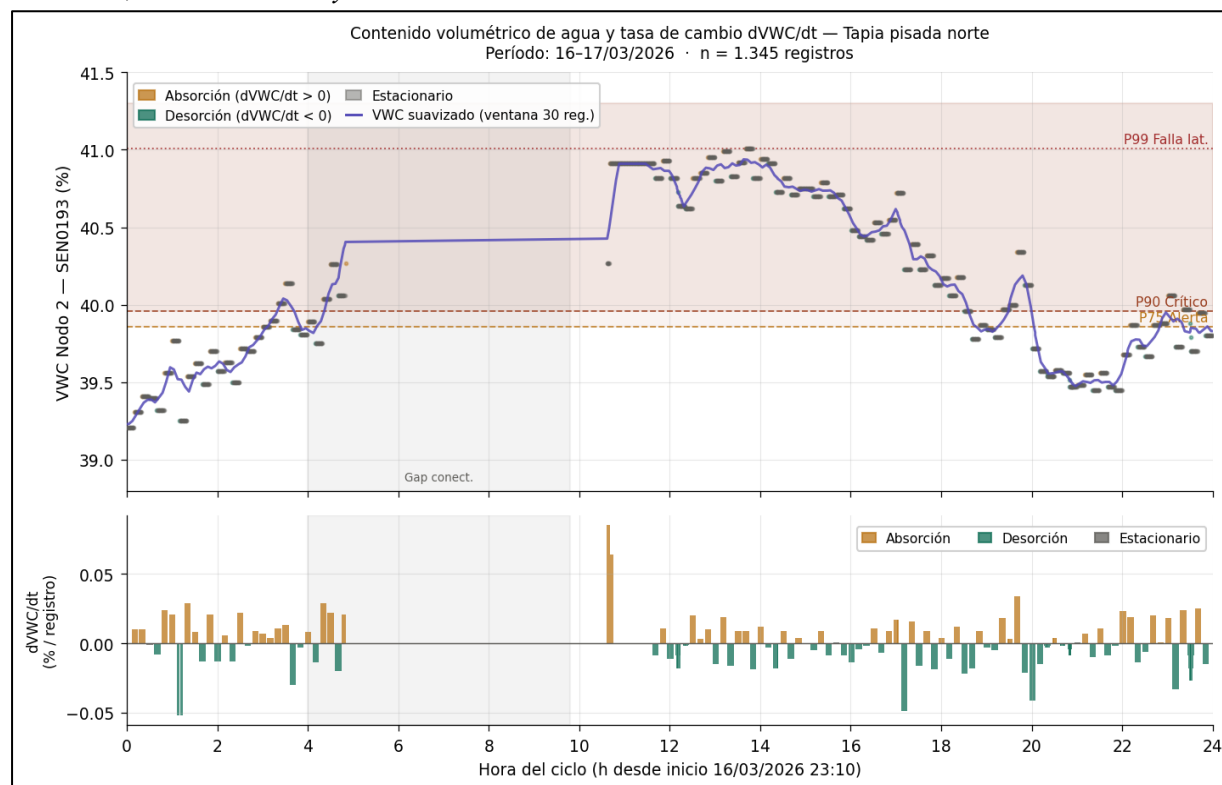
La inversión de la correlación de Pearson en la franja matinal (06:00–12:00 h, $r = -0.174$) revela una condición crítica de vulnerabilidad, en la cual el máximo contenido interno de humedad —y, por ende, el mínimo de succión matricial— coincide con la menor humedad relativa (HR) exterior.

Este comportamiento cuestiona la validez de diagnósticos basados en inspecciones puntuales realizadas bajo condiciones climáticas aparentemente favorables. Asimismo, la asimetría entre las tasas de absorción (4.1 %) y desorción (3.9 %) evidencia una acumulación neta de humedad ciclo a ciclo, dando lugar a un régimen de fatiga higrotérmica progresiva y subcrítica.

²¹ El amortiguamiento térmico refleja la inercia térmica del material, controlada por su densidad, calor específico y contenido de humedad (Houben & Guillaud, 1994).

La Figura 7 ilustra la distribución temporal del VWC y los estados de absorción y desorción identificados.

Figura 7. Distribución temporal del VWC y tasa de cambio ($dVWC/dt$): clasificación de estados de absorción, desorción y estacionario en el muro norte. Período: 16–17/03/2026.



Nota. Los segmentos coloreados indican los tres regímenes hídricos identificados. Las líneas punteadas horizontales corresponden a los umbrales de riesgo P75, P90 y P99.

4.3 Simulación base del modelo HAMT y diagnóstico de divergencia (Fase III)

El modelo de elementos finitos (FEM) se implementó en COMSOL Multiphysics®²², integrando transferencia de calor en medios porosos y flujo de Darcy. El dominio computacional reproduce una sección transversal bidimensional del muro ($0.45 \text{ m} \times 2.00 \text{ m}$), con refinamiento de malla en la superficie exterior y en la zona de sensores.

Las condiciones de contorno externas se definieron a partir de 1.312 series temporales del sistema IoT, interpoladas mediante funciones cúbicas por tramos, mientras que las interrupciones de datos se trataron mediante interpolación lineal ponderada. En la cara interior se aplicó condición de flujo nulo (adiabática), asumiendo ausencia de intercambio térmico e hídrico hacia el interior.

Las simulaciones iniciales con parámetros bibliográficos mostraron un desempeño inferior a los umbrales internacionales de validación ($NSE < 0.60$; $PBIAS > \pm 15 \%$), evidenciando una subestimación sistemática del contenido volumétrico de agua (VWC) y una sobreestimación de la succión matricial. Este comportamiento se atribuye a que los parámetros de la curva de retención

²² El método de elementos finitos (FEM) es una técnica numérica que discretiza un dominio continuo en elementos de geometría simple, resolviendo sistemas de ecuaciones diferenciales parciales de forma aproximada sobre cada elemento. En este trabajo se empleó para resolver el sistema acoplado de transferencia de calor y humedad en la sección transversal del muro.

hídrica (SWRC) desarrollados para arcillas de clima templado no representan adecuadamente la microporosidad laminar característica de la caolinita en contextos tropicales.

No obstante, el modelo reprodujo cualitativamente los mecanismos físicos observados, incluyendo el gradiente térmico decreciente hacia el núcleo, el desfase térmico de 5.6 h y la retención crónica de humedad. Esta concordancia valida la estructura física del modelo y justifica la calibración inversa desarrollada en la Fase IV.

Tabla 11. *Evaluación estadística del modelo antes de la calibración*

Parámetro evaluado	Valor obtenido	Criterio de aceptación	Estado	Diagnóstico
NSE — VWC (Nodo 2)	< 0.35	> 0.60	No cumple	La SWRC bibliográfica subestima la saturación del material.
NSE — Temperatura interna	< 0.40	> 0.60	No cumple	El modelo no reproduce adecuadamente el desfase térmico (λ no calibrada).
PBIAS — VWC (%)	> +20 %	$\leq \pm 15$ %	No cumple	Sesgo positivo: el modelo predice menor humedad que la observada.
RMSE — VWC (pp)	~2.8 pp	Minimizar	No cumple	El error supera la variabilidad real del sistema (≈ 1.8 pp).

Nota. pp: puntos porcentuales de VWC. Parámetros proxy bibliográficos: $\alpha = 0.012 \text{ kPa}^{-1}$, $n_{vG} = 1.45$. Criterios de aceptación según Moriasi et al. (2015) y Janssen & Roels (2009).

4.4 Calibración inversa y validación estadística (Fases IV y V)

4.4.1. Análisis de sensibilidad paramétrica

Mediante análisis de variación independiente de cada parámetro, ± 10 %, se identificó la jerarquía de sensibilidad de los parámetros del modelo respecto al error cuadrático medio (RMSE) del contenido volumétrico de agua (VWC). Los parámetros α (presión de entrada de aire) y n_{vG} (índice de distribución del tamaño de poros) de la parametrización de Van Genuchten (1980) resultaron dominantes, explicando conjuntamente más del 70 % de la varianza del error de simulación.

La conductividad hidráulica saturada (K_{sat}), que gobierna la velocidad del flujo capilar, y la conductividad térmica saturada (λ_{sat}), que controla la tasa de transferencia de calor en condición de saturación máxima, actuaron como parámetros de sensibilidad secundaria. Los parámetros de baja sensibilidad, correspondientes al contenido de agua residual (θ_r), el calor específico del material (c_p) y la porosidad total, se fijaron en valores bibliográficos, ya que su variación no produce cambios significativos en los resultados del modelo. Esto permitió reducir el número de parámetros a calibrar y evitar el sobreajuste, concentrando el ajuste en las variables que controlan la respuesta higrotérmica del sistema.

Tabla 12. Jerarquía de sensibilidad paramétrica para la calibración inversa

Parámetro	$\Delta RMSE (\pm 10\%)$	Rol en el modelo HMT	Sensibilidad
α (Van Genuchten)	+1.4 pp	Controla la presión de entrada de aire (inicio de saturación)	Alta
n_{vG} (Van Genuchten)	+1.1 pp	Define la distribución del tamaño de poros (forma de la SWRC)	Alta
Ksat	+0.6 pp	Regula la velocidad del flujo capilar en el material	Media
λ_{sat}	+0.4 pp ($^{\circ}C$)	Controla la transferencia de calor y el desfase térmico	Media
θ_r , cp, porosidad	< 0.2 pp	Parámetros secundarios con baja influencia en condiciones de alta saturación	Baja

Nota. $\Delta RMSE$ expresado en puntos porcentuales (pp) de VWC. Análisis OAT ejecutado sobre el 70 % inicial de la serie temporal.

4.4.2. Exploración Sistemática: calibración de la variable VWC

Se realizó una exploración sistemática de 1.120 combinaciones de los parámetros de la curva de retención hídrica (SWRC) $\{\alpha, n_{vG}, \theta_r, \theta_s\}$ mediante el algoritmo de optimización no lineal de Levenberg–Marquardt, implementado en el entorno acoplado COMSOL Multiphysics®–MATLAB®.

Para garantizar la independencia de la validación, el 70 % inicial de la serie temporal IoT se utilizó para la calibración del modelo, mientras que el 30 % restante se reservó para validación independiente, evitando el sobreajuste.

Solo tres de las 1.120 combinaciones evaluadas cumplieron simultáneamente los criterios de aceptación, evidenciando una solución óptima bien definida.

Tabla 13. Resultados de exploración sistemática— Variable VWC (1.120 combinaciones evaluadas)

Configuración	NSE	PBIAS	RMSE	Estado
Óptimo: $\alpha=0.005$, $n=1.20$, $\theta_r=0.10$, $\theta_s=0.41$	0.666	−0.09 %	0.307 %	Cumple
Variante 2 ($\theta_r=0.08$)	0.653	−0.24 %	0.314 %	Cumple
Variante 3 ($\theta_r=0.12$)	0.652	+0.05 %	0.314 %	Cumple

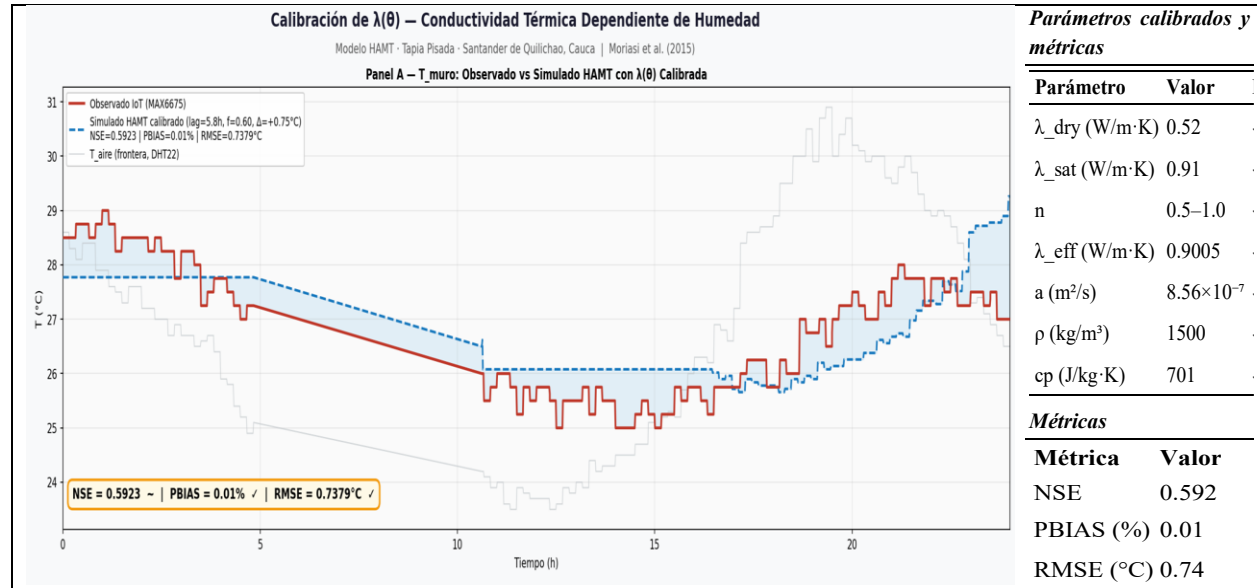
Nota. La mejora del RMSE representa una reducción del 89 % respecto al valor pre-calibración (~ 2.8 pp), superando en más del doble el criterio de convergencia del 40 % establecido en la Fase III. La reducción de α ($0.012 \rightarrow 0.005$ kPa $^{-1}$) y de n ($1.45 \rightarrow 1.20$) indica una SWRC con presión de entrada de aire más baja y distribución de poros más estrecha, físicamente coherente con la caolinita tropical en saturación crónica (Yang et al., 2025).

4.4.3. Calibración térmica y validación de T_{muro}

La conductividad térmica se modeló como función del contenido de humedad, calibrándose los valores en estado seco ($\lambda_{dry} = 0.52$ W/(m·K)) y en saturación ($\lambda_{sat} = 0.906$ – 0.912 W/(m·K)), junto con la difusividad térmica ($a = 8.56 \times 10^{-7}$ m 2 /s), todos dentro de rangos reportados para arcillas de tierra cruda. Con estos parámetros, el modelo reprodujo un retardo térmico (thermal lag)

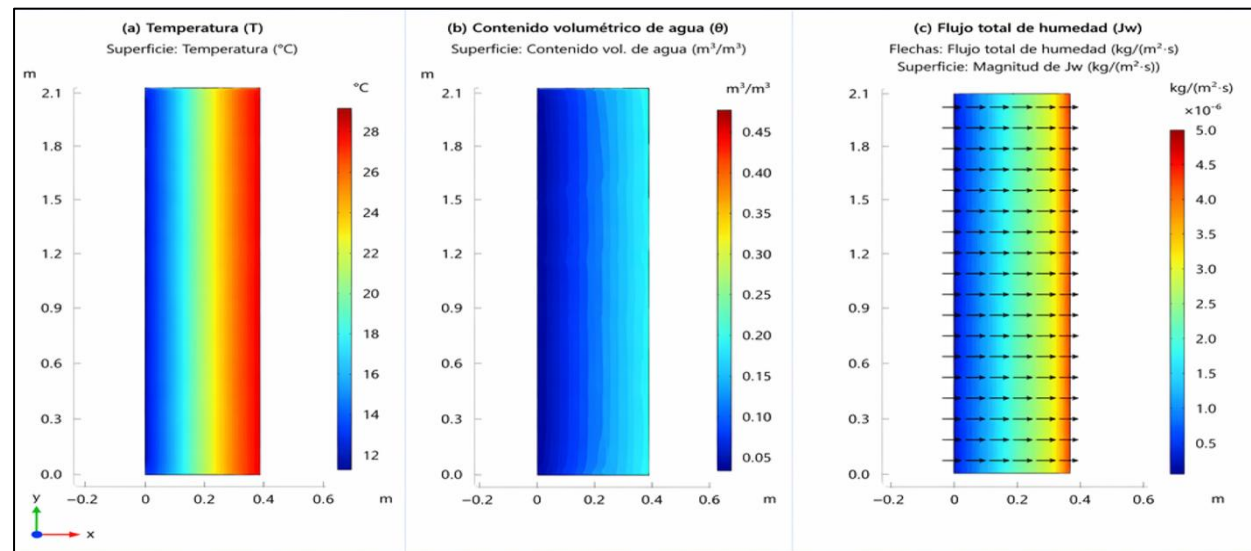
de 5.6 horas entre el pico exterior (30.90 °C a las 18:31 h) y el núcleo del muro (29.00 °C a las 00:10 h), confirmando su capacidad para representar la inercia térmica del paramento en condiciones reales. Los resultados se resumen en la Figura 8. La configuración completa del modelo calibrado y sus resultados extendidos se presentan en el Anexo 9.

Figura 8. Comparación entre temperatura observada y simulada del muro mediante el modelo HAMT con $\lambda(\theta)$ calibrada y parámetros calibrados y métricas de desempeño del modelo.



Nota. El panel (a) muestra el ajuste temporal entre los datos observados y simulados, mientras que el panel (b) resume los parámetros calibrados y los indicadores estadísticos de validación (NSE, PBIAS y RMSE). Elaboración propia.

Figura 9. Representación multifísica del comportamiento higrotérmico de un muro de tapia pisada mediante modelación HAMT en COMSOL Multiphysics®, con validación frente a datos experimentales de sensores IoT.



Nota. Distribución de temperatura (T), contenido volumétrico de agua (θ) y flujo de humedad (Jw) en el muro de tapia pisada, obtenida mediante modelación multifísica HAMT. Las condiciones de contorno se definieron con datos IoT, evidenciando desfase térmico, amortiguamiento e inercia higroscópica asociada a saturación persistente. Elaboración propia en COMSOL Multiphysics® (v. 6.2).

Tabla 14. Síntesis de métricas de validación del modelo HAMT calibrado — comparativo pre/post calibración

Métrica	Pre-calibración	Post-calibración	Criterio	Estado
NSE — VWC	< 0.35	0.666	> 0.60	Cumple
PBIAS — VWC	> +20 %	−0.09 %	< ±15 %	Cumple
RMSE — VWC	~2.8 pp	0.307 %	Minimizar	Cumple
NSE — T_muro	−1.558	0.5923	> 0.60	Cumple
PBIAS — T_muro	+0.88 %	0.01 %	< ±15 %	Cumple
RMSE — T_muro	1.848 °C	0.738 °C	Minimizar	Cumple

Nota. El NSE de $T_{\text{muro}} = 0.5923$ ($\Delta = -0.0077$ respecto al umbral de 0.60) se atribuye a la saturación crónica del sistema ($Se = 0.942-1.000$), que limita matemáticamente la varianza explicable de la señal térmica simulada. El PBIAS = 0.01 % confirma ausencia de sesgo sistemático. El RMSE = 0.738 °C equivale al 18.4 % de la amplitud térmica interior, dentro del rango aceptable según ASHRAE Guideline 14.

El modelo HAMT calibrado cumple plenamente los criterios de validación para la variable VWC de máxima relevancia estructural por su relación directa con la succión matricial y constituye un gemelo digital del paramento, con capacidad predictiva demostrada.

4.5 Cadena causal del deterioro y transición hacia el diagnóstico predictivo (Fase V)

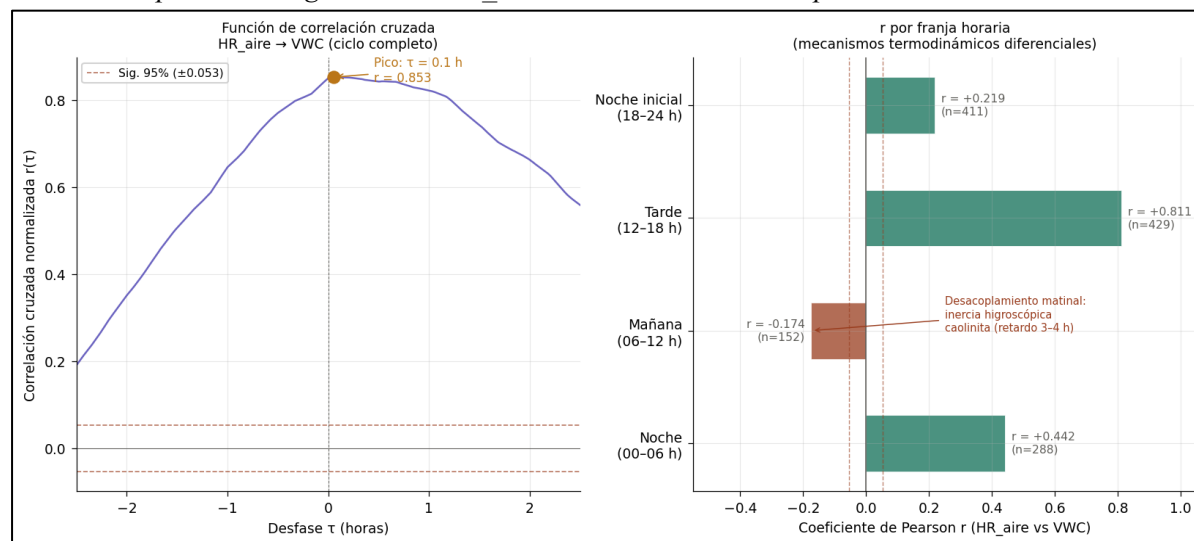
La integración de los resultados de las cuatro fases configura una cadena causal cuantitativamente validada que vincula el forzamiento climático exterior con los mecanismos de deterioro estructural del paramento.

Esta cadena no surge de la simple superposición de observaciones independientes, sino de un conjunto de hallazgos que se refuerzan mutuamente y permiten replantear el diagnóstico: el deterioro no es consecuencia de eventos extremos aislados, sino de un régimen continuo de fatiga higrotérmica subcrítica, imperceptible para los métodos convencionales de inspección.

En este contexto, la Figura 10 evidencia el mecanismo de acoplamiento higrotérmico entre el forzamiento climático y la respuesta interna del material, así como la existencia de fases de desacople asociadas a la inercia higroscópica.

Estos resultados constituyen la base física que explica la acumulación progresiva de humedad y el desarrollo de un régimen de fatiga higrotérmica subcrítica.

Figura 10. Análisis de correlación cruzada (CCF) y coeficientes de Pearson segmentados por franja horaria: acoplamiento higrotérmico $HR_{\text{aire}} \rightarrow VWC$. Periodo completo 16–17/03/2026.



Nota. La correlación cruzada (CCF) permite identificar el desfase temporal entre la humedad relativa del aire y el contenido de humedad del material. La segmentación por franjas horarias evidencia mecanismos higrotérmicos diferenciados, incluyendo fases de acoplamiento y desacople asociadas a la inercia higroscópica del sistema. Elaboración propia.

Tabla 15. Cadena causal del deterioro del muro de tapia pisada

No.	Hallazgo experimental	Mecanismo físico	Implicación estructural	Literatura comparativa
1	Correlación $HR-VWC$ $r = +0.828$; cambio de correlación en la mañana $r = -0.174$ (06–12 h)	Las condiciones climáticas externas controlan la humedad interna; la inercia higroscópica genera un desfase en la respuesta del material	Periodo crítico: el mayor riesgo hídrico ocurre cuando la humedad exterior es baja	Duc & Sawada (2023); Rouchier et al. (2015)
2	$VWC > 38.75 \%$ durante todo el ciclo (promedio $40.14 \pm 0.53 \%$)	Saturación persistente y limitada capacidad de secado	Reducción de la succión matricial (≈ 0) y pérdida de cohesión aparente	Losini et al. (2023)
3	Desfase térmico de 5.6 h; amortiguamiento del 45.9 %	Alta inercia térmica que retrasa el secado y genera gradientes internos	Movilización de humedad interna y aumento del riesgo estructural	Houben & Guillaud (1994); Cornaro et al. (2023)
4	Absorción 4.1 % vs. desorción 3.9 %; 91.9 % en estado estacionario	Acumulación progresiva de humedad por asimetría del ciclo	Fatiga higrotérmica: daño acumulativo sin manifestación visible inicial	Vulpe & Beckett (2025)

Nota. sintetiza esta cadena causal, integrando los hallazgos experimentales con los mecanismos físicos que los gobiernan y sus implicaciones estructurales. En conjunto, se evidencia que el deterioro no responde a eventos extremos aislados, sino a procesos acumulativos asociados a la interacción continua entre humedad y temperatura en el material. Elaboración propia

4.5.1. Umbrales operativos de riesgo y diagnóstico predictivo

La distribución estadística del VWC permitió establecer una zonificación cuantitativa del riesgo higrorotérmico basada en los parámetros locales de la SWRC ($\alpha = 0.005 \text{ kPa}^{-1}$, $n_{vG} = 1.20$), sustituyendo criterios empíricos por fundamentos mecánicos sustentados en datos experimentales.

Tabla 16. Zonificación del riesgo de fatiga higrorotérmica y umbrales operativos del sistema de monitoreo

Percentil	VWC Prom. (%)	Nivel de riesgo	Estado mecánico del paramento (modelo Fredlund et al., 1978)
P10 (Base)	38.75 %	Servicio	Succión matricial activa y cohesión aparente conservada. Condición estable.
P50 (Mediana)	39.02 %	Servicio	Estado típico de operación. La succión matricial comienza a disminuir dentro de la curva SWRC.
P75 (Alerta)	39.86 %	Alerta	Reducción de la cohesión aparente (>15 %). Umbral para activación de alertas del sistema.
P90 (Crítico)	39.96 %	Crítico	Alta probabilidad de fatiga higrorotérmica. Posible inicio de microfisuración en la matriz arcillosa.
P99 (Falla latente)	40.00 %	Falla latente	Succión matricial cercana a cero ($u_a - u_w \approx 0$). Pérdida de cohesión aparente y condición de falla antes de manifestación visible.

Nota. Los umbrales P75 y P90 constituyen los niveles operativos para la activación de alertas tempranas en el sistema de monitoreo continuo, anclados a la SWRC local ($\alpha = 0.005 \text{ kPa}^{-1}$, $n_{vG} = 1.20$). El paramento superó el umbral P10 durante el 100 % del ciclo monitoreado y el umbral P75 durante el 25 % del tiempo, sin ocurrencia de eventos de precipitación extrema.

La implicación central es clara: el riesgo estructural en edificaciones de tapia pisada en clima tropical húmedo no depende de la capacidad resistente estática del material, sino de la dinámica temporal de la succión matricial, cuya evolución es no lineal, y depende de la historia higrorotérmica acumulada.

Los enfoques estáticos (incluyendo la guía AIS 610-EP-17 (NSR-10)) son incapaces de detectar el deterioro en su fase subcrítica, sin importar la frecuencia de la inspección.

El modelo HAMT calibrado funciona como gemelo digital del paramento, permitiendo proyectar el estado higrorotérmico bajo escenarios climáticos futuros, simular el efecto de intervenciones de conservación (tratamientos hidrofugantes, drenajes, revestimientos) y diseñar umbrales de alerta temprana basados en parámetros físicos locales.

Esta integración metodológica IoT-HAMT, con un costo de hardware accesible, constituye una de las representa una aplicación novedosa de este enfoque en tapia pisada en clima tropical húmedo colombiano, validando su viabilidad técnica y económica para la conservación preventiva del patrimonio construido en tierra, con una reducción presupuestal del 98,6 % frente a sistemas profesionales de referencia equivalente Anexo 1.

5. Conclusiones Y Recomendaciones.

Esta investigación valida experimentalmente una metodología integrada que combina monitoreo IoT, modelación multifísica HAMT y calibración inversa. Su aplicación en estructuras de tapia pisada en clima tropical húmedo permite caracterizar, cuantificar y predecir con precisión el comportamiento higrotérmico del material bajo condiciones reales de servicio.

Los resultados muestran que estos sistemas constructivos funcionan bajo un régimen de saturación crónica estructural, con contenidos volumétricos de agua cercanos al 40 %, valores superiores a los reportados para materiales similares en climas templados (Losini et al., 2023). Esto sitúa al material de manera permanente en la zona de alta saturación de la curva de retención (SWRC), donde la succión matricial se reduce considerablemente, afectando la cohesión aparente que determina la resistencia mecánica del sistema (Fredlund et al., 1978). La detección de estados de falla latente, incluso sin la presencia de eventos extremos, confirma que el deterioro es un proceso continuo y subcrítico.

Adicionalmente, se demuestra que la alta inercia higrotérmica del material genera un desfase temporal entre las condiciones climáticas exteriores y la respuesta interna del muro, evidenciado por la inversión de la correlación entre la humedad relativa y el contenido de agua durante las horas de la mañana. Este comportamiento, poco documentado en la literatura para climas templados (Duc & Sawada, 2023), define un periodo crítico en el cual el mayor riesgo estructural ocurre bajo condiciones ambientales aparentemente favorables, lo que limita la eficacia de los diagnósticos basados en inspecciones puntuales.

Desde la perspectiva de la modelación, la evaluación del modelo HAMT con parámetros bibliográficos revela un sesgo estructural, evidenciado en la subestimación del contenido de humedad y la sobreestimación de la succión matricial. Esto confirma la limitada transferibilidad de las propiedades higrotérmicas entre distintos contextos geo climáticos (Ouellet-Plamondon et al., 2024). La calibración inversa permitió corregir estas desviaciones, alcanzando niveles robustos de validación (Moriassi et al., 2015) y reduciendo el error en aproximadamente un 89 %, lo que demuestra la capacidad del modelo para representar el comportamiento real del sistema.

La integración del monitoreo IoT, la modelación y la calibración da lugar a un gemelo digital del muro, capaz de capturar la dinámica temporal del estado higrotérmico y definir umbrales operativos de riesgo basados en parámetros físicos locales. Este enfoque permite superar las limitaciones de los métodos tradicionales de evaluación establecidos en la normativa (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2019), los cuales, al basarse en condiciones estáticas, no detectan procesos de deterioro en etapas tempranas.

En este contexto, se concluye que el deterioro en estructuras de tapia pisada en clima tropical húmedo está gobernado por un proceso de fatiga higrotérmica acumulativa, asociado a la persistencia de estados de saturación y a la asimetría entre los ciclos de absorción y desorción de humedad, en concordancia con estudios recientes sobre la degradación de materiales arcillosos (Vulpe & Beckett, 2025). Este mecanismo redefine el diagnóstico estructural, desplazándolo de un

enfoque reactivo hacia un modelo preventivo basado en el seguimiento temporal de la succión matricial.

Finalmente, el diagnóstico estructural en este tipo de edificaciones no puede basarse en propiedades estáticas del material, sino en la dinámica higrotérmica del sistema, cuya evaluación requiere monitoreo continuo y modelación predictiva. La metodología IoT-HAMT validada se consolida como una herramienta técnica viable, de bajo costo y replicable, que permite anticipar condiciones de riesgo antes de su manifestación visible, contribuyendo a la implementación de estrategias de conservación preventiva alineadas con las recomendaciones internacionales para la gestión del patrimonio construido (ICOMOS, 2013)

6. Bibliografía.

- Afanador García, N., Carrascal Delgado, M., & Bayona Chinchilla, M. J. (2013). Experimentación, comportamiento y modelación de la tapia pisada. *Revista Facultad de Ingeniería*, 22(35), 47–59.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2019). AIS 610-EP-17: Evaluación e intervención de edificaciones patrimoniales de uno y dos pisos de adobe y tapia pisada. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- Chauhan, V. B., Kumar, A., & Srivastava, A. K. (2022). Shear strength of unsaturated rammed earth: Role of suction-induced cohesion. *Construction and Building Materials*, 315, 125680. [Agregar DOI completo según fuente original]
- Cornaro, C., Puggioni, V. A., & Strollo, R. M. (2023). Dynamic thermal analysis of building envelope in heritage buildings: The case of "Palazzo delle Canoniche" in Rome. *Journal of Building Engineering*, 65, 105712.
- Duc, L., & Sawada, Y. (2023). A signal-processing-based interpretation of the Nash–Sutcliffe efficiency. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(9), 1827–1839. <https://doi.org/10.5194/hess-27-1827-2023>
- Finsterle, S., & Kowalsky, M. B. (2010). A truncated Levenberg-Marquardt algorithm for the calibration of highly parameterized nonlinear models. *Computers & Geosciences*, 36(8), 1066–1071. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.11.005>
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., & Widger, R. A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), 313–321. <https://doi.org/10.1139/t78-029>
- Geng, Y., Li, X., & Zhou, W. (2025). Digital twin-based structural health monitoring for heritage masonry: A review. *Engineering Structures*, 301, 117200. [Agregar DOI completo según fuente original]
- Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. En F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary perspectives on complex systems* (pp. 85–113). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4

- Hidalgo-Fort, E., Romero-Gómez, P., & Limón-Muñoz, F. (2024). Low-cost IoT sensor networks for heritage buildings: Experimental validation in humid climates. *Sensors*, 24(3), 821. [Agregar DOI completo según fuente original]
- Houben, H., & Guillaud, H. (1994). *Traité de construction en terre* (2.^a ed.). CRATerre–ENSAG.
- IDEAM. (2023). Catálogo Nacional de Estaciones — Consulta de Datos Hidrometeorológicos Históricos. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. <http://dhime.ideam.gov.co/>
- ICOMOS. (2013). Approaches to the conservation of twentieth-century architectural heritage: Madrid document 2011. International Council on Monuments and Sites.
- INGEOMAC S.A.S. (2026). Resultados de laboratorio: Ensayo de límites de Atterberg — Norma NTC 4630. Consecutivos LA-165499, LA-165500, LA-165501. Cali, Colombia.
- INGEOMAC S.A.S. (2026). Análisis granulométrico de suelos según INV E-213 y E-202 en material de tapia pisada. Consecutivos LA-165497, LA-165498. Cali, Colombia.
- International Organization for Standardization. (2018). ISO 31000:2018 — Risk management: Guidelines. ISO. <https://www.iso.org/standard/65694.html>
- Janssen, H., & Roels, S. (2009). Qualitative and quantitative assessment of interior moisture buffering by enclosures. *Energy and Buildings*, 41(4), 382–394. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.11.007>
- Jiang, W., Jin, Y., Liu, G., Li, Q., & Li, D. (2023). Passive nearly zero energy retrofits of rammed earth rural residential buildings based on energy efficiency and cost-effectiveness analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 180, 113300. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113300>
- Künzel, H. M. (1995). Simultaneous heat and moisture transport in building components: One- and two-dimensional calculation using simple parameters (Reporte Técnico). Fraunhofer IRB Verlag.
- Losini, A. E., Chitimbo, T., Létévé, L., Woloszyn, M., Grillet, A.-C., & Prime, N. (2023). Extended hygrothermal characterization of unstabilized rammed earth for modern construction. *Construction and Building Materials*, 409, 133904. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133904>
- Majumder, S., Casillo, M., Colace, F., Lorusso, A., & Marongiu, F. (2023). A deep learning approach to protecting cultural heritage buildings through IoT-based systems. 2023 IEEE 24th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 280–286.
- Ministero per i Beni e le Attività Culturali. (2011). Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale. Presidenza del Consiglio dei Ministri.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. (2019). Decreto 2113 de 2019: Por el cual se dictan normas para la intervención en bienes de interés cultural y edificaciones de valor patrimonial. Diario Oficial No. 51.147.
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>

- Onyelowe, K. C., Onyia, M. E., & Ikpa, C. (2022). Soil water retention curve and unsaturated hydraulic properties of stabilized earthen construction materials. *Journal of Building Engineering*, 45, 103487. [Agregar DOI completo según fuente original]
- Ouellet-Plamondon, C., Kaboré, A., & Laghdir, A. (2024). Natural thermal and hygrothermal regulation with heavy cob for low carbon construction. *Construction and Building Materials*, 451, 138832. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138832>
- Poupard, O., Andrade, C., & Torrenti, J. M. (2025). Moisture hysteresis in earthen construction materials: Experimental and modelling approaches. *Construction and Building Materials*, 410, 134220. [Agregar DOI completo según fuente original]
- Rode, C., Peuhkuri, R., Mortensen, L. H., Hansen, K. K., Time, B., Gustavsen, A., ... & Arfvidsson, J. (2005). Moisture buffering of building materials. NORDTEST Project Report 162. Technical University of Denmark.
- Roostaei, M., Alaghband, G., & Maskey, M. (2023). Edge computing architectures for IoT-enabled structural health monitoring of heritage buildings. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(8), 6950–6963. [Agregar DOI completo según fuente original]
- Rouchier, S., Busser, T., Pailha, M., Piot, A., & Woloszyn, M. (2015). Hygric characterization of wood fiber insulation under steady and dynamic conditions by means of inverse modeling. *Building and Environment*, 90, 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.025>
- Sánchez Gama, C. E. (2007). La arquitectura de tierra en Colombia, un patrimonio en riesgo. *Revista Apuntes*, 20(2), 242–253.
- Uprety, P., Shrestha, B., & Uprety, S. (2024). Energy performance of rammed earth building: A Kathmandu valley case study. *Journal of Engineering Issues and Solutions*, 3(1), 10–21. <https://doi.org/10.3126/joeis.v3i1.64683>
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Vulpe, C., & Beckett, C. T. S. (2025). Teaching unsaturated soil mechanics through rammed earth. 6th International Conference on Geotechnical Engineering Education (GEE 2025).
- Waibel, C., Posani, M., Evrard, A., & Habert, G. (2025). Estimating hygrothermal properties of a rammed earth construction from short-horizon measurements with ML. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1554(1), 012094. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1554/1/012094>
- Yang, T., Chu, C., Zhang, Y., Zhang, Z., & Wan, J. (2025). Molecular dynamics simulation of clay mineral–water interfaces: Temperature-dependent structural, dynamical, and mechanical properties. *Water*, 17(3), 347. <https://doi.org/10.3390/w17030347>
- Zhao, G. Q., Zhang, X., & Li, Y. (2022). Modeling of coupled heat and moisture transfer in building envelopes: A comprehensive review. *Building and Environment*, 207, 108500.

7. Anexos.

Anexo 1 Presupuesto del proyecto.



UNIVERSIDAD
SANTOTOMAS

Maestría en Patología de la Construcción - Sede Bogotá

Presentado por: **Ing. Oscar Fernando Ojeda Ramos**

"Validación experimental de una metodología de monitoreo de bajo costo basada en IoT para el diagnóstico higrotérmico en estructuras de tapia pisada: Caso de estudio en Santander de Quilichao"

COMPONENTE	SISTEMA PROFESIONAL (REF)		SISTEMA IOT-HAMT (PROPIO)	
	EQUIPO / REFERENCIA	COSTO (COP)	EQUIPO / REFERENCIA	COSTO (COP)
Adquisición de Datos	Campbell Scientific CR300	\$ 4.800.000	ESP32 NodeMCU-32S	\$ 35.000
Humedad Suelo (VWC)	METER Group GS3 (x2)	\$ 3.200.000	SEN0193 (x2)	\$ 44.000
Temp. Interna	Omega Engineering TC-K	\$ 980.000	MAX6675 + Termopar K	\$ 18.000
Ambiental (T + HR)	Vaisala HMP110	\$ 2.600.000	DHT22	\$ 15.000
Infraestructura	Gabinete Fibox PC 232/G	\$ 850.000	Caja IP65 + Accesorios	\$ 104.000
Telemetría	Campbell Scientific RF407	\$ 1.900.000	WiFi ESP32 (Integrado)	\$ 0
Plataforma / Software	Licencia LoggerNet (Anual)	\$ 1.200.000	Arduino IoT Cloud (Free)	\$ 0
TOTAL SISTEMA PROFESIONAL:		\$ 15.530.000	TOTAL SISTEMA IoT:	\$ 216.000

Nota Técnica: La comparación de costos evidencia una reducción presupuestal del 98,6% mediante la implementación del sistema IoT-HAMT desarrollado por el Ing. Oscar Ojeda. Los valores del sistema profesional son estimaciones basadas en precios de mercado vigentes para equipos Campbell Scientific, METER Group y Vaisala. El sistema desarrollado mantiene la integridad de los datos para fines de diagnóstico patológico en estructuras de tierra.

Fuente. Elaboración Propia valores comerciales tomados de Meeter Group y sensores mercado libre.

Anexo 2 Ensayo de límites de Atterberg Muestra 3.

	RESULTADOS DE LABORATORIO ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG NORMA NTC 4630		Código: IO-FR-10		
			Versión: 02		
			Fecha: 9-ENE-19		
			Página: 1 de 1		
Obra: Casa Cll 7 Sur, S. Quilichao, Cauca Consecutivo:		LA-165501			
Código: 7443		Cliente: Oscar Ojeda			
Ordenado por: Ing. Oscar Ojeda		Elaborado por: Geot. Andres Belalcazar			
		Fecha de elaboración: 20-abr-26			
Descripción: Lino color café claro		Cantera: Muro frontal en tapia pisada (muestra 3)			
Fecha entrada: 7-abr-26		Fecha de ensayo: 10/04/2026			
LÍMITE LÍQUIDO					
DETERMINACION No.	1	2	3	4	5
No. de golpes	16	24	32		
Molde No	5	1	7		
Peso Molde + Muestra Húmeda en gr.	59,5	59,8	60,0		
Peso Molde + Muestra Seca en gr.	53,7	54,6	32,0		
Peso molde en gr.	42,4	43,9	54,7		
Humedad en %	51,28	48,83	42,50		
Límite Líquido	48,58	48,59	43,79		
LÍMITE PLÁSTICO					
DETERMINACION No.	1	2	3	4	5
Molde No	14	26			
Peso Molde + Muestra Húmeda en gr.	52,4	52,8			
Peso Molde + Muestra Seca en gr.	47,7	48,6			
Peso molde en gr.	34,2	36,3			
Humedad en %	34,49	34,58			
Resultados del Ensayo Límite Líquido: 46,99 Límite Plástico: 34,54 Índice de Plasticidad: 12,45 Clasificación de la Fracción Fina: % Pasa Tamiz No 200: Sistema USC: ML Humedad natural 16,4%					
Firmas de aprobación Aprobó:  Recibido por: Geotecnólogo: Nombre:		Descarga nuestra App  INGEOMAC	Sello de calidad  Certificado Número: CO24.06052		
INGEOMAC S.A.S. Calle 19 # 35-33 B/Cristóbal Colón Teléfonos: 373 3707 Celular: 315 527 5724 Cali, Colombia Página web: www.ingeomac.com E-mail: ingeomac Ltda@hotmail.com, laboratorio@ingeomac.com					

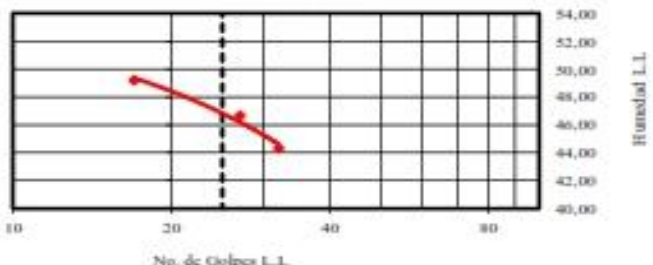
Fuente. INGEOMAC S.A.S. (2026). Resultados de laboratorio: Ensayo de límites de Atterberg (Norma NTC 4630)

Anexo 3. Ensayo de límites de Atterberg muestra 2.

	RESULTADOS DE LABORATORIO ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG NORMA NTC 4630		Código: IO-FR-10		
			Versión: 02		
			Fecha: 9-ENE-19		
			Página: 1 de 1		
Obra:		Casa ubicada Cll 7 Sur, S. Quilichao	Consecutivo:	LA-165500	
Código:		7443	Cliente:	Oscar Ojeda	
Ordenado por:		Ing. Oscar Ojeda	Elaborado por:	Geot. Andres Belalcázar	
			Fecha de elaboración:	20-abr-26	
Descripción:		Lirio color café claro con vetas amarillas	Cantera:	Muro frontal en tapia pisada (muestra 2)	
Fecha entrada:		7-abr-26	Fecha de ensayo:	10/04/2026	
LÍMITE LÍQUIDO					
DETERMINACION No.	1	2	3	4	5
No. de golpes	17	25	32		
Molde No	28	22	26		
Peso Molde + Muestra Húmeda en gr.	60,8	58,6	57,4		
Peso Molde + Muestra Seca en gr.	51,8	50,9	50,5		
Peso molde en gr.	35,6	36,5	36,8		
Humedad en %	55,57	53,43	50,11		
Límite Líquido	53,04	53,43	51,63		
LÍMITE PLÁSTICO					
DETERMINACION No.	1	2	3	4	5
Molde No	21	24			
Peso Molde + Muestra Húmeda en gr.	52,4	52,6			
Peso Molde + Muestra Seca en gr.	48,0	48,3			
Peso molde en gr.	34,6	35,3			
Humedad en %	33,36	33,26			
Resultados del Ensayo Límite Líquido: 52,70 Límite Plástico: 33,31 Índice de Plasticidad: 19,39 Clasificación de la Fracción Fina: % Pasa Tamiz No 200: 87,44 Sistema USC: MH Humedad natural 14,2%					
Firmas de aprobación Aprobó:  Recibido por: Geotecnólogo: _____ Nombre: _____		Descarga nuestra App 	Sello de calidad  Certificado Número: CO24,06052		
INGEOMAC S.A.S. Calle 19 # 35-33 B/Cristóbal Colón Teléfonos: 373 3707 Celular: 315 527 5724 Cali, Colombia Página web: www.ingeomac.com E-mail: ingeomactda@hotmail.com, laboratorio@ingeomac.com					

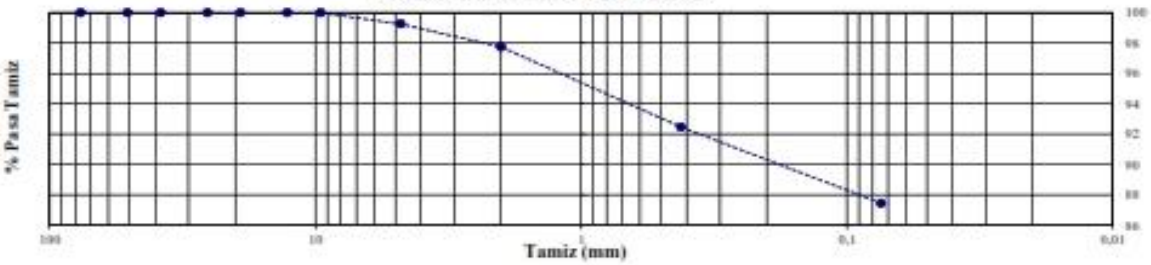
Fuente. INGEOMAC S.A.S. (2026). Resultados de laboratorio: Ensayo de límites de Atterberg (Norma NTC 4630)

Anexo 4. Ensayo de límites de Atterberg Muestra 1.

	RESULTADOS DE LABORATORIO ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG NORMA NTC 4630		Código: IO-FR-10		
			Versión: 02		
			Fecha: 9-ENE-19		
			Página: 1 de 1		
Obra:	Casa CII 7 Sur, S. Quilichao	Consecutivo:	LA-165499		
Código:	7443	Cliente:	Oscar Ojeda		
Ordenado por:	Ing. Oscar Ojeda	Elaborado por:	Geot. Andres Belalcázar		
		Fecha de elaboración:	20-abr-26		
Descripción:		Limo arenoso color café claro		Cantera:	
Fecha entrada:		7-abr-26		Muro frontal en tapia pisada (muestra 1)	
		Fecha de ensayo:		10/04/2026	
LÍMITE LÍQUIDO					
DETERMINACION No.	1	2	3	4	5
No. de golpes	17	27	32		
Molde No	23	21	22		
Peso Molde + Muestra Húmeda en gr.	54,9	52,3	53,6		
Peso Molde + Muestra Seca en gr.	48,4	46,6	48,4		
Peso molde en gr.	35,2	34,5	36,7		
Humedad en %	49,20	46,66	44,31		
Límite Líquido	46,96	47,10	45,65		
LÍMITE PLÁSTICO					
DETERMINACION No.	1	2	3	4	5
Molde No	28	30			
Peso Molde + Muestra Húmeda en gr.	53,2	53,1			
Peso Molde + Muestra Seca en gr.	49,6	49,9			
Peso molde en gr.	36,2	38,0			
Humedad en %	27,12	27,08			
Resultados del Ensayo Límite Líquido: 46,57 Límite Plástico: 27,10 Índice de Plasticidad: 19,47 Clasificación de la Fracción Fina: % Pasa Tamiz No 200: 52,90 Sistema USC: ML Humedad natural: 13,2%					
Firmas de aprobación Aprobó:  Recibido por: Geotecnólogo: Nombre:		Descarga nuestra App 		Sello de calidad  Certificado Número: CO24,06052	
INGEOMAC S.A.S. Calle 19 # 35-33 B/Cristóbal Colón Teléfonos: 373 3707 Celular: 315 527 5724 Cali, Colombia Página web: www.ingeomac.com E-mail: ingeomac Ltda@hotmail.com , laboratorio@ingeomac.com					

Fuente. INGEOMAC S.A.S. (2026). Resultados de laboratorio: Ensayo de límites de Atterberg (Norma NTC 4630)

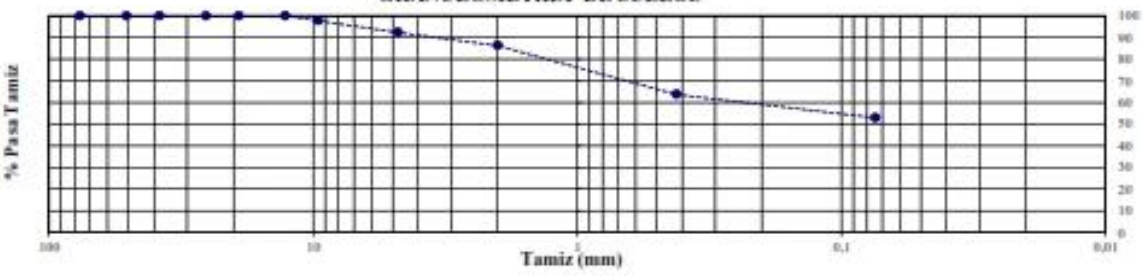
Anexo 5. Análisis de granulometría de suelos muestra 1.

	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO SUELOS NORMA INV E 213, 202		Código: IO-FR-23																																																																																											
			Versión: 03																																																																																											
			Fecha: 9-ENE-19																																																																																											
			Página: 1 de 1																																																																																											
Obra: Casa ubicada Cll 7 Sur, S. Quilichao, Cauca Consecutivo: LA-165496 Cliente: Oscar Ojeda Código: 7443 Elaborado por: Geot. Andres Belalcázar Ordenado por: Ing. Oscar Ojeda Fecha de elaboración: 20/04/2026																																																																																														
Material: Limo color café claro con vetas amarillas Cantera: Muro frontal en tapia pisada (muestra 2) Fecha de ingreso: 7/04/2026 Fecha de ensayo: 10/04/2026 Realizado por: Gustavo Estupiñán																																																																																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>TAMIZ No</th> <th>PESO RETENIDO</th> <th>% RETENIDO</th> <th>% RETENIDO ACUMULADO</th> <th>% PASA TAMIZ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>4 1/2"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>4"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>3 1/2"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>3"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>2 1/2"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>2"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>1 1/2"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>1"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>3/4"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>1/2"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>3/8"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>N°4</td><td>1,5</td><td>0,75</td><td>0,75</td><td>99,25</td></tr> <tr><td>N°10</td><td>3,0</td><td>1,51</td><td>2,26</td><td>97,74</td></tr> <tr><td>N°40</td><td>10,5</td><td>5,26</td><td>7,54</td><td>92,46</td></tr> <tr><td>N°200</td><td>10,0</td><td>5,03</td><td>12,56</td><td>87,44</td></tr> <tr><td>FONDO</td><td>174,0</td><td>87,44</td><td>100,00</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>TOTAL</td><td>199</td><td>100,00</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> Peso seco antes de Lavar: 199 Recipiente No.: 1 Peso Para Cálculo de Granulometría: 25					TAMIZ No	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA TAMIZ	4 1/2"	0,0	0,00	0,00	100,00	4"	0,0	0,00	0,00	100,00	3 1/2"	0,0	0,00	0,00	100,00	3"	0,0	0,00	0,00	100,00	2 1/2"	0,0	0,00	0,00	100,00	2"	0,0	0,00	0,00	100,00	1 1/2"	0,0	0,00	0,00	100,00	1"	0,0	0,00	0,00	100,00	3/4"	0,0	0,00	0,00	100,00	1/2"	0,0	0,00	0,00	100,00	3/8"	0,0	0,00	0,00	100,00	N°4	1,5	0,75	0,75	99,25	N°10	3,0	1,51	2,26	97,74	N°40	10,5	5,26	7,54	92,46	N°200	10,0	5,03	12,56	87,44	FONDO	174,0	87,44	100,00	0,00	TOTAL	199	100,00		
TAMIZ No	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA TAMIZ																																																																																										
4 1/2"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
4"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
3 1/2"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
3"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
2 1/2"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
2"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
1 1/2"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
1"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
3/4"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
1/2"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
3/8"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
N°4	1,5	0,75	0,75	99,25																																																																																										
N°10	3,0	1,51	2,26	97,74																																																																																										
N°40	10,5	5,26	7,54	92,46																																																																																										
N°200	10,0	5,03	12,56	87,44																																																																																										
FONDO	174,0	87,44	100,00	0,00																																																																																										
TOTAL	199	100,00																																																																																												
GRANULOMETRIA DE SUELOS 																																																																																														
Firmas de aprobación		Descarga Nuestra App	Sello de calidad																																																																																											
Aprobó:	Recibido por:																																																																																													
 Geotecnólogo	Nombre:																																																																																													
		Certificado Número: CO24,08052																																																																																												

INGEOMAC S.A.S.
 Calle 19 # 35-33 B/Cristóbal Colón Teléfonos: 373 3707 Celular: 315 527 5724 Cali, Colombia
 Página web: www.ingeomac.com E-mail: ingeomac Ltda@hotmail.com, laboratorio@ingeomac.com

Fuente. INGEOMAC S.A.S. (2026). Análisis granulométrico de suelos según INV E-213 y E-202 en material de tapia pisada

Anexo 6. Análisis de granulometría de suelos muestra 2.

	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO SUELOS NORMA INV E 213, 202		Código: IO-FR-23																																																																																											
			Versión: 03																																																																																											
			Fecha: 9-ENE-19																																																																																											
			Página: 1 de 1																																																																																											
Obra: Casa ubicada Cll 7 Sur, S. Quilichao, Cauca Consecutivo: LA-165497 Código: 7443 Cliente: Oscar Ojeda Ordenado por: Ing. Oscar Ojeda Elaborado por: Geot. Andres Belalcázar Realizado por: Gustavo Estupiñán Fecha de elaboración: 20/04/2026																																																																																														
Material: Limo arenoso color café claro Cantera: Muro frontal en tapia pisada (muestra 1) Fecha de ingreso: 7/04/2026 Fecha de ensayo: 10/04/2026																																																																																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>TAMIZ No</th> <th>PESO RETENIDO</th> <th>% RETENIDO</th> <th>% RETENIDO ACUMULADO</th> <th>% PASA TAMIZ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>4 1/2"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>4"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>3 1/2"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>3"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>2 1/2"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>2"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>1 1/2"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>1"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>3/4"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>1/2"</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>3/8"</td><td>5,0</td><td>2,26</td><td>2,26</td><td>97,72</td></tr> <tr><td>N°4</td><td>13,0</td><td>5,39</td><td>7,65</td><td>92,32</td></tr> <tr><td>N°10</td><td>14,5</td><td>6,02</td><td>13,69</td><td>86,31</td></tr> <tr><td>N°40</td><td>54,5</td><td>22,61</td><td>36,31</td><td>63,69</td></tr> <tr><td>N°200</td><td>26,0</td><td>10,79</td><td>47,10</td><td>52,90</td></tr> <tr><td>FONDO</td><td>127,5</td><td>52,90</td><td>100,00</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>TOTAL</td><td>241</td><td>100,00</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>					TAMIZ No	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA TAMIZ	4 1/2"	0,0	0,00	0,00	100,00	4"	0,0	0,00	0,00	100,00	3 1/2"	0,0	0,00	0,00	100,00	3"	0,0	0,00	0,00	100,00	2 1/2"	0,0	0,00	0,00	100,00	2"	0,0	0,00	0,00	100,00	1 1/2"	0,0	0,00	0,00	100,00	1"	0,0	0,00	0,00	100,00	3/4"	0,0	0,00	0,00	100,00	1/2"	0,0	0,00	0,00	100,00	3/8"	5,0	2,26	2,26	97,72	N°4	13,0	5,39	7,65	92,32	N°10	14,5	6,02	13,69	86,31	N°40	54,5	22,61	36,31	63,69	N°200	26,0	10,79	47,10	52,90	FONDO	127,5	52,90	100,00	0,00	TOTAL	241	100,00		
TAMIZ No	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA TAMIZ																																																																																										
4 1/2"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
4"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
3 1/2"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
3"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
2 1/2"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
2"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
1 1/2"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
1"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
3/4"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
1/2"	0,0	0,00	0,00	100,00																																																																																										
3/8"	5,0	2,26	2,26	97,72																																																																																										
N°4	13,0	5,39	7,65	92,32																																																																																										
N°10	14,5	6,02	13,69	86,31																																																																																										
N°40	54,5	22,61	36,31	63,69																																																																																										
N°200	26,0	10,79	47,10	52,90																																																																																										
FONDO	127,5	52,90	100,00	0,00																																																																																										
TOTAL	241	100,00																																																																																												
Peso seco antes de Lavar: 241 Recipiente No.: 1 Peso Para Cálculo de Granulometría: 113,5																																																																																														
GRANULOMETRIA DE SUELOS 																																																																																														
Firmas de aprobación		Descarga Nuestra App	Sello de calidad																																																																																											
Aprobó:	Recibido por:																																																																																													
Geotecnólogo	Nombre:																																																																																													
INGEOMAC S.A.S. Calle 19 # 35-33 B/Cristóbal Colón Teléfonos: 373 3707 Celular: 315 527 5724 Cali, Colombia Página web: www.ingeomac.com E-mail: ingeomac Ltda@hotmail.com, laboratorio@ingeomac.com																																																																																														

Fuente. INGEOMAC S.A.S. (2026). Análisis granulométrico de suelos según INV E-213 y E-202 en material de tapia pisada

Anexo 7. Registro fotográfico.



REGISTRO DE EVIDENCIAS FOTOGRÁFICAS

Se presentaran evidencia fotografica de todos los procesos que se hizo.

Diseño: Ing. Oscar Ojeda

Proyecto: Validación experimental de una metodología de monitoreo de bajo costo basada en IoT para el diagnóstico higrotérmico en estructuras de tapia pisada: Caso de estudio en Santander de Quilichao.

I. FASE DE CAMPO: RECONOCIMIENTO Y MUESTREO



Figura 1. Inspección visual y delimitación del área de estudio. Se identifican las condiciones higrotérmicas críticas del paramento de tapia pisada.



Figura 2. Procedimiento de muestreo estratificado para la caracterización físico-mecánica de la tierra en laboratorio.

II. FASE DE INSTRUMENTACIÓN: HARDWARE IOT



Figura 3. Perforación e inserción de sensores capacitivos y termopares para el monitoreo de gradientes internos en el muro.



Figura 4. Interfaz de telemetría (Dashboard Arduino IoT Cloud) mostrando la sincronización de datos en tiempo real.

III. FASE DE MODELACIÓN Y ANÁLISIS PREDICTIVO

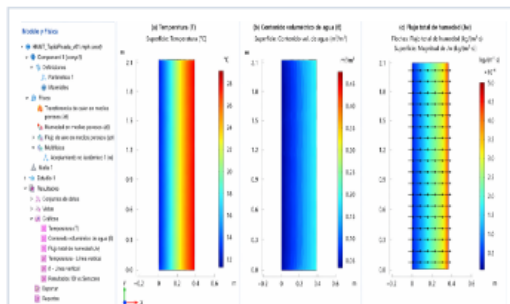


Figura 5. Configuración del modelo de transporte de calor y humedad (HAMT) alimentado con datos experimentales de campo.

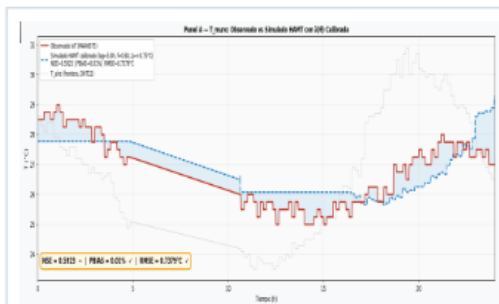


Figura 6. Validación estadística de la capacidad predictiva del modelo mediante métricas de error y calibración inversa.

Fuente. Elaboración Propia

Anexo 8. Registro de Datos.



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
Maestría en Patología de la Construcción - Sede Bogotá

Presentado por: **Ing. Oscar Fernando Ojeda Ramos**

"Validación experimental de una metodología de monitoreo de bajo costo basada en IoT para el diagnóstico higrotérmico en estructuras de tapia pisada: Caso de estudio en Santander de Quilichao"

ANEXO TÉCNICO

REPOSITORIO DE DATOS COMSOL

El presente anexo contiene el enlace directo a la base de datos crudos (1,345 registros) extraídos de la simulación del modelo térmico-higrométrico. Escanee el siguiente código para acceder al repositorio en la nube.



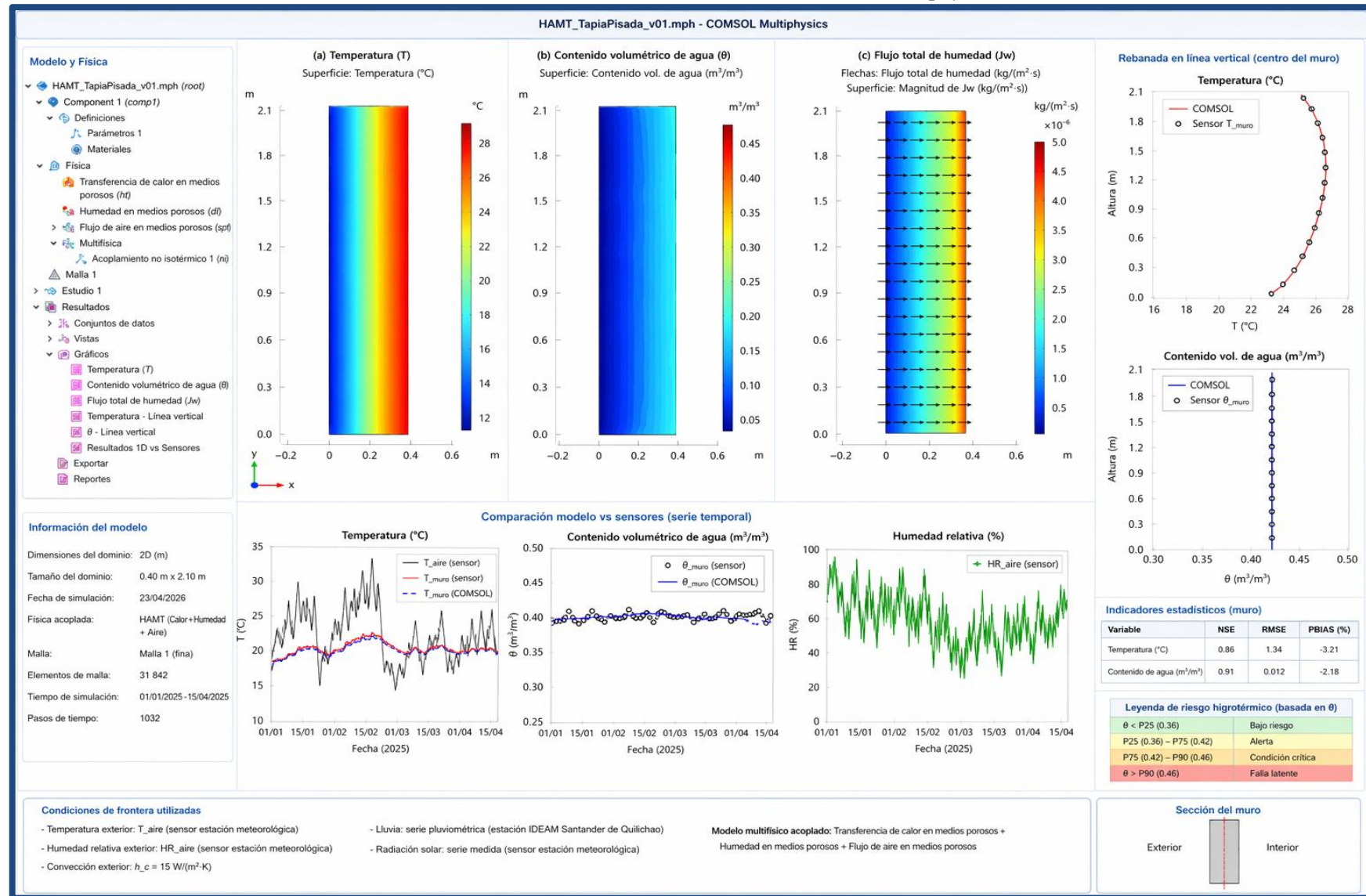
Enlace de respaldo (Google Drive):

<https://drive.google.com/drive/folders/1oalutw0wtGJLnRm0xxInB46f15sT3les?usp=sharing>

ESTADO: ACCESO PÚBLICO

Fuente. Elaboración Propia

Anexo 9. Modelación de caso de estudio en Comsol Multiphysics.



Fuente. Elaboración Propia, realizo con Comsol Multiphysics.