

CAVETEM IoT System

Technical Research Article

Índice de Tendencia de Condensación (ITC) para equipos CAVETEM IoT System en cavidades con humedad extrema

Condensation Tendency Index (ITC) for CAVETEM IoT System devices in caves under extreme humidity

Campo	Contenido
Autor / sistema	Andrés Ros Vivancos - CAVETEM IoT System
Tipo de documento	Artículo técnico-científico aplicado con bases técnicas del algoritmo ITC
Versión del documento	v12 - 10/05/2026
Documento revisado	Artículo ITC-CAVETEM v11 + Anexo técnico - ITC-CAVETEM
Uso previsto	Artículo de referencia para documentación técnica, validación de firmware/app y trazabilidad científica.

CAVETEM IoT System, TECMINSA, QALAT Cartagena, España 2026

Correspondencia: andresros@outlook.com.

Resumen: La monitorización microclimática de cavidades con humedad extrema presenta una limitación operativa recurrente: cuando la humedad relativa permanece durante largos periodos próxima a 100,0 %, los sensores capacitivos dejan de aportar resolución útil para distinguir si el sistema subterráneo entra en condensación, permanece estable o inicia una fase de desaturación. Este trabajo presenta la base conceptual, metodológica y aplicada del algoritmo ITC para equipos CAVETEM, desarrollado para transformar un límite instrumental en una herramienta interpretativa. La revisión se amplía con un análisis de tecnologías de sensores de temperatura y humedad en IoT de baja potencia y con la justificación del empleo de sensores capacitivos Sensirion SHT4x, especificados para el rango 0-100 % HR y dotados de heater integrado, pero incapaces por definición física de discriminar condiciones por encima de la saturación cuando esta es permanente. El algoritmo combina temperatura del aire, humedad relativa, punto de rocío, persistencia temporal de la saturación y tendencia térmica reciente. En condiciones conservadoras de saturación real, se activa una segunda capa de interpretación —Dinámica Ambiental— basada en la evolución conjunta de CO₂, presión atmosférica y relación de humedad expresada en g/kg de aire seco. La metodología se ha contrastado mediante registros continuos obtenidos en Cueva del Puerto, en varias estaciones de Mendukilo y en ensayos de laboratorio con atmósfera saturada. Los resultados preliminares muestran que el ITC discrimina entre saturación incipiente, saturación estable y condensación probable, mientras que la Dinámica Ambiental permite identificar estados de estabilidad, transición, confinamiento o renovación sin recurrir a humedades relativas físicamente imposibles. Se concluye que el enfoque propuesto no corrige la humedad por encima de 100 %, sino que interpreta de forma robusta la evolución de atmósferas saturadas, conservando la lectura original del sensor y reduciendo la pérdida de información asociada a estrategias agresivas de recuperación.

Palabras clave: atmósfera subterránea; cavidades turísticas; condensación; humedad relativa; monitorización ambiental; sensores capacitivos.

Abstract: Microclimatic monitoring in caves affected by extreme humidity faces a recurrent operational limitation: when relative humidity remains close to 100.0 % for long periods, capacitive sensors no longer provide enough resolution to distinguish whether the underground system is moving toward condensation, remains stable, or starts to desaturate. This paper presents the conceptual basis, methodology and application of the ITC algorithm for CAVETEM devices, developed to transform an instrumental limit into an interpretative tool. The review is expanded with a brief analysis of temperature and humidity sensor technologies in low-power IoT and with the justification for using Sensirion SHT4x capacitive sensors, specified for the 0-100 %RH range and equipped with an integrated heater, but physically unable to discriminate conditions beyond saturation when saturation is permanent. The algorithm combines air temperature, relative humidity, dew point, temporal persistence of saturation and recent thermal trend. Under conservative real-saturation conditions, a second interpretative layer - Environmental Dynamics - is activated using the joint evolution of CO₂, barometric pressure and humidity ratio expressed in g/kg of dry air. The methodology was assessed using continuous datasets from Cueva del Puerto, several stations in Mendukilo Cave and laboratory experiments under saturated conditions. Preliminary results show that the ITC discriminates among incipient saturation, stable saturation and probable condensation, while the Environmental Dynamics layer helps identify stability, transition, confinement and renewal without resorting to physically impossible relative humidity values. The proposed approach does not correct humidity beyond 100 %; instead, it provides a robust interpretation of saturated cave atmospheres while preserving the original sensor reading and reducing data loss caused by aggressive sensor recovery strategies.

Keywords: cave atmosphere; capacitive sensors; condensation; environmental monitoring; relative humidity; show caves.

Introducción

La monitorización microclimática de cavidades naturales y cuevas turísticas requiere el registro continuo de las variables que describen la estabilidad y evolución de la atmósfera subterránea. La temperatura del aire, la humedad relativa, el punto de rocío, la presión atmosférica y la concentración de CO₂ permiten interpretar procesos de ventilación, confinamiento, condensación, intercambio con el exterior y respuesta del medio a la presencia de visitantes o a las variaciones meteorológicas externas. Estos parámetros se consideran básicos en la literatura especializada sobre meteorología subterránea, conservación y gestión de cuevas turísticas, como muestran Badino (2010), Cigna (2002), de Freitas (2010) y Fernández-Cortés et al. (2022). En determinados contextos, el radón constituye además un trazador de gran utilidad para reconocer episodios de renovación o estancamiento de aire, aunque las versiones de los equipos CAVETEM consideradas en este trabajo no integran todavía este parámetro, tal como se plantea en estudios de ventilación basados en gases traza como Sainz et al. (2022) y Pla et al. (2020).

La humedad relativa ocupa una posición central en la interpretación del clima subterráneo, pero presenta una particularidad que la diferencia de otras variables: en muchas cuevas húmedas tiende a permanecer muy próxima al equilibrio de saturación. Estudios de larga duración realizados en cuevas tropicales han mostrado estaciones con humedad relativa prácticamente invariante al 100 % y otras con desviaciones cortas desde la saturación, de modo que la información ambiental relevante no reside únicamente en el valor absoluto de HR, sino también en la duración, frecuencia y contexto de esas desviaciones (Mejía-Ortíz et al., 2021). En cavidades turísticas o patrimoniales, esta condición puede coincidir con elevada estabilidad térmica, baja ventilación o presencia de superficies húmedas, por lo que la saturación debe entenderse como un estado ambiental frecuente y no necesariamente como una anomalía instrumental.

Desde el punto de vista físico y geoquímico, el entorno próximo al 100 % HR es especialmente relevante porque marca la frontera operativa entre evaporación y condensación. Cuando la temperatura del aire se aproxima al punto de rocío, pequeñas variaciones térmicas pueden desplazar el sistema hacia la condensación sobre roca, espeleotemas, materiales arqueológicos o elementos instalados en la cavidad. La literatura sobre microclima subterráneo y conservación advierte que estos procesos no deben evaluarse mediante lecturas aisladas, sino mediante series temporales capaces de captar persistencia, oscilaciones breves y relaciones entre variables (Cigna, 2002; de Freitas, 2010; Mejía-Ortíz et al., 2021).

La selección instrumental condiciona de forma directa la calidad de esta interpretación. En sistemas IoT de bajo consumo se emplean distintos sensores de temperatura —RTD, termopares, termistores o sensores digitales integrados— y distintas tecnologías de humedad, principalmente sensores capacitivos de polímero y sensores resistivos, además de equipos de referencia más complejos basados en punto de rocío o espejo enfriado. La revisión de Gaziz et al. (2025) sitúa estos sensores dentro de soluciones de instrumentación IoT de baja potencia, compactas e integrables en plataformas como Arduino, ESP32 o Raspberry Pi, y destaca que los sensores de humedad capacitivos o resistivos son adecuados para instrumentación distribuida, aunque pueden verse afectados por contaminación, tiempo de respuesta, deriva o dependencia térmica. En una red de cavidades, donde se requiere consumo reducido, integración digital, mantenimiento sencillo y despliegue de múltiples nodos, los equipos CAVETEM incorporan sensores capacitivos Sensirion SHT4x para humedad relativa y temperatura. La elección del SHT4x responde a una combinación equilibrada de robustez, precisión suficiente para análisis de tendencia, salida digital I²C, bajo consumo, calibración de fábrica, disponibilidad de heater interno, estabilidad operativa y documentación específica para condiciones de humedad elevada y ambientes con posible condensación.

En sensores de temperatura, la saturación persistente no afecta del mismo modo que a la humedad relativa. Un Pt100/RTD o un termistor protegido pueden seguir registrando microvariaciones térmicas en ambientes saturados, aunque no midan por sí solos ni HR ni condensación. Esta separación es importante: incluso cuando la HR queda en 100 %, la temperatura sigue aportando información sobre la aproximación o separación respecto al punto de rocío. En Altamira, por ejemplo, el uso de Pt100 de alta resolución se integra con HR y CO₂ para interpretar ventilación y microclima en una cavidad patrimonial (Sainz et al., 2022; Sainz et al., 2026).

La elección del SHT4x responde a criterios operativos: salida digital I²C, bajo consumo, calibración de fábrica, resolución suficiente para detectar microvariaciones, rango especificado de 0-100 % HR, funcionamiento en ambiente con condensación y disponibilidad de un heater integrado para mitigar efectos reversibles de exposición prolongada a humedad alta (Sensirion, 2022a; Sensirion, 2025). Sin embargo, estas prestaciones no eliminan el límite físico de la humedad relativa: cuando la atmósfera permanece saturada, el sensor puede marcar 100 % de forma persistente y esa lectura deja de discriminar por sí sola si existe condensación activa, equilibrio estable o inicio de desaturación. Además, el uso excesivo del heater puede perturbar temporalmente la lectura local y generar discontinuidades en una serie que precisamente interesa conservar.

La interpretación de ambientes saturados se complica, por tanto, por una doble condición: la propia definición física de la humedad relativa, acotada por el equilibrio de saturación, y las limitaciones de los sensores capacitivos cuando

trabajan durante largos periodos cerca del límite superior de su rango útil. Cigna (2002) ya señaló que la humedad próxima al 100 % constituye una dificultad específica para la monitorización de cuevas, y Camuffo (2019) mostró que incluso los sensores capacitivos calentados operan con limitaciones importantes bajo condiciones de humedad muy elevada. Por ello, en cavidades saturadas no basta con registrar HR; es necesario conservar la lectura original del sensor y complementarla con variables físicamente coherentes, especialmente punto de rocío, gap T-DP, persistencia temporal, presión, CO₂ y relación de humedad.

Esta limitación no es exclusiva del SHT4x. Los fabricantes de dataloggers y sensores T/HR advierten que la exposición prolongada a humedad alta o condensación puede afectar a la precisión, la deriva o el tiempo de recuperación del elemento sensible. En equipos HOBO y Tinytag, basados también en sensores capacitivos de HR, el rango operativo se mantiene en torno a 0-100 % HR y la robustez frente a ambientes húmedos no implica capacidad para discriminar indefinidamente por encima de la saturación (Onset Computer Corporation, s.f.; Gemini Data Loggers, s.f.). Sensirion, por su parte, documenta el uso del heater del SHT4x para mitigación de creep en alta humedad y recomienda no interpretar valores fuera del rango físico 0-100 % como humedades reales (Sensirion, 2022a; Sensirion, 2025).

En este contexto, el 100 % HR no debe tratarse automáticamente como un fallo, ni tampoco como una prueba única de condensación activa. Puede representar una atmósfera saturada estable, un episodio de aire confinado, una fase de renovación con entrada de aire húmedo, una transición hacia desaturación o un estado de condensación probable. La diferencia entre estos casos no puede resolverse únicamente con la humedad relativa, porque esta queda acotada por definición y pierde capacidad discriminante cuando alcanza su techo físico e instrumental. La información útil debe desplazarse hacia el análisis de la diferencia entre temperatura y punto de rocío, la persistencia temporal, la tendencia térmica y la evolución conjunta de gases y presión.

Los estudios recientes sobre ventilación subterránea refuerzan esta necesidad. En la cueva de Altamira, el CO₂ se ha utilizado como trazador pasivo de intercambio de aire y se ha demostrado que las fluctuaciones de CO₂ pueden correlacionarse con gradientes térmicos interior-exterior y con episodios de ventilación a escala diaria o estacional (Sainz et al., 2022; Sainz et al., 2026). En Shawan Cave, la ventilación controla la evolución estacional del CO₂ de la atmósfera de la cueva y afecta a la desgasificación del agua de goteo y al crecimiento de espeleotemas, aun en un contexto donde la humedad relativa permanece en saturación (Lyu et al., 2020). Estos trabajos muestran que la dinámica ambiental puede seguir siendo intensa, aunque la HR permanezca próxima o igual al 100 %.

La presión atmosférica y las microvariaciones térmicas también aportan información sobre la dinámica de la masa de aire. Drăgușin et al. (2018) detectaron oscilaciones térmicas semidiurnas muy pequeñas en una cueva rumana y las relacionaron con mareas térmicas atmosféricas, mostrando que una cavidad puede actuar como filtro meteorológico y conservar señales barométricas sutiles. Este tipo de resultados justifica que la interpretación de una atmósfera saturada no se base solo en HR, sino que incorpore presión, temperatura, CO₂ y evolución temporal como indicadores de estabilidad, renovación o confinamiento.

Otra limitación de la humedad relativa es que no expresa directamente la cantidad real de vapor de agua contenida en la masa de aire. Dos cavidades pueden encontrarse al 100 % HR y, sin embargo, contener cantidades muy distintas de vapor de agua si sus temperaturas son diferentes. Por ello, el uso complementario de la relación de humedad, expresada en g/kg de aire seco, permite comparar masas de aire con mayor coherencia psicrométrica y distinguir entre saturación fría y saturación cálida. Esta idea es especialmente importante en la comparación entre cavidades como Cueva del Puerto y Mendukilo, donde la HR puede ser similar pero la carga real de vapor de agua y el comportamiento térmico son diferentes (Armstrong International, 2018; Ullman et al., 2026).

A partir de estas consideraciones surge la necesidad del Índice de Tendencia de Condensación (ITC) para equipos CAVETEM. El ITC se plantea como un indicador operativo, no como una corrección metrológica de la humedad relativa. Su finalidad es valorar la proximidad, persistencia y tendencia de las condiciones favorables a la condensación mediante la combinación de humedad relativa, temperatura del aire, punto de rocío, diferencia T-DP, persistencia temporal y tendencia térmica reciente. Cuando se cumplen condiciones conservadoras de saturación real, el sistema activa además una capa de Dinámica Ambiental basada en CO₂, presión atmosférica, temperatura y relación de humedad, con el fin de interpretar si la atmósfera permanece estable, se confina, se renueva o aumenta su tendencia a condensar.

El presente trabajo desarrolla y aplica este enfoque a registros obtenidos en Cueva del Puerto, Mendukilo y ensayos de laboratorio en atmósfera saturada. La hipótesis de partida es que, en cavidades con humedad extrema, la saturación no debe reducirse a un valor máximo del sensor, sino interpretarse como un estado ambiental dinámico. En consecuencia, el ITC-CAVETEM busca transformar una limitación recurrente de la monitorización higrométrica en una herramienta de análisis útil para la conservación, la gestión técnica y la lectura científica de la atmósfera subterránea.

Objetivos

El objetivo general de este trabajo es describir el proceso conceptual, instrumental y operativo que conduce a la formulación del Índice de Tendencia de Condensación (ITC-CAVETEM) como modelo útil para interpretar cavidades donde la humedad relativa entra en saturación o permanece de forma persistente próxima al 100 %. En esta situación, la lectura higrométrica convencional pierde capacidad discriminante y debe ser complementada con variables psicrométricas, temporales y dinámicas.

De forma específica, se plantean los siguientes objetivos: (1) revisar la base bibliográfica que justifica la necesidad de interpretar la saturación higrométrica como un estado ambiental y no solo como un límite del sensor; (2) analizar brevemente las tecnologías de sensores de temperatura y humedad aplicables a IoT de baja potencia y justificar el empleo de sensores capacitivos Sensirion SHT4x en CAVETEM; (3) definir los criterios operativos del ITC a partir de la combinación de humedad relativa, temperatura del aire, punto de rocío, diferencia T-DP, persistencia temporal y tendencia térmica; (4) activar una capa complementaria de Dinámica Ambiental cuando se alcanza saturación real, incorporando CO₂, presión atmosférica y relación de humedad en g/kg de aire seco; (5) contrastar la respuesta del índice en registros de Cueva del Puerto, Mendukilo y ensayos de laboratorio; y (6) valorar la utilidad del método para diferenciar humedad alta, proximidad a saturación, saturación activa, condensación probable, confinamiento, renovación atmosférica y transición hacia desaturación.

El enfoque se plantea de forma prudente: el ITC no sustituye a una medición directa de condensación superficial ni corrige la humedad relativa por encima del 100 %. Su finalidad es convertir una condición frecuente en cuevas húmedas —la saturación o casi saturación persistente— en una lectura operativa basada en tendencia, persistencia y coherencia entre variables, manteniendo como dato válido la lectura original del sensor siempre que el conjunto sensor-firmware responda de forma estable.

Metodología

La metodología se organizó en seis bloques: revisión bibliográfica, revisión instrumental de sensores aplicables a IoT de baja potencia, depuración de registros CAVETEM, cálculo del ITC, contraste experimental en laboratorio e incorporación del Anexo técnico - Datasheet ITC-CAVETEM como base de trazabilidad del algoritmo. La revisión bibliográfica se centró en trabajos sobre humedad relativa en cuevas, limitaciones de medida en condiciones próximas a saturación, uso de CO₂ y radón como trazadores de ventilación, influencia de la presión barométrica y relación entre ventilación, condensación y procesos geoquímicos. La revisión instrumental incorporó el análisis de Gazis et al. (2025), junto con documentación técnica de Sensirion sobre física de la humedad, ensayo de sensores y uso del heater en la serie SHT4x (Sensirion, 2009; Sensirion, 2022a; Sensirion, 2022b; Sensirion, 2025). La base algorítmica se documenta específicamente en el Anexo técnico ITC-CAVETEM (Ros Vivancos, 2026e).

Desde el punto de vista instrumental, se asumió que los sensores capacitivos de polímero son adecuados para una red distribuida como CAVETEM por su bajo consumo, tamaño reducido, facilidad de integración digital, y disponibilidad comercial. Frente a alternativas como equipos de punto de rocío, espejos enfriados o instrumentación de laboratorio, los SHT4x permiten desplegar múltiples nodos en cavidades con comunicación MQTT y alimentación limitada o ilimitada. No obstante, la metodología no interpreta el SHT4x como un instrumento capaz de medir por encima del 100 % HR, sino como un sensor que puede trabajar en condiciones de saturación y cuyo dato debe complementarse con parámetros psicrométricos cuando la HR permanece en el techo físico.

Los registros de campo proceden de series agregadas en intervalos de 15 minutos generadas por CAVETEM. Para Cueva del Puerto se analizaron EXTERIOR011, RAICES033, ABISMO022 y MEDUSA044. Para Mendukilo se mantuvieron EXT00 y MEND11, y se añadieron las estaciones MEND22, MEND33 y MEND44, incorporadas para ampliar el criterio analítico de una cavidad más fría y con sectores interiores de saturación variable. Las variables utilizadas fueron CO₂, temperatura del aire, humedad relativa, punto de rocío, presión atmosférica, diferencia entre temperatura y punto de rocío (gap T-DP), relación de humedad (HA, g/kg de aire seco), valor ITC, estado ITC y activación de Dinámica Ambiental.

En el análisis estadístico se excluyeron los bloques sin valores completos de temperatura, humedad, punto de rocío, gap o ITC, evitando interpretar como “sin riesgo” registros que en realidad no eran calculables por falta de datos psicrométricos completos. Durante la revisión de los registros se observó que una lectura con un solo decimal resulta suficiente para muchos usos descriptivos, pero puede ocultar oscilaciones relevantes en situaciones de saturación permanente. La disponibilidad de dos decimales en temperatura, humedad, punto de rocío y gap permitió observar microvariaciones que, cruzadas con CO₂, presión y HA, ayudan a inferir la tendencia de la masa de aire. Esta lectura centesimal no se interpreta como precisión absoluta, sino como una herramienta para reconocer bandas y persistencias.

A partir de ahí, el parámetro psicrométrico principal fue el gap térmico, definido como $\text{gap} = T - DP$. Cuando esta diferencia se aproxima a $0,00\text{ }^{\circ}\text{C}$, la masa de aire se encuentra en equilibrio o casi equilibrio con el vapor de agua disponible y aumenta la probabilidad de condensación sobre superficies frías o sobre elementos instalados en la cavidad. En la aplicación operativa se consideró saturación activa cuando se cumplían simultáneamente $HR \geq 99,5\%$ y $\text{gap} \leq 0,10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los valores negativos del gap, observados puntualmente por redondeo o incertidumbre instrumental cuando el punto de rocío calculado queda ligeramente por encima de la temperatura, se interpretaron como condición de saturación dentro de la banda de incertidumbre y no como humedad física superior al 100% .

La formulación conceptual del ITC puede expresarse como: $\text{ITC} = \min(100, S_{HR} + S_{\text{gap}} + S_{\text{persistencia}} + S_{\text{tendencia}})$. S_{HR} pondera la proximidad de la HR al techo de saturación; S_{gap} pondera la distancia T-DP; $S_{\text{persistencia}}$ diferencia un pico puntual de un estado mantenido; y $S_{\text{tendencia}}$ incorpora la evolución térmica reciente. Esta formulación no genera una nueva HR, sino una escala operativa de tendencia hacia condensación.

La tendencia de la masa de aire se obtiene a partir de variaciones temporales de 1 h y 3 h en temperatura, punto de rocío, CO_2 , presión y relación de humedad: ΔT , ΔDP , ΔCO_2 , ΔP y ΔHA . Si la HR permanece próxima al 100% , el gap se reduce o se mantiene en $\leq 0,10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la temperatura desciende o permanece estable en una banda fría, el sistema interpreta que la masa de aire se aproxima o permanece en condición favorable a condensación. Si el gap se abre, el CO_2 desciende y/o la presión y la HA indican renovación, el sistema interpreta pérdida de tendencia de condensación o transición hacia desaturación. Por tanto, el ITC ayuda a valorar la tendencia hacia el punto de rocío y el inicio potencial de condensación o precipitación de agua en paredes, espeleotemas o atmósfera cargada, sin afirmar por sí solo que exista película líquida superficial.

Criterio	Condición operativa	Lectura interpretativa
Exterior seco o margen amplio	HR baja o $\text{gap} > 1,00\text{ }^{\circ}\text{C}$	Sin riesgo de condensación; margen térmico suficiente.
Humedad alta	$HR \geq 95\%$ o gap entre $0,50$ y $1,00\text{ }^{\circ}\text{C}$	Vigilancia; la HR es elevada pero aún existe margen frente al punto de rocío.
Próximo a saturación	gap entre $0,10$ y $0,50\text{ }^{\circ}\text{C}$	La masa de aire se aproxima al equilibrio; el descenso térmico puede favorecer condensación.
Saturación activa	$HR \geq 99,5\%$ y $\text{gap} \leq 0,10\text{ }^{\circ}\text{C}$	Se activa Dinámica Ambiental; condición compatible con condensación probable si persiste.
Persistencia	$\geq 1\text{ h}$, $\geq 6\text{ h}$ o $\geq 24\text{ h}$ en banda de saturación	Aumenta la confianza en que no se trata de una oscilación puntual.
Dinámica ambiental	Tendencias de CO_2 , presión y HA	Permite diferenciar estabilidad, confinamiento, renovación o desaturación.

Tabla 1. Criterios operativos utilizados para la interpretación del ITC y de la Dinámica Ambiental.

Table 1. Operational criteria used for ITC and Environmental Dynamics interpretation.

El cálculo del ITC se expresó en una escala de 0 a 100, no como una nueva humedad relativa, sino como un índice de proximidad y persistencia de condiciones favorables a la condensación. Las variables CO_2 , presión y HA no se utilizaron para redefinir la saturación higrométrica, sino para interpretar el comportamiento de la atmósfera una vez alcanzado el umbral de saturación activa. De este modo, el índice mantiene separadas dos decisiones: primero, identificar la proximidad física al punto de rocío; segundo, interpretar la evolución de la masa de aire mediante trazadores dinámicos.

El ensayo de laboratorio se actualizó respecto a las pruebas iniciales. Se empleó un equipo CAVETEM de referencia en ambiente exterior de laboratorio y un segundo equipo situado en una zona saturada generada mediante un matraz de cristal de 250 ml con 15 ml de agua, cerrado herméticamente. Esta configuración permitió comparar una atmósfera no saturada de referencia con una atmósfera cerrada de humedad extrema, comprobar la respuesta del sensor y verificar previamente que el firmware mantuviera la lectura de saturación como dato ambiental válido mientras el conjunto sensor-firmware continuara respondiendo de forma coherente.

La lógica de firmware adoptada en Puerto_MQTT v.x06.6 se alineó con este criterio: el estado SATURATED dejó de invalidar por sí mismo la lectura del SHT4x, de modo que EXT_T, EXT_H y EXT_DP se mantienen cuando $HR = 100,00\%$ si el sensor responde correctamente. El heater preventivo se suavizó para no interrumpir series en saturación natural sostenida, y las variables principales pasaron a publicarse con dos decimales en MQTT, CSV, BLE, monitor serie y registros agregados de 15 minutos (Ros Vivancos, 2026b).

Durante el tratamiento de datos se trabajó con dos decimales en temperatura, humedad relativa, punto de rocío y gap T-DP. Esta resolución mejora la lectura de microvariaciones y facilita la detección de bandas de proximidad a saturación,

pero se interpreta por rangos y persistencia, no como una precisión absoluta capaz de discriminar diferencias físicas de centésimas de grado por sí solas.

Bases técnicas del algoritmo ITC-CAVETEM

Esta revisión incorpora explícitamente el Anexo técnico - Datasheet ITC-CAVETEM como base de trazabilidad del algoritmo. El anexo documenta las fórmulas, parámetros, umbrales y reglas de generación del índice, y separa de forma clara tres niveles: medición instrumental, índice interpretativo y Dinámica Ambiental (Ros Vivancos, 2026e).

Principio de funcionamiento

El ITC-CAVETEM es un índice de 0 a 100 diseñado para mantener capacidad de lectura ambiental cuando la humedad relativa se aproxima al límite operativo del sensor. No calcula humedades relativas superiores al 100 % ni sustituye a un higrómetro de punto de rocío o a un espejo de condensación. Su objetivo es clasificar la proximidad, persistencia y tendencia de condiciones favorables a la condensación.

Criterio	Decisión técnica
No extrapolar HR	La HR se acota a 0-100 %. Nunca se informa 101 %, 102 % o valores equivalentes.
Usar el punto de rocío	El gap T-DP es el indicador primario de proximidad a saturación.
Añadir persistencia	Una lectura puntual no equivale a un episodio estable; se contabilizan minutos u horas consecutivas en alta HR.
Añadir tendencia	La evolución térmica reciente modula la interpretación: el enfriamiento favorece condensación; el calentamiento abre margen de desaturación.
Separar ITC y Dinámica Ambiental	El ITC responde cuánto se aproxima la atmósfera a la condensación; la Dinámica Ambiental interpreta qué está haciendo esa masa de aire.

Variables de entrada y preprocesado

Variable	Símbolo	Unidad	Resolución recomendada	Uso en algoritmo
Temperatura del aire	T / extT	°C	0,01 °C	Gap T-DP, tendencia térmica y cálculo psicrométrico.
Humedad relativa bruta	HR / extH	%	0,01 %HR	Proximidad a saturación y disparo de estados HIGH_RH/SATURATED.
Punto de rocío	DP / extDP	°C	0,01 °C	Cálculo del gap térmico y validación de saturación real.
Presión atmosférica	P / pres	hPa	0,1 hPa	Relación de humedad y dinámica de ventilación/masa de aire.
CO ₂	CO ₂ / co2	ppm	1 ppm	Confirmación de renovación, acumulación o confinamiento.
Relación de humedad	HA / w	g/kg aire seco	0,01 g/kg	Contenido real de vapor en dinámica ambiental.
Fecha/hora	t	timestamp	1 min / 15 min	Ventanas temporales, persistencia y tendencias.

Como normalización previa, la HR se limita al rango físico 0-100 %. Si el punto de rocío no está disponible o resulta incoherente, se recalcula desde T y HR. Si el cálculo produce DP ligeramente superior a T por redondeo o incertidumbre, el gap se fija en 0,00 °C y la lectura se interpreta como saturación dentro de la banda de incertidumbre, no como HR física superior al 100 %.

Fórmulas psicrométricas utilizadas

Magnitud	Fórmula operativa	Salida
Presión de vapor de saturación	$e_s(T) = 6,112 \cdot \exp((17,62 \cdot T) / (243,12 + T))$	hPa
Presión parcial real de vapor	$e = (HR / 100) \cdot e_s(T)$	hPa
Punto de rocío recalculado	$\gamma = \ln(e / 6,112); DP = (243,12 \cdot \gamma) / (17,62 - \gamma)$	°C
Gap térmico	$gap = \max(T - DP, 0)$	°C
Déficit de presión de vapor	$VPD = \max(e_s(T) - e, 0)$	hPa

Magnitud	Fórmula operativa	Salida
Relación de humedad	$HA = 621,98 \cdot e / (P - e)$	g/kg aire seco

En la documentación CAVETEM, HA se expresa como g/kg de aire seco. No debe confundirse con humedad absoluta en g/m³; su utilidad principal es comparar masas de aire a distinta temperatura y presión con mayor coherencia psicrométrica.

Ventanas temporales y persistencia

Nivel	Fuente	Ventana	Finalidad
Estado instantáneo	Último registro disponible	t0	Calcular gap, HR, VPD, HA e ITC preliminar.
Tendencia rápida	Registros recientes MQTT/BLE	20 registros ≈ 20 min	Detectar cambios rápidos por visitas, aperturas o ventilación puntual.
Tendencia 1 h	Histórico o últimos registros interpolados	4 bloques de 15 min / 60 min	Calcular dT1h, dP1h, dCO ₂ 1h y dHA1h.
Tendencia 3 h	Histórico 15 min	12 bloques de 15 min / 180 min	Confirmar evolución y reducir ruido instrumental.
Persistencia	Serie consecutiva	1 h, 6 h y 24 h	Valorar duración del estado HR >= 99,5 %.

Fórmula del ITC, estados y topes finales

La condición de saturación total real se define como SATURACION_TOTAL_REAL = (HR >= 99,5 %) AND (gap <= 0,10 °C). Solo si se cumple esta condición el ITC puede alcanzar 100/100. En cualquier otro caso, el valor final queda limitado por topes de coherencia física.

Componente	Condición	Puntuación
Humedad relativa	HR >= 95,0 %	+20
Humedad relativa	HR >= 99,0 %	+20
Humedad relativa	HR >= 99,5 %	+15
Humedad relativa	HR >= 99,9 %	+15
Gap térmico	T - DP <= 0,50 °C	+10
Gap térmico	T - DP <= 0,20 °C	+10
Gap térmico	T - DP <= 0,05 °C	+10
Persistencia	Más de 1 h con HR >= 99,5 %	+5
Persistencia	Más de 6 h con HR >= 99,5 %	+5
Persistencia	Más de 24 h con HR >= 99,5 %	+10
Tendencia térmica	T baja en la última hora	+5 a +10
Tendencia térmica	T sube en la última hora	-5 a -10

La expresión formal utilizada como base documental es: ITC_pre = S_HR + S_gap + S_persistencia + S_tendencia; ITC = min(max(ITC_pre, 0), 100), después de aplicar topes finales. Estos topes evitan que estaciones con HR alta pero gap todavía abierto se visualicen al mismo nivel que una estación totalmente saturada.

ITC final	Estado visible recomendado
0-19	SIN RIESGO DE CONDENSACIÓN
20-49	HUMEDAD AMBIENTAL MODERADA
50-74	PRÓXIMO A SATURACIÓN
75-89	SATURACIÓN INCIPIENTE
90-96	SATURACIÓN MUY ALTA
97-100	CONDENSACIÓN PROBABLE

Dinámica Ambiental

La capa de Dinámica Ambiental se activa o se destaca cuando existe saturación total real. Utiliza CO₂, presión y HA como trazadores de renovación, confinamiento y estabilidad de masa de aire. En modo general la cabecera visible es DINÁMICA AMBIENTAL; en saturación activa pasa a DINÁMICA AMBIENTAL · SATURACIÓN ACTIVA.

Variable	Condición	Flecha	Texto visible
CO ₂	dCO ₂ 1h > +100 ppm/h	↑	CO ₂ SUBE
CO ₂	dCO ₂ 1h < -100 ppm/h	↓	CO ₂ BAJA
CO ₂	dCO ₂ 1h <= 100 ppm/h	→	CO ₂ ESTABLE
Presión	dP1h > +0,30 hPa/h	↑	PRESIÓN SUBE
Presión	dP1h < -0,30 hPa/h	↓	PRESIÓN BAJA
Presión	dP1h <= 0,30 hPa/h	→	PRESIÓN ESTABLE
HA	dHA1h > +0,05 g/kg/h	↑	HA SUBE
HA	dHA1h < -0,05 g/kg/h	↓	HA BAJA
HA	dHA1h <= 0,05 g/kg/h	→	HA ESTABLE

Estrategia de sensor y heater

Estado	Condición orientativa	Tratamiento recomendado
OK	HR < 95 % y lectura normal	Registrar y calcular ITC normal.
HIGH_RH	HR >= 95 % y < 99,5 %	Registrar como humedad alta; no activar heater por sí solo.
SATURATED	HR >= 99,5 % y lectura coherente	Registrar como saturación ambiental válida.
SATURATED_PERSISTENT	Saturación durante horas	Usar ITC + Dinámica Ambiental; heater solo preventivo y espaciado.
RECOVERY / COOLDOWN	Tras heater o error real	Marcar el dato y evitar confundirlo con evolución ambiental.
READ_ERROR / WET_LOCKED	Error de adquisición o bloqueo persistente no coherente	No usar para ITC sin marca de baja confianza.

Criterio firmware: la saturación persistente no debe activar un heater agresivo de forma continua. Esa estrategia elimina precisamente la señal ambiental que el ITC necesita para estudiar condensación, estabilidad y renovación.

Contexto de aplicación

La aplicación de campo se centró en dos escenarios complementarios. Cueva del Puerto permitió analizar un gradiente interno muy marcado: EXTERIOR011 actuó como referencia exterior seca o no saturada, RAICES033 representó una zona de humedad alta sin saturación, ABISMO022 funcionó como sector de transición próximo a saturación y MEDUSA044 como punto de saturación persistente. Esta distribución espacial resulta especialmente adecuada para comprobar si el ITC discrimina correctamente estados ambientales diferentes dentro de una misma cavidad.

Mendukilo aportó un segundo escenario de interés por tratarse de una cavidad más fría, con menor relación de humedad absoluta que Cueva del Puerto pero con valores de HR muy próximos al 100 %. La comparación entre EXT00, MEND11, MEND22, MEND33 y MEND44 permitió evaluar la diferencia entre un exterior con pulsos húmedos puntuales, sectores interiores con saturación persistente y una estación de transición con humedad alta pero menor activación de Dinámica Ambiental. Este contraste es relevante porque demuestra que dos cuevas o dos sectores pueden presentar HR similar y, sin embargo, contener cantidades muy diferentes de vapor de agua por efecto de la temperatura.

El laboratorio completó los casos de campo mediante un ensayo controlado de saturación. La presencia de un equipo exterior y otro en el interior de un matraz de 250 ml con 15 ml de agua cerrados herméticamente permitió verificar, en condiciones sencillas pero reproducibles, la respuesta del sistema frente a una atmósfera confinada y saturada. Este ensayo no sustituye a la validación en cavidad real, pero ayuda a comprobar la lógica de firmware y la coherencia básica del ITC antes de su aplicación en series de campo.

Resultados

El análisis de los registros de 15 minutos muestra que el ITC discrimina de forma coherente entre los distintos estados observados. En Cueva del Puerto, EXTERIOR011 presentó una HR media de 56,20 %, un gap medio de 10,19 °C y una mediana de ITC de 15, sin activación de Dinámica Ambiental. RAICES033 mostró HR media de 94,05 %, gap medio de 0,98 °C y mediana de ITC de 44, lo que corresponde a humedad alta pero aún con margen frente al punto de rocío. ABISMO022 alcanzó HR media de 98,04 %, gap medio de 0,32 °C y mediana de ITC de 60, situándose como zona de transición próxima a saturación. MEDUSA044, por el contrario, presentó HR media de 99,99 %, gap medio prácticamente nulo, mediana de ITC de 100 y 468,00 h de Dinámica Ambiental activa, lo que confirma un régimen de saturación persistente.

En Mendukilo, EXT00 mostró un comportamiento exterior variable, con HR media de 80,36 %, gap medio de 3,83 °C y mediana de ITC de 21, aunque con algunos pulsos puntuales de humedad. MEND11 presentó HR media de 99,37 %, gap medio de 0,09 °C, mediana de ITC de 75 y 344,00 h de Dinámica Ambiental activa. La incorporación de MEND22, MEND33 y MEND44 refuerza el análisis de la cavidad: MEND22 y MEND33 acumulan más de 817 h de Dinámica Ambiental activa, con medianas de ITC de 100, mientras que MEND44 mantiene HR media elevada, pero reduce la activación a 180,75 h y presenta una mediana de ITC de 63. Esta diferencia confirma la existencia de sectores interiores con saturación persistente y sectores de transición dentro de la misma cavidad.

Las nuevas estaciones de Mendukilo muestran que la saturación fría puede ser persistente sin implicar una gran carga absoluta de vapor de agua. MEND22, MEND33 y MEND44 presentan HA medias entre 7,70 y 7,91 g/kg, muy inferiores a las de MEDUSA044 en Cueva del Puerto, pero con gaps medios bajos y episodios prolongados de proximidad al punto de rocío. Por tanto, la HR próxima al 100 % no puede compararse de forma directa entre cuevas sin considerar temperatura, punto de rocío y HA.

Estación	Horas válidas	HR media (%)	Gap medio (°C)	HA media (g/kg)	CO ₂ medio (ppm)	ITC mediana	h Din. activa
Puerto EXTERIOR011	634,25	56,20	10,19	13,64	420	15	0,00
Puerto RAICES033	750,00	94,05	0,98	14,57	937	44	0,00
Puerto ABISMO022	750,00	98,04	0,32	15,03	767	60	1,00
Puerto MEDUSA044	469,75	99,99	0,00	15,11	1593	100	468,00
Mendukilo EXT00	750,00	80,36	3,83	9,98	447	21	1,25
Mendukilo MEND11	750,00	99,37	0,09	7,74	688	75	344,00
Mendukilo MEND22	970,25	97,52	0,49	7,70	518	100	817,75
Mendukilo MEND33	960,50	97,97	0,41	7,74	535	100	838,00
Mendukilo MEND44	945,75	97,25	0,48	7,91	513	63	180,75

Tabla 2. Síntesis de los registros agregados de 15 minutos utilizados para contrastar el ITC.

Table 2. Summary of 15-minute aggregated records used to assess the ITC.

La comparación entre MEDUSA044 y las estaciones interiores de Mendukilo es especialmente significativa. MEDUSA044 alcanza condiciones de saturación persistente con una HA media de 15,11 g/kg, mientras que MEND11, MEND22, MEND33 y MEND44 se sitúan aproximadamente entre 7,70 y 7,91 g/kg. Esta diferencia confirma que la HR por sí sola no permite comparar correctamente cavidades con temperaturas distintas. El ITC, apoyado en el gap T-DP y en la HA, permite interpretar la proximidad a condensación sin confundir saturación relativa con cantidad total de vapor de agua.

Los datos de Cueva del Puerto muestran una zonificación interna clara. MEDUSA044 constituye el extremo de saturación persistente, ABISMO022 actúa como zona de pre-saturación o transición, RAICES033 representa humedad alta sin saturación real y EXTERIOR011 confirma la respuesta del índice ante una atmósfera exterior con amplio margen térmico. Esta secuencia espacial refuerza la utilidad del ITC como indicador de gradiente ambiental dentro de una misma cavidad. La figura 1 ilustra el contraste operativo entre el exterior seco y la saturación persistente en MEDUSA044.

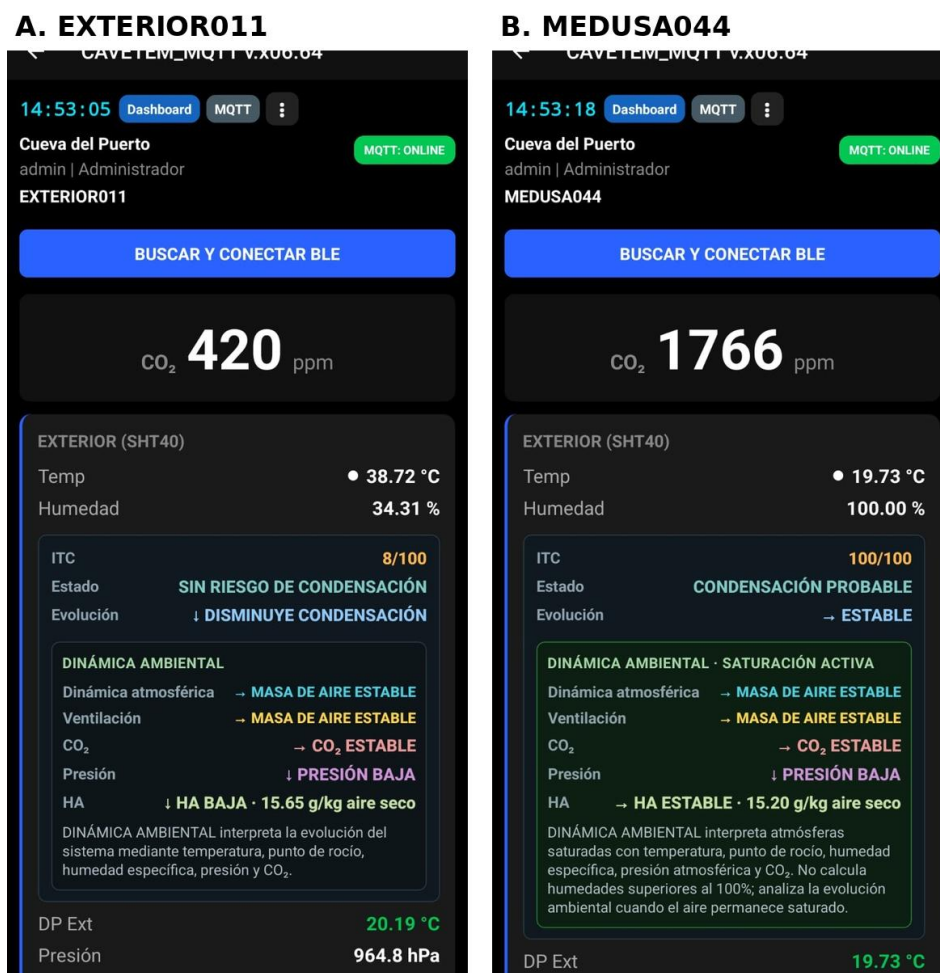


Figura 1. Respuesta contrastada del ITC en Cueva del Puerto: EXTERIOR011 muestra margen amplio y sin riesgo de condensación, mientras MEDUSA044 representa saturación persistente con ITC 100/100 y Dinámica Ambiental activa.

En Mendukilo, MEND22 y MEND33 se comportan como estaciones de saturación persistente, con numerosas horas al 100 % HR y gaps próximos a cero. MEND44, por el contrario, funciona como estación de transición: mantiene humedad alta y proximidad frecuente al punto de rocío, pero la activación de Dinámica Ambiental es mucho menor. Esta diferencia aporta un criterio analítico adicional para separar saturación sostenida, transición y humedad alta en una cavidad fría. La figura 2 muestra la diferencia entre una transición próxima a saturación y una atmósfera fría saturada en MEND11.

A. ABISMO022**B. MEND11**

Figura 2. Dos situaciones de lectura dinámica: ABISMO022 como zona de transición próxima a saturación en Cueva del Puerto y MEND11 como ejemplo de atmósfera fría saturada en Mendukilo, donde la HR alcanza 100 % pero la interpretación depende de T, DP, CO₂, presión y HA.

El ensayo de laboratorio con matraz de 250 ml y 15 ml de agua confirmó cualitativamente la diferencia entre una atmósfera exterior no saturada y una atmósfera cerrada con humedad extrema. La comparación entre el equipo exterior y el equipo situado en el volumen saturado permitió comprobar la estabilidad de la lectura en condiciones de alta HR, así como la necesidad de no disparar estrategias agresivas de calentamiento por el simple hecho de permanecer cerca del 100 %. En este contexto, la saturación se interpreta como un dato ambiental válido siempre que el sensor mantenga coherencia funcional.

En conjunto, los resultados apoyan la utilización de bandas interpretativas. Los valores de gap inferiores a 0,10 °C no deben entenderse como una medida exacta de centésimas de grado, sino como una banda de saturación probable, especialmente cuando se mantienen durante periodos prolongados. Este criterio evita sobrerrepresentar la precisión instrumental y, al mismo tiempo, permite conservar información ambiental útil en los episodios donde la HR alcanza su límite operativo.

Discusión

Los resultados obtenidos son coherentes con la bibliografía revisada. Los trabajos sobre humedad en cuevas tropicales muestran que la saturación o las desviaciones breves desde el 100 % HR son fenómenos habituales en determinados sectores subterráneos, por lo que el interés científico no reside únicamente en medir el valor máximo de HR, sino en interpretar cuándo se alcanza, cuánto persiste y cómo se relaciona con el resto de las variables ambientales (Mejía-Ortiz et al., 2021). En la misma línea, las guías de monitorización de cuevas y los trabajos sobre cuevas turísticas señalan tanto la importancia de la humedad elevada como la dificultad instrumental de medir con fiabilidad cerca de la saturación durante periodos prolongados (Cigna, 2002; Středová et al., 2013).

La revisión instrumental refuerza esta interpretación. Los sensores capacitivos de polímero, como los SHT4x, son apropiados para redes IoT por su bajo consumo, salida digital, respuesta rápida y facilidad de integración, pero no deben interpretarse como instrumentos capaces de resolver por sí solos la dinámica de una atmósfera permanentemente saturada. El heater integrado es útil para mitigar efectos reversibles de exposición prolongada a alta humedad, pero en

una cueva donde la saturación es persistente el objetivo no debe ser forzar continuamente la recuperación del sensor, sino conservar la señal y desplazar la interpretación hacia punto de rocío, gap T-DP, HA, presión y CO₂ (Gazis et al., 2025; Sensirion, 2022a; Sensirion, 2025).

La aportación del ITC es precisamente desplazar la interpretación desde el valor absoluto de HR hacia la proximidad al punto de rocío y la persistencia temporal. Este enfoque resulta coherente con la definición física de HR como relación entre humedad absoluta y humedad de saturación, y con la necesidad de incorporar variables psicrométricas complementarias cuando el sensor alcanza el techo operativo de lectura (Ullman et al., 2026; Sensirion, 2009). La comparación entre MEDUSA044 y las estaciones de Mendukilo ilustra este punto: dos atmósferas pueden estar casi saturadas en términos relativos, pero contener cantidades muy distintas de vapor de agua.

La integración de CO₂ y presión en la capa de Dinámica Ambiental también queda respaldada por la literatura. En Altamira, las variaciones de CO₂ se han utilizado como trazador de intercambio de aire y se han relacionado con gradientes térmicos interior-exterior (Sainz et al., 2022; Sainz et al., 2026). En Shawan Cave, la ventilación condiciona el CO₂ de la atmósfera interna y afecta a procesos hidrogeoquímicos vinculados al goteo y al crecimiento de espeleotemas (Lyu et al., 2020). A su vez, el registro de microvariaciones térmicas asociadas a señales barométricas en Ascunsă Cave muestra que las cuevas pueden actuar como filtros meteorológicos capaces de conservar información dinámica de la atmósfera exterior (Drăgușin et al., 2018).

Desde este punto de vista, la Dinámica Ambiental de CAVETEM no pretende demostrar por sí sola condensación superficial, sino identificar el contexto atmosférico en el que esa condensación es probable o persistente. El CO₂ ayuda a diferenciar fases de acumulación, renovación o confinamiento; la presión permite reconocer posibles cambios barométricos relacionados con ventilación; la HA permite comparar la carga real de vapor de agua; y el gap T-DP mantiene la conexión directa con la condición psicrométrica de saturación. Los nuevos datos de Mendukilo indican además que la activación de Dinámica Ambiental no debe interpretarse automáticamente como aumento de CO₂ o confinamiento, sino como una señal de saturación real que debe leerse junto al resto de trazadores.

El caso de Cueva del Puerto confirma la utilidad del ITC para cartografiar funcionalmente sectores de una misma cavidad. MEDUSA044 aparece como zona de saturación persistente, ABISMO022 como transición próxima al punto de rocío, RAICES033 como zona húmeda pero no saturada y EXTERIOR011 como referencia exterior sin riesgo. Esta lectura gradual sería difícil de obtener solo con umbrales simples de HR o CO₂, ya que RAICES033 puede presentar CO₂ elevado sin alcanzar saturación real, mientras que MEDUSA044 combina saturación persistente, mayor carga de vapor y enriquecimiento de CO₂. El informe técnico interno de Cueva del Puerto refuerza esta lectura al describir una compartimentación funcional entre ABISMO022, RAICES033 y MEDUSA044, con MEDUSA044 como dominio más enriquecido y desacoplado (Ros Vivancos, 2026a).

El caso de Mendukilo añade una lectura complementaria y más robusta tras incorporar MEND22, MEND33 y MEND44. MEND11, MEND22 y MEND33 confirman que una cueva fría puede trabajar durante largos periodos cerca de la saturación con una HA mucho menor que Cueva del Puerto. MEND44 funciona como estación de transición, con HR alta y gap bajo, pero con menor persistencia en saturación activa. El informe técnico interno de Mendukilo muestra que MEND22 y MEND33 permanecen en saturación activa durante gran parte del periodo, con gap T-DP casi nulo, mientras MEND11 concentra la señal más clara de CO₂ y respuesta barométrica. Esto tiene importancia metodológica porque impide utilizar el 100 % HR como indicador equivalente entre cavidades o sectores diferentes (Ros Vivancos, 2026c).

El ensayo de laboratorio con matraz hermético aporta una validación operativa básica. Al comparar un equipo exterior con un equipo situado en una atmósfera confinada y saturada, se comprueba que el sistema debe conservar la lectura de saturación cuando responde de forma coherente, en lugar de tratar automáticamente el 100 % HR como error. Esta decisión es relevante porque el uso excesivo del heater puede generar discontinuidades y eliminar precisamente la información ambiental más valiosa durante episodios de saturación persistente.

Las principales limitaciones del análisis son cuatro. En primer lugar, las series utilizadas no cubren todavía ciclos estacionales completos y presentan ventanas temporales diferentes entre estaciones, por lo que deberán ampliarse para evaluar mejor ventilación, turismo, meteorología exterior y recuperación ambiental. En segundo lugar, el ITC es un índice operativo y requiere contraste futuro con sensores independientes de punto de rocío, sensores de película de condensación, cámaras térmicas o mediciones directas de superficie. En tercer lugar, los umbrales actuales deben considerarse conservadores y revisables según la morfología, temperatura, ventilación y objetivos de conservación de cada cavidad. En cuarto lugar, el comportamiento del heater debe ajustarse por estación y no aplicarse como rutina agresiva en ambientes de saturación permanente. Aunque todavía no se dispone de ciclos anuales completos, los registros actuales ya identifican de forma clara los patrones necesarios para formular el ITC: acoplamiento T-DP, persistencia de HR alta, respuesta de CO₂, variación barométrica y diferencia de HA entre cuevas cálidas y frías. El método será más robusto cuando incorpore periodos estacionales completos, pero los resultados obtenidos ya permiten una lectura técnica relevante.

A pesar de estas limitaciones, el enfoque resulta defendible: no inventa humedades superiores al 100 %, no sustituye a la señal original del sensor y no transforma el índice en una medida metrológica de condensación. Su aportación es convertir la saturación persistente, frecuente en cuevas húmedas, en un estado ambiental interpretable mediante variables que siguen siendo informativas cuando la HR deja de discriminar. En este sentido, CAVETEM avanza desde la monitorización pasiva hacia una plataforma de lectura ambiental continua, capaz de apoyar decisiones de conservación, gestión de visitas y seguimiento técnico de cavidades turísticas.

Conclusiones

El ITC para equipos CAVETEM constituye una herramienta interpretativa útil para ambientes subterráneos en los que la humedad relativa permanece durante largos periodos próxima a 100,0 %. Su principal aportación no reside en corregir la humedad por encima de su límite físico, sino en traducir la saturación o casi saturación en una lectura operativa basada en proximidad al punto de rocío, persistencia temporal y coherencia entre variables.

La revisión de tecnologías de sensores confirma que los sensores capacitivos Sensirion SHT4x son adecuados para una red IoT distribuida por su bajo consumo, integración digital I²C, calibración de fábrica, estabilidad operativa, disponibilidad de heater interno y capacidad de funcionamiento en el rango 0-100 % HR. El datasheet técnico comparativo de sensores T/HR preparado para CAVETEM sitúa el SHT4x como una solución equilibrada entre robustez, precisión, resolución térmica, mantenimiento y capacidad de integración con CO₂ y presión, frente a alternativas más precisas, pero menos viables para redes multipunto como sondas de punto de rocío o evaporímetros (Ros Vivancos, 2026d). Sin embargo, cuando la saturación es permanente, el valor 100 % debe entenderse como un estado ambiental válido y no como una lectura suficiente por sí sola. En ese contexto, el heater debe utilizarse de forma prudente, evitando que una recuperación agresiva elimine la información ambiental que se pretende estudiar.

La combinación de humedad relativa, diferencia entre temperatura y punto de rocío, persistencia temporal y tendencia térmica permite diferenciar entre humedad alta, proximidad a saturación, saturación activa, saturación estable y condensación probable. La activación de la Dinámica Ambiental añade una segunda capa interpretativa basada en CO₂, presión y HA, útil para distinguir estabilidad, transición, renovación o confinamiento de la masa de aire.

Los casos analizados en Cueva del Puerto y Mendukilo muestran que la saturación no constituye un fenómeno anecdótico, sino una condición ambiental estructural en determinadas estaciones, con centenares de horas acumuladas por encima de 99,5 % HR y amplios periodos con gap T-DP inferior o igual a 0,10 °C. La incorporación de MEND22, MEND33 y MEND44 refuerza esta conclusión y permite diferenciar mejor entre saturación persistente y sectores de transición dentro de una cavidad fría.

La comparación entre Cueva del Puerto y Mendukilo confirma además que dos atmósferas casi saturadas pueden contener cantidades muy distintas de vapor de agua. Por ello, la relación de humedad en g/kg de aire seco debe mantenerse como variable complementaria para comparar cavidades con temperaturas diferentes y evitar interpretaciones simplificadas basadas solo en HR.

Como línea de trabajo futura, será necesario ampliar la validación a series estacionales más extensas, contrastar el método con sensores independientes de condensación o de punto de rocío y afinar los umbrales de decisión de la capa interpretativa. No obstante, los resultados preliminares apoyan el uso del ITC-CAVETEM como herramienta práctica para interpretar atmósferas saturadas en cuevas turísticas y patrimoniales, especialmente cuando la humedad relativa deja de ser una variable discriminante y debe integrarse en una lectura dinámica de la masa de aire. El ITC puede llegar a utilizarse como herramienta de valoración del estado de condensación potencial: permite distinguir entre ambiente saturado estable sin evidencia de aumento de condensación, proximidad activa al punto de rocío, condensación probable por persistencia y situaciones de desaturación o ventilación. Su utilidad no está en afirmar visualmente la presencia de agua líquida sobre paredes, sino en reconocer cuándo las condiciones ambientales son compatibles con su aparición, persistencia o disminución.

Referencias bibliográficas

- Armstrong International. 2018. Humidification Solutions. Sourcebook and psychrometric references for humidification processes. Armstrong International, Three Rivers.
- Badino, G. 2010. Underground meteorology - "What's the weather underground?". *Acta Carsologica*, 39 (3), 427-448.
- Camuffo, D. 2019. A method to obtain precise determinations of relative humidity using thin film capacitive sensors under normal or extreme humidity conditions. *Journal of Cultural Heritage*, 37, 166-169. DOI: 10.1016/j.culher.2018.11.003.
- Cigna, A.A. 2002. Modern trend in cave monitoring. *Acta Carsologica*, 31 (1), 35-54.
- de Freitas, C.R. 2010. The role and importance of cave microclimate in the sustainable use and management of show caves. *Acta Carsologica*, 39 (3), 477-489.

- Drăgușin, V., Tîrlă, L., Cadicheanu, N., Ersek, V. and Mirea, I.-C. 2018. Caves as observatories for atmospheric thermal tides: an example from Ascunsă Cave, Romania. *International Journal of Speleology*, 47 (1), 113-117. DOI: 10.5038/1827-806X.47.1.2235.
- Fernández-Cortés, A., Martín-Pozas, T., Cuezva, S., Cañaveras, J.C., Saiz-Jiménez, C. and Sánchez-Moral, S. 2022. Unraveling the Drivers Controlling the Transient and Seasonal CO₂ Dynamic in a Shallow Temperate Cave. *Geosciences*, 12 (9), 335.
- Gazis, A., Papadongonas, I., Andriopoulos, A., Zioudas, C. and Vavouras, T. 2025. Comprehensive review: sensor technologies, instrumentation, and signal processing in low-power IoT. *Academia Engineering*, 2, 1-14. DOI: 10.20935/AcadEng7541.
- Lyu, Y., Luo, W., Wang, Y., Zeng, G., Wang, Y., Cheng, A., Zhang, L., Chen, J., Cai, X., Zhang, R. and Wang, S. 2020. Impacts of cave ventilation on drip water $\delta^{13}\text{CDIC}$ and its paleoclimate implication. *Quaternary International*, 547, 7-21. DOI: 10.1016/j.quaint.2019.11.040.
- Mejía-Ortiz, L., Christman, M.C., Pipan, T. and Culver, D.C. 2021. What's the relative humidity in tropical caves? *PLOS ONE*, 16 (9), e0250396. DOI: 10.1371/journal.pone.0250396.
- Pla, C., Fernández-Cortés, A., Cuezva, S., Galiana-Merino, J.J., Cañaveras, J.C., Sánchez-Moral, S. and Benavente, D. 2020. Insights on Climate-Driven Fluctuations of Cave ^{222}Rn and CO₂ Concentrations Using Statistical and Wavelet Analyses. *Geofluids*, 2020, 8858295.
- Prada, A. and Bayarri, V. 2024. Methodology for the Monitoring and Control of the Alterations Related to Biodeterioration and Physical-Chemical Processes Produced on the Paintings on the Ceiling of the Polychrome Hall at Altamira. *Conservation*, 4 (4), 728-748.
- Sainz, C., Fábrega, J., Rábago, D., Celaya, S., Fernández, A., Fuente, I., Fernández, E., Quindós, J., Arteché, J.L. and Quindós, L. 2022. Use of Radon and CO₂ for the Identification and Analysis of Short-Term Fluctuations in the Ventilation of the Polychrome Room of Altamira Cave. *Applied Sciences*, 12, 9049.
- Sainz, C., Morales, I., Rábago, D., Celaya, S., Fernández, A., Fuente, I., Fernández, E., Quindós, J. and Quindós, L. 2026. Implications of daily thermal variations in the ventilation and indoor CO₂ levels in the karstic system of the Altamira Cave. *Science of The Total Environment*.
- Sensirion. 2009. Application Note: Physics of Humidity. Version 2.0. Sensirion AG, Stäfa.
- Sensirion. 2022a. Using the Integrated Heater of SHT4x in High-Humidity Environments. Application Note: Creep Mitigation. Sensirion AG, Stäfa.
- Sensirion. 2022b. Testing at Ambient Conditions. Version 3. Sensirion AG, Stäfa.
- Sensirion. 2024a. Design Guide for Humidity and Temperature Sensors. Version 2. Sensirion AG, Stäfa.
- Sensirion. 2024b. Contamination Guide for Humidity and Temperature Sensors. Version 1.1. Sensirion AG, Stäfa.
- Sensirion. 2025. Datasheet - SHT4x. 4th Gen. Relative Humidity and Temperature Sensor. Version 7.1. Sensirion AG, Stäfa.
- Středová, H., Středa, T. and Rožnovský, J. 2013. Climatic monitoring of tourist attractive caves. Conference paper, Public Recreation and Landscape Protection, Brno, Czech Republic.
- Ullman, M., Kletzerman, M., Oron, A., Porat, R., Langford, B., Frumkin, A., Jaffe, Y., Davidovich, U. and Marom, N. 2026. Year-round hourly temperature and humidity sensor readings from arid caves, Judean Desert, Israel. *Scientific Data*, 13, 105. DOI: 10.1038/s41597-025-06420-8.
- Ros Vivancos, A. 2026a. CAVETEM como observatorio IoT continuo para la interpretación de la dinámica ambiental y la espeleogénesis funcional en Cueva del Puerto. Informe técnico interno CAVETEM, TECMINSA-QALAT.
- Ros Vivancos, A. 2026b. Puerto_MQTT v.x06.6: actualización del firmware CAVETEM para registro microclimático en condiciones de humedad saturada. Informe técnico interno CAVETEM.
- Ros Vivancos, A. 2026c. Informe de dinámica ambiental Cueva de Mendukilo. Datos CAVETEM: CO₂, temperatura, humedad, presión y horarios de visita. Informe técnico interno CAVETEM, TECMINSA.
- Ros Vivancos, A. 2026d. Anexo técnico sensores T HR para CAVETEM ITC. Artículo técnico Sensores T/HR CAVETEM. Documento técnico interno CAVETEM.
- Ros Vivancos, A. 2026e. Anexo técnico - Datasheet del algoritmo ITC-CAVETEM. Índice de Tendencia de Condensación y capa de Dinámica Ambiental para cavidades con humedad extrema. Documento técnico interno CAVETEM IoT System.