

ANEXO TÉCNICO

Datasheet del algoritmo ITC-CAVETEM

Índice de Tendencia de Condensación y capa de Dinámica Ambiental para cavidades con humedad extrema

Documento vinculado: Artículo: “Índice de Tendencia de Condensación (ITC) para equipos CAVETEM en cavidades con humedad extrema: aplicación en Cueva del Puerto, Mendukilo y ensayos de laboratorio”. Este anexo no reescribe el artículo; documenta las fórmulas, parámetros, umbrales y reglas de generación del algoritmo.

Campo	Contenido
Autor / sistema	Andrés Ros Vivancos - CAVETEM IoT System
Tipo de documento	Anexo técnico / datasheet de algoritmo
Versión del anexo	v1.0 - 26/04/2026
Referencia de implementación	CAVETEM_MQTT / App.tsx, línea funcional v.x06.64: DINÁMICA AMBIENTAL + ITC tuning
Uso previsto	Documentación técnica para artículo, memoria de desarrollo, validación de firmware/app y trazabilidad científica.

Resumen técnico

El ITC-CAVETEM es un índice interpretativo 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 a partir de temperatura, humedad relativa, punto de rocío, persistencia temporal y tendencia térmica. Cuando existe saturación total real, se activa o destaca una segunda capa denominada DINÁMICA AMBIENTAL, basada en CO₂, presión atmosférica y relación de humedad expresada en g/kg de aire seco.

Índice del anexo

1. Alcance y principio de funcionamiento
2. Variables de entrada, unidades y preprocesado
3. Fórmulas psicrométricas utilizadas
4. Ventanas temporales y persistencia de saturación
5. Fórmula del ITC y reglas de puntuación
6. Clasificación de estados y topes finales
7. Capa de Dinámica Ambiental
8. Pseudocódigo de implementación
9. Casos de validación y criterios de control
10. Parámetros configurables y recomendaciones de ajuste
11. Límites de uso y trazabilidad bibliográfica

1. Alcance y principio de funcionamiento

El algoritmo parte de una situación habitual en cavidades: la HR puede permanecer durante horas o días entre 99.5 y 100.0 %, de modo que el valor instantáneo de humedad deja de discriminar la evolución del sistema. CAVETEM mantiene la lectura saturada como dato ambiental válido si el sensor responde correctamente, y traslada la interpretación a una combinación de variables físicas y temporales.

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/horas consecutivas en alta HR.
Añadir tendencia	La evolución térmica reciente modula la interpretación: enfriamiento favorece condensación; calentamiento abre margen de desaturación.
Separar ITC y Dinámica Ambiental	ITC responde “¿cuánto se aproxima a la condensación?”. Dinámica Ambiental responde “¿qué está haciendo esa masa de aire?”.
Principio clave: El ITC transforma un límite instrumental en una lectura interpretativa. El sensor no mide por encima de saturación; el algoritmo analiza si la atmósfera está estable, entrando en condensación, renovándose o confinándose.	

2. Variables de entrada, unidades y preprocesado

La tabla siguiente resume los campos mínimos usados por el cálculo. La nomenclatura extT, extH y extDP procede de la implementación de app y de los registros CAVETEM.

Variable	Símbolo	Unidad	Resolución recomendada	Uso en algoritmo
Temperatura del aire	T / extT	°C	0.01 °C	Gap T-DP, tendencia térmica, 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	CO2 / 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.

2.1 Normalización previa

Paso	Regla
HR	Clamp: HR = min(max(HR_bruta, 0), 100). Si HR > 100 por ruido o redondeo, se almacena como 100 y se conserva marca diagnóstica.
DP	Si DP no está disponible o es incoherente, se recalcula desde T y HR. Si DP > T por redondeo, usar gap = 0.00 °C.
Presión	Usar presión medida en la estación. Si falta, usar presión de referencia local solo para estimar HA y marcar confianza media/baja.
Registros	Eliminar o marcar lecturas sin T o HR. Mantener HR saturada como válida si no hay error de adquisición.
Redondeo	Mostrar T, HR, DP, gap y HA con dos decimales en modo técnico.

3. Fórmulas psicrométricas utilizadas

Las fórmulas se expresan con temperatura en grados Celsius y presión en hPa. Se usa una aproximación tipo Magnus/Tetens sobre agua líquida, suficiente para la interpretación operativa del rango térmico de las cavidades monitorizadas.

Magnitud	Fórmula	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

Magnitud	Fórmula	Salida
Déficit de presión de vapor	$VPD = \max(e_s(T) - e, 0)$	hPa
Relación de humedad	$HA = 621.98 \cdot e / (P - e)$	g/kg de aire seco

Uso de HA: En la documentación de CAVETEM se muestra como "HA 15.14 g/kg aire seco". No debe confundirse con humedad absoluta en g/m³; en este anexo HA equivale a relación de humedad o humedad específica aproximada expresada en gramos de vapor por kilogramo de aire seco.

3.1 Ejemplo de consistencia psicrométrica

En una estación saturada como MEDUSA044, si $T = 19.73\text{ °C}$, $HR = 100.00\%$ y $DP = 19.73\text{ °C}$, entonces $gap = 0.00\text{ °C}$ y $VPD \approx 0$. La HR deja de discriminar microvariaciones, pero HA, presión y CO₂ siguen aportando información de dinámica atmosférica.

4. Ventanas temporales y persistencia de saturación

El algoritmo utiliza simultáneamente lectura instantánea y tendencias. En campo se recomienda trabajar con registro vivo de 1 minuto y registros históricos agregados de 15 minutos.

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 $\approx$ 20 min	Detectar cambios rápidos por visitas, apertura de accesos o ventilación puntual.
Tendencia 1 h	Histórico o últimos registros interpolados	4 bloques de 15 min / 60 min	Calcular dT1h, dP1h, dCO21h 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 $HR \geq 99.5\%$.

4.1 Variables delta

$$dT1h = T(t_0) - T(t_0 - 1\text{ h})$$

$$dP1h = P(t_0) - P(t_0 - 1\text{ h})$$

$$dCO21h = CO_2(t_0) - CO_2(t_0 - 1\text{ h})$$

$$dHA1h = HA(t_0) - HA(t_0 - 1\text{ h})$$

dT3h, dP3h, dCO23h y dHA3h se calculan de forma equivalente para la ventana de 3 h.

5. Fórmula del ITC y reglas de puntuación

La versión documental del ITC combina puntuaciones acumulativas por humedad relativa, gap térmico, persistencia de saturación y tendencia térmica. El resultado se acota a 0-100. Esta tabla reproduce la estructura técnica adoptada en el artículo y se complementa con los topes finales incorporados durante los ajustes de app.

5.1 Condición de saturación total real

$$SATURACION_TOTAL_REAL = (HR \geq 99.5\%) \text{ AND } (gap \leq 0.10\text{ °C})$$

Regla de seguridad: Solo si se cumple SATURACION_TOTAL_REAL el ITC puede alcanzar 100/100. En cualquier otro caso el valor final queda limitado por los topes descritos en la sección 6.

5.2 Puntuación base

Componente	Condición	Puntuación
Humedad relativa	$HR \geq 95.0\%$	+20
Humedad relativa	$HR \geq 99.0\%$	+20
Humedad relativa	$HR \geq 99.5\%$	+15
Humedad relativa	$HR \geq 99.9\%$	+15
Gap térmico	$T - DP \leq 0.50\text{ °C}$	+10
Gap térmico	$T - DP \leq 0.20\text{ °C}$	+10
Gap térmico	$T - DP \leq 0.05\text{ °C}$	+10
Persistencia	Más de 1 h con $HR \geq 99.5\%$	+5
Persistencia	Más de 6 h con $HR \geq 99.5\%$	+5
Persistencia	Más de 24 h con $HR \geq 99.5\%$	+10
Tendencia térmica	T baja en la última hora	+5 a +10
Tendencia térmica	T sube en la última hora	-5 a -10

5.3 Expresión formal

$$S_{HR} = 20 \cdot I(HR \geq 95.0) + 20 \cdot I(HR \geq 99.0) + 15 \cdot I(HR \geq 99.5) + 15 \cdot I(HR \geq 99.9)$$

$$S_{gap} = 10 \cdot I(gap \leq 0.50) + 10 \cdot I(gap \leq 0.20) + 10 \cdot I(gap \leq 0.05)$$

$$S_{persist} = 5 \cdot I(t_{sat} > 1h) + 5 \cdot I(t_{sat} > 6h) + 10 \cdot I(t_{sat} > 24h)$$

$$S_T = +5/+10 \text{ si } dT1h < 0; 0 \text{ si } |dT1h| \approx 0; -5/-10 \text{ si } dT1h > 0$$

$$ITC_{pre} = S_{HR} + S_{gap} + S_{persist} + S_T$$

$$ITC = \min(\max(ITC_{pre}, 0), 100) \text{ después de aplicar los topes finales de la sección 6.}$$

5.4 Regla operativa para la tendencia térmica

dT1h	Interpretación física	Ajuste S_T
dT1h <= -0.05 °C	Enfriamiento claro en ambiente húmedo; aumenta la probabilidad de condensación.	+10
-0.05 < dT1h < -0.02 °C	Enfriamiento leve; favorece condensación.	+5
-0.02 <= dT1h <= +0.02 °C	Estabilidad térmica.	0
+0.02 < dT1h < +0.05 °C	Calentamiento leve; abre margen de desaturación.	-5
dT1h >= +0.05 °C	Calentamiento claro.	-10

6. Clasificación de estados y topes finales

Durante los ajustes de la app se separó claramente la saturación total real de las situaciones muy próximas a saturación. El objetivo es que 100/100 quede reservado a $HR \geq 99.5\%$ y $gap \leq 0.10\text{ °C}$, evitando que estaciones con HR 94-98 % se visualicen al mismo nivel que una estación totalmente saturada.

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

6.1 Topes de coherencia física

```
gap = T - DP
sat_total_real = (HR >= 99.5) && (gap <= 0.10)

if (!sat_total_real) {
  if (HR < 95 || gap > 0.70) ITC = min(ITC, 85)
  if (HR < 98 || gap > 0.35) ITC = min(ITC, 90)
  ITC = min(ITC, 96)
}

if (sat_total_real) {
  ITC puede llegar a 100
}
```

6.2 Bandas de calibración visual

Situación ambiental	ITC sugerido / esperado
HR 100 %, gap <= 0.10 °C	100
HR 98-99.4 %, gap <= 0.35 °C	90-96
HR 95-98 %, gap 0.35-0.70 °C	80-90
HR 90-95 %, gap 0.70-1.20 °C	65-85
HR baja, gap grande	0-30

Lectura de las bandas: Las bandas no representan humedades corregidas. Son rangos de presentación para que la interfaz distinga saturación real, proximidad a saturación y condiciones sin riesgo real de condensación.

7. Capa de Dinámica Ambiental

La capa de Dinámica Ambiental se diseñó para interpretar la evolución de la atmósfera cuando el ITC por sí solo puede quedar alto o incluso saturado. Usa CO₂, presión y HA como trazadores de renovación, confinamiento y estabilidad de masa de aire.

Modo visible	Condición	Cabecera
Modo general	No se cumple saturación total real.	DINÁMICA AMBIENTAL
Modo saturación activa	HR >= 99.5 % y gap <= 0.10 °C.	DINÁMICA AMBIENTAL · SATURACIÓN ACTIVA

7.1 Reglas de flechas y tendencias

Variable	Condición	Flecha	Texto visible
CO ₂	dCO21h > +100 ppm/h	↑	CO ₂ SUBE
CO ₂	dCO21h < -100 ppm/h	↓	CO ₂ BAJA
CO ₂	dCO21h <= 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
Ventilación	dCO21h < -100 ppm/h	↑	RENOVACIÓN ACTIVA
Ventilación	dCO21h > +100 ppm/h	↓	AIRE CONFINADO
Ventilación	dCO21h <= 100 y dP1h <= 0.30	→	VENTILACIÓN DÉBIL

7.2 Interpretación combinada

Combinación observada	Interpretación recomendada
CO ₂ baja + presión sube	Renovación activa o ventilación entrante probable.
CO ₂ sube + presión baja	Aire confinado o ventilación débil.
CO ₂ estable + presión estable	Ventilación débil o masa de aire estable.
HR 100 %, gap <= 0.10, CO ₂ estable, presión estable, HA estable	Saturación estable.
HR 100 %, gap <= 0.10, CO ₂ baja	Saturación con renovación.
HR 100 %, gap <= 0.10, CO ₂ sube	Saturación con confinamiento.
T baja + HA estable o sube	La condensación tiende a aumentar.
T sube + HA baja	La condensación tiende a disminuir o se abre margen de desaturación.

8. Pseudocódigo de implementación

El siguiente pseudocódigo resume la secuencia de cálculo. Los nombres de funciones se alinean con la estructura funcional descrita durante los ajustes de la app.

```

function processCavetemRow(row, previousRows) {
  // 1. Entradas
  T   = toNumber(row.extT)
  HR  = clamp(toNumber(row.extH), 0, 100)
  DP  = row.extDP != null ? toNumber(row.extDP) : dewPoint(T, HR)
  P   = toNumber(row.pres)    // hPa
  CO2 = toNumber(row.co2)     // ppm

  // 2. Psicrometría
  gap = max(T - DP, 0)
  es  = saturationVaporPressure(T)
  e   = (HR / 100) * es
  VPD = max(es - e, 0)
  HA  = 621.98 * e / (P - e)

  // 3. Tendencias
  dT1h   = delta(previousRows, 'extT', 1h)
  dP1h   = delta(previousRows, 'pres', 1h)
  dCO21h = delta(previousRows, 'co2', 1h)
  dHA1h  = delta(previousRows, 'HA', 1h)
  t_sat  = consecutiveTime(previousRows, HR >= 99.5)

  // 4. ITC
  sat_total_real = (HR >= 99.5) && (gap <= 0.10)
  ITC_pre = scoreHumidity(HR) + scoreGap(gap) + scorePersistence(t_sat) + scoreThermalTrend(dT1h)
  ITC = clamp(ITC_pre, 0, 100)
  ITC = applyFinalCaps(ITC, HR, gap, sat_total_real)
  humState = classifyITC(ITC)

  // 5. Dinámica ambiental
  dynamics = calculateAirDynamics(T, HR, DP, P, CO2, HA, dT1h, dP1h, dCO21h, dHA1h)
  ventilation = calculateVentilationState(dCO21h, dP1h)
  co2Trend = calculateCo2Trend(dCO21h)
  pressureTrend = calculatePressureTrend(dP1h)
  haTrend = calculateHumiditySpecificTrend(dHA1h)

  // 6. Salida
  return {
    ITC, humState, gap, VPD, HA,
    sat_total_real,
    header: sat_total_real ? 'DINÁMICA AMBIENTAL · SATURACIÓN ACTIVA' : 'DINÁMICA AMBIENTAL',
    dynamics, ventilation, co2Trend, pressureTrend, haTrend
  }
}

```

9. Casos de validación y criterios de control

Los casos siguientes proceden de las estaciones usadas en el desarrollo del artículo y de la memoria de ajustes. Sirven como control mínimo para no romper la lógica física del algoritmo.

Estación	Lectura de referencia	Resultado esperado
MEDUSA044	T = 19.73 °C; HR = 100.00 %; DP = 19.73 °C; CO ₂ ≈ 1766 ppm.	ITC = 100/100; CONDENSACION PROBABLE; cabecera DINÁMICA AMBIENTAL · SATURACIÓN ACTIVA.
ABISMO022	T ≈ 19.91 °C; HR ≈ 98.15 %; DP ≈ 19.61 °C; gap ≈ 0.30 °C.	ITC alto, pero nunca 100. Estado esperado: SATURACION MUY ALTA. No mostrar SATURACIÓN ACTIVA.
RAICES033	T ≈ 20.08 °C; HR ≈ 94.3-94.5 %; DP ≈ 19.14-19.18 °C; gap ≈ 0.90 °C.	ITC limitado; máximo aproximado 85. Estado: SATURACION INCIPIENTE o PROXIMO A SATURACION.
EXTERIOR011	HR baja; ejemplo HR ≈ 34-47 %; gap grande.	ITC bajo, 0-20 aprox.; SIN RIESGO DE CONDENSACION. No mostrar SATURACIÓN ACTIVA.
DEMO01	HR ≈ 39 %; ITC ≈ 4/100.	SIN RIESGO DE CONDENSACION; no etiquetar como HUMEDAD ALTA.

9.1 Estadísticos de referencia para validación prolongada

Estación	HR media (%)	HR máxima (%)	Horas >= 99.5 %	Horas ~100.0 %
Medusa044	99.71	100.0	484.75	364.75
MEND33	95.48	100.0	309.75	294.75
MEND22	99.90	100.0	269.25	215.50
MEND11	91.36	99.4	0.00	0.00
MEND44	95.24	99.3	0.00	0.00
Abismo022	97.74	98.2	0.00	0.00

10. Parámetros configurables y recomendaciones de ajuste

Los siguientes parámetros deben mantenerse como constantes visibles o configurables en el código para permitir validación futura sin cambiar la arquitectura.

Parámetro	Valor recomendado	Unidad	Comentario
HR_HIGH	95.0	%	Entrada en humedad elevada.
HR_NEAR_SAT	99.0	%	Proximidad clara a saturación.
HR_SAT	99.5	%	Umbral principal de saturación operativa.
HR_FULL	99.9	%	Saturación extrema / lectura casi bloqueada.
GAP_NEAR	0.50	°C	Proximidad a rocío.
GAP_HIGH	0.20	°C	Muy próximo a rocío.
GAP_FULL	0.10	°C	Usado junto a HR >= 99.5 para saturación total real.
GAP_EXTREME	0.05	°C	Condición extrema en puntuación base.
CO2_DELTA	100	ppm/h	Umbral de subida/bajada de CO ₂ para ventilación/confinamiento.
P_DELTA	0.30	hPa/h	Umbral de tendencia barométrica.
HA_DELTA	0.05	g/kg/h	Umbral de tendencia de relación de humedad.
DT_DELTA_LOW	0.02	°C/h	Zona muerta de estabilidad térmica.
DT_DELTA_HIGH	0.05	°C/h	Tendencia térmica clara.
SAT_1H / SAT_6H / SAT_24H	1 / 6 / 24	h	Escalones de persistencia temporal.

10.1 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 espaciado.
RECOVERY / COOLDOWN	Tras heater o error real.	Marcar el dato, 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.

11. Límites de uso y trazabilidad bibliográfica

El ITC y la Dinámica Ambiental son indicadores derivados para interpretación microclimática. Deben usarse como apoyo técnico y científico, no como medición metrológica directa de condensación líquida ni como corrección de humedad por encima de 100 %. La validación debe ampliarse con series estacionales, sensores independientes de punto de rocío o condensación superficial, y contraste entre estaciones interiores/exteriores.

Límite	Implicación
DP no independiente cuando HR = 100 %	Si DP se calcula desde T y HR, en saturación se iguala a T. Por eso se añaden persistencia, CO ₂ , presión y HA.
Sensores capacitivos en HR extrema	Pueden presentar histéresis, creep, microcondensación o recuperación lenta. Se documenta estado y confianza.
Presión	No se usa para "corregir" la humedad; se usa como indicador de masa de aire y ventilación.
CO ₂	Excelente trazador de renovación/confinamiento, pero puede estar influido por visitantes y actividad biológica.
HA	Aporta contenido real de vapor, pero depende de presión y temperatura; debe interpretarse con tendencia, no como valor aislado.

11.1 Documentos fuente internos

Documento	Uso en este anexo
Artículo ITC-CAVETEM revisado v3	Base conceptual, metodología, tabla de componentes ITC, estadísticos de saturación y casos de validación.
Memoria de cambios “Índice de tendencia de condensación”	Ajustes de app, topes ITC, condición de saturación total real, reglas de Dinámica Ambiental, flechas y versionado v.x06.64.

11.2 Referencias bibliográficas principales

- 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.
- 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.
- 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.
- 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 ²²²Rn and CO₂ Concentrations Using Statistical and Wavelet Analyses. Geofluids, 2020, 8858295.
- Sainz, C. et al. 2022. Use of Radon and CO₂ for the Identification and Analysis of Short-Term Fluctuations in the Ventilation of the Polychrome Room Inside the Altamira Cave. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(6), 3662.
- Sensirion. 2009. Application Note: Physics of Humidity. Version 2.0. Sensirion AG, Staefa.
- Sensirion. 2022. Using the Integrated Heater of SHT4x in High-Humidity Environments. Application Note: Creep Mitigation. Sensirion AG, Staefa.
- Sensirion. 2024a. Design Guide for Humidity and Temperature Sensors. Version 2. Sensirion AG, Staefa.
- Sensirion. 2024b. Contamination Guide for Humidity and Temperature Sensors. Version 1.1. Sensirion AG, Staefa.
- Sensirion. 2025. Datasheet - SHT4x. 4th Gen. Relative Humidity and Temperature Sensor. Version 7.1. Sensirion AG, Staefa.

Cierre técnico: Este datasheet puede incorporarse como anexo independiente al artículo ITC. Su función es permitir que el lector reproduzca las reglas de cálculo, identifique los parámetros configurables y diferencie claramente entre medición instrumental, índice interpretativo y dinámica ambiental.