

CONAMA 2024

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Proyecto K-HEALTHinAIR.

Calidad de aire interior y salud.



Autor Principal: Jose Feroso Domínguez (CARTIF)

Otros autores: Alicia Aguado Pesquera (CARTIF); Sandra Rodríguez Sufuentes (CARTIF); Francisco Verdugo González (CARTIF); Raúl Sánchez Francés (CARTIF); Benigno Sánchez Cabrero (CIEMAT); Alberto Rodríguez López (CIEMAT); Josep Roca (FRCB-IDIBAPS/UB); Rubén González-Colóm (FRCB-IDIBAPS/UB); Alba Gómez-López ((FRCB-IDIBAPS/UB); Laura Martín Torrijos (RJB-CSIC); Javier Diéguez Uribeondo (RJB-CSIC); César Mediavilla (ATOS-EVIDEN); Alberto Acebes (ATOS-EVIDEN); Oguz Mulayim (IIIA-CSIC); Jesús Cerquides Bueno (IIIA-CSIC); Eva Armengol (IIIA-CSIC); Mireia Ferri (KVELOCE); Leticia Pérez (KVELOCE); María Figols (inBiot); Xabi Aláez (inBiot); Carla Martins (UNL); Susana Viegas (UNL); Vânia Teófilo (UNL); Marta Clemente (UNL); Johannes Dalheimer (M+H); Martin Lehmann (M+H); Wojciech Hanke (NOFER); Slawomir Brzeznicki (NOFER); Artur Badyda (WUT); Adam Muszynski (WUT); Hanns Moshammer (MUW); Alexandra Kristian (MUW); Henrik Kofoed Nielsen (UiA); Tore Sandnes Vehus (UiA); Shahla Ghaffari Jabbari (UiA); Natalia Allegretti (ECHA); Dimitris Georgoulis (ECHA); Amy van Grieken (ERASMUS); Simon de Leede (ERASMUS); Alicia Armentia (UVA/HURH)

CARTIF Centro Tecnológico (Boecillo, Valladolid)

FOTOAIR-CIEMAT – Grupo FOTOAIR - Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Madrid)

FRCB-IDIBAPS – Fundació de Recerca Clínic Barcelona – Institut d'Investigacions Biomèdiques August Pi i Sunyer (Barcelona)

UB – Universidad de Barcelona, Facultad de Medicina (Barcelona)

RJB-CSIC – Real Jardín Botánico – Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Madrid)

IIIA-CSIC – Artificial Intelligence Research Institute (IIIA) – Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Barcelona)

ATOS-EVIDEN – Eviden and Atos Business, Research and Development (Madrid)

inBiot – inBiot Monitoring S.L. (Multiva, Navarra)

KVELOCE - Kveloce (Senior Europa S.L.) (Valencia)

UNL - NOVA National School of Public Health, NOVA University Lisbon – (Lisboa, Portugal)

M+H – Mann + Hummel (Ludwigsburg, Alemania)

WUT – Warsaw University of Technology (Varsovia, Polonia)

NOFER – Nofer Institute of Occupational Medicine (Lodz, Polonia)

MUW – Medical University of Wien (Viena, Austria)

UiA – University of Agder (Kristiansand, Noruega)

UVA – Universidad de Valladolid (Valladolid)

HURH – Hospital Universitario Rio Hortega (Valladolid)

Contenido

1. TÍTULO	2
2. PALABRAS CLAVE.....	2
3. Acrónimos	2
4. RESUMEN	3
5. INTRODUCCIÓN.....	4
6. OBJETIVOS.....	6
7. METODOLOGÍA	7
7.1. Selección de grupos vulnerables y entornos representativos. Escenarios y pilotos.....	8
7.2 Mediciones de la calidad de aire interior.....	11
Monitorización masivo de IAQ.....	12
Calidad de aire exterior	12
Muestreos de Compuestos Orgánicos Volátiles	13
Muestreos de material particulado.....	14
Muestreo PAH en orina.....	16
Radón	16
Microbioma	17
7.3. Vigilancia Médica y Correlación con la Salud	18
7.4. Análisis de Datos Mediante Big Data e Inteligencia Artificial	18
7.5. Identificación de Fuentes de Contaminación.....	19
7.6. Desarrollo de Soluciones y Planes de Intervención	19
7.7. Plataforma de Acceso Abierto para Compartir el Conocimiento.....	19
7.8. Propuestas Normativas y Acciones de Sensibilización.....	20
7.9. Colaboración con otros proyectos. CLUSTER IDEAL.....	20
8. RESULTADOS ESPERADOS	21
9. CONCLUSIONES.....	23
10.DISCLAIMER.....	24
11.BIBLIOGRAFÍA.....	24

1. TÍTULO

Proyecto K-HEALTHinAIR. Calidad de aire interior y salud.

2. PALABRAS CLAVE

Calidad aire interior, salud, monitorización, dióxido de carbono, material particulado, formaldehído, microbioma, compuestos orgánicos volátiles, fuentes de contaminación interior

3. ACRÓNIMOS

Abreviatura	Descripción
CO ₂	Dióxido de carbono
CO	Monóxido de Carbono
COVs	Compuestos orgánicos volátiles
HVAC	Sistemas de calefacción, ventilación y Aire acondicionado, por sus siglas en inglés <i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>
H	Inteligencia Artificial
IAQ	Calidad de aire interior, por sus siglas en inglés <i>Indoor Air Quality</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
K-HiA	K-HEALTHinAIR project
KPI	Indicadores clave de desempeño, por sus siglas en inglés <i>Key Performance Indicators</i>
LCS	Sensor de bajo coste, por sus siglas en inglés <i>Low Cost Sensor</i>
NO _x	Óxidos de nitrógeno
OAQ	Calidad de aire exterior, por sus siglas en inglés <i>Outdoor Air Quality</i>
PAH	Policíclicos Aromáticos Hidrocarbonados
PM	Material particulado
PROMS	Resultados Reportados por el Paciente, por sus siglas en inglés <i>Patient-Reported Outcome Measure</i>
PREMS	Experiencia Reportada por el Paciente, por sus siglas en inglés <i>Patient-Reported Experience</i>
RH	Humedad relativa
T	Temperatura
WG	Grupo de trabajo, por sus siglas en inglés <i>Work Group</i>

4. RESUMEN

El proyecto K-HEALTHinAIR tiene como objetivo evaluar los efectos de la calidad del aire interior (IAQ) en la salud, a través de una extensa campaña de monitorización de contaminantes químicos y biológicos en diversos entornos representativos de la Unión Europea. Este estudio permitirá identificar las principales fuentes de contaminación y analizar las interacciones y correlaciones entre la IAQ y problemas de salud, ofreciendo soluciones innovadoras, asequibles y de fácil implementación para mejorar la calidad del aire en espacios interiores.

La metodología abarca actividades de monitorización masivo en continuo a través de sensores de bajo coste, muestreo, análisis y caracterización, garantizando un enfoque multidisciplinario que involucra a grupos vulnerables como pacientes de alto riesgo, personas mayores y niños en 10 escenarios distribuidos en 5 estudios piloto y en 6 países europeos, asegurando un amplio alcance y representatividad.

K-HEALTHinAIR proporcionará datos estructurados y precisos, indicadores clave y análisis de riesgos, todo ello disponible en una plataforma abierta. Además, se desarrollarán herramientas accesibles para que los ciudadanos puedan monitorizar la IAQ, identificar riesgos para la salud y aplicar soluciones adecuadas de mitigación en sus entornos. Los resultados iniciales permitirán definir sistemas de monitorización integrados con signos vitales y sistemas de climatización (HVAC), diseñados para ofrecer entornos saludables mediante tecnologías sostenibles y rentables. Los escenarios de estudio incluyen una variedad de edificios, como dos hospitales, una residencia de mayores, una estación de metro, un mercado, varias cantinas, una residencia de estudiantes, casas y escuelas, seleccionadas por su alta ocupación y su potencial exposición a contaminantes, lo que permitirá que los hallazgos sean replicables en otras zonas de la UE.

5. INTRODUCCIÓN

La calidad del aire interior (IAQ, por sus siglas en inglés, *Indoor Air Quality*) ha cobrado una importancia significativa en los últimos años debido a su impacto en la salud humana, especialmente considerando que, en promedio, una persona pasa entre el 80 % y el 90 % de su tiempo en espacios interiores. Una mala calidad del aire interior se asocia con una variedad de efectos adversos para la salud, incluyendo enfermedades cardiovasculares, problemas respiratorios y trastornos de salud mental (Wesseling et al., 2019; Liu et al., 2022; Hossein Motlagh et al., 2020), contribuyendo a aproximadamente 3.2 millones de muertes en 2020. Esta exposición prolongada a ambientes cerrados subraya la necesidad de monitorizar y mantener una buena calidad del aire. A pesar de la creciente conciencia sobre la contaminación del aire exterior, los ambientes interiores pueden ser hasta cinco veces más contaminados (Wesseling et al., 2019; Liu et al., 2022), lo que convierte el monitorización de espacios interiores, como hogares, escuelas, hospitales y residencias para ancianos, en un área de investigación crucial. Es esencial no solo reaccionar rápidamente cuando los niveles de calidad del aire se deterioran, sino también desarrollar soluciones proactivas que ayuden a prevenir la exposición a contaminantes nocivos. Por todo ello, monitorizar eficazmente los ambientes interiores es clave para lograr este objetivo, ya que proporciona la información necesaria para mantener una calidad de aire segura y mitigar posibles riesgos antes de que surjan.

Las políticas de la UE han abordado varios determinantes de la calidad del aire interior, desde el aire ambiental hasta los materiales de construcción y los productos de consumo, los sistemas de calefacción y refrigeración, así como los hábitos de fumar. Sin embargo, muchos de estos determinantes son desconocidos, dado que, a pesar de ser perjudiciales para la salud, no suelen estar presentes de forma constante. Además, actualmente la mayoría de estudios (Van Tran et al., 2020) se centran en parámetros muy específicos, en escenarios igualmente específicos, o si no es así, se realizan en tiempo muy limitado, y no permite analizar la exposición. Por ello, el concepto *exposoma* (*EXPOSOME - The European Human Exposome Network (EHEN)*, n.d.) (entendiéndose como la suma de todas las exposiciones que una persona experimenta a lo largo de su vida) cobra importancia, especialmente para efectos crónicos, y debe ser incluido en el análisis de datos: es necesario un estudio integrado y extendido de la calidad de aire interior para identificar los contaminantes existentes, su concentración, su presencia a lo largo del tiempo, y sus efectos en la salud humana.

La monitorización de la calidad de aire interior es, por tanto, fundamental, especialmente en espacios cerrados donde la ventilación es limitada y las personas pasan la mayor parte de su tiempo. Entre los contaminantes más críticos a evaluar se encuentran los compuestos orgánicos volátiles (COVs), formaldehído, partículas en suspensión (PM) y dióxido de carbono (CO₂) (Gopalakrishnan et al., 2021).

La concentración de PM, especialmente las de diámetro menor a 2.5 µm (PM_{2.5}), representan un grupo de contaminantes de interés y desempeñan un papel crítico en la IAQ debido a que han sido fuertemente asociadas con efectos adversos para la salud al penetrar profundamente en el sistema respiratorio y desencadenar o agravar enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como un aumento en la mortalidad (Chen et al., 2020). Su presencia en ambientes interiores ha sido asociada con un incremento en la prevalencia de síntomas asmáticos y otros problemas respiratorios (Brook et al., 2010; *Efectos Del Material Particulado (PM) Sobre La Salud y El Medioambiente* / US EPA, n.d.). Estudios recientes han destacado que

el PM puede actuar como un vector de virus, potencialmente aumentando la transmisión de enfermedades infecciosas en entornos cerrados (Nair et al., 2022). La inhalación de partículas finas permite que estos contaminantes penetren profundamente en el sistema respiratorio, exacerbando los riesgos para la salud, especialmente en poblaciones vulnerables.

Por otro lado, el CO₂ se produce principalmente como subproducto de la respiración humana y, aunque no es tóxico en concentraciones bajas, niveles elevados en interiores pueden indicar una ventilación insuficiente. La exposición prologada a altos niveles puede causar dolores de cabeza y fatiga (López et al., 2023). Además de todos estos efectos en la salud, existen también investigaciones en las que se muestra como ciertos elementos de la salud mental y el bienestar se ven afectados por la calidad de aire interior, como la ansiedad, la disminución de la productividad a nivel académico y laboral, y trastornos mentales graves. (Bhui et al., 2023; Cedeño Laurent et al., 2021). Además, el CO₂ se reconoce cada vez más no solo como un indicador de la eficiencia de la ventilación, sino también como un posible marcador de riesgo de transmisión de enfermedades por vía aérea, dado que concentraciones más altas de CO₂ indican ventilación insuficiente, lo que puede llevar a una acumulación de aerosoles infecciosos (Peng & Jiménez, 2021). Por lo tanto, mantener bajos niveles de CO₂ en ambientes interiores es crucial para reducir el riesgo de transmisión de patógenos respiratorios.

Los COVs son compuestos químicos que se volatilizan fácilmente a temperatura ambiente y se encuentran en productos como desinfectantes, pinturas y muebles. Entre estos, el formaldehído es especialmente preocupante debido a su toxicidad y potencial para irritar las vías respiratorias y oculares, e incluso sugiere un riesgo cancerígeno tras exposiciones prolongadas (*Formaldehído y El Riesgo de Cáncer*, n.d.). Estudios recientes han demostrado que concentraciones elevadas de COVs pueden estar relacionadas con el síndrome del edificio enfermo, una condición que causa síntomas como irritación de ojos, nariz y garganta, fatiga y dolor de cabeza (Rouf et al., 2022). Estos contaminantes, aunque menos peligrosos de forma inmediata en comparación con el material particulado en términos de impactos agudos en la salud, contribuyen a la carga general de contaminación del aire interior y requieren una monitorización continuo para garantizar entornos seguros.

Tradicionalmente, el monitorización de la IAQ ha dependido de instrumentos de referencia costosos y de alto mantenimiento que miden con precisión el CO₂, los COVs, la PM, etc. Sin embargo, estos sistemas suelen ser inaccesibles para el público en general debido a sus altos costes. En respuesta, han surgido sensores de bajo coste (LCS, por sus siglas en inglés, *Low Cost Sensors*) como una solución asequible para el monitorización de contaminantes en tiempo real, volviéndose indispensables para el monitorización de estos contaminantes y ofreciendo el potencial de implementación generalizada en espacios interiores. Su bajo coste permite una instalación más amplia en comparación con los dispositivos tradicionales, promoviendo su uso en hogares, oficinas, escuelas y hospitales. Además, su tamaño compacto y portabilidad facilitan la creación de redes de sensores distribuidos, que proporcionan datos con una mayor cobertura espacial y temporal, permitiendo un control más efectivo de la IAQ. Estos sensores de bajo coste también son compatibles con tecnologías IoT (por sus siglas en inglés, *Internet of Things*), lo cual permite la transmisión y visualización de datos en tiempo real a través de aplicaciones móviles y plataformas en línea. Esto no solo facilita el monitorización continuo y la respuesta rápida ante picos de contaminación, sino que también permite a los usuarios identificar patrones y tomar decisiones informadas para mejorar la calidad del aire (Ródenas García et al., 2022).

Por todo lo anterior, *K-HEALTHinAIR* propone una investigación multidisciplinaria para avanzar en la caracterización de la calidad del aire interior así como en la identificación de los principales determinantes y en las fuentes que afectan la salud de las personas mediante la correlación de la IAQ con datos de salud pública y otras fuentes de datos relevantes, y en el desarrollo de soluciones futuras para una monitorización accesible y fácil de usar, así como opciones asequibles de tratamiento de aire interior.

6. OBJETIVOS

El proyecto *K-HEALTHinAIR* tiene como **objetivo principal** la evaluación científica de los efectos de la calidad del aire interior (**IAQ**, por sus siglas en inglés) sobre la **salud**, basada en una extensa campaña de monitorización de contaminantes químicos y biológicos en diversos entornos interiores representativos de la Unión Europea. Mediante esta monitorización se identificarán las principales fuentes de contaminación, sus interacciones y se buscarán las correlaciones entre la calidad del aire y los problemas de salud. El proyecto ofrecerá soluciones innovadoras, asequibles y fáciles de implementar para monitorizar y mejorar la calidad del aire en interiores.

K-HEALTHinAIR generará conocimiento estructurado proveniente de las etapas de monitorización, caracterización e investigación, que incluirá datos extensos y precisos, indicadores (KPIs), y un análisis sobre los riesgos para la salud. Estos datos estarán disponibles en una plataforma y en un formato abierto para apoyar a las autoridades públicas, responsables políticos y otros actores clave. Además, se desarrollarán herramientas y soluciones para que los ciudadanos, como principales usuarios finales, puedan monitorizar la IAQ e identificar riesgos para la salud y aplicar soluciones adecuadas para mitigar estos riesgos en los ambientes en los que se mueven.

Como objetivos específicos se pueden destacar los siguientes por lo relevante de las acciones complementarias propuestas en el proyecto:

- **Desplegar campañas de monitorización de la calidad del aire interior en 10 escenarios** diferentes (hospitales, pacientes, estaciones de metro, mercados, residencias de mayores, comedores colectivos, residencias de estudiantes, salas de



Figura 1. Distribución geográfica de los pilotos y escenarios del proyecto K-HEALTHinAIR.

conferencias, casas particulares y escuelas), ubicados en seis países europeos (España, Países Bajos, Noruega, Alemania, Polonia y Austria) y concebidos bajo 5 estudios piloto. En algunos de los escenarios, además, se consideran además estudios complementarios de salud a grupos de población vulnerables, como pacientes de alto riesgo, personas de avanzada edad y niños.

- **Recopilar información complementaria** al monitorización de la calidad del aire interior, principalmente datos de salud pública de los sistemas de vigilancia de la salud y conjuntos de datos de hospitales participantes, datos de calidad de aire exterior y otra información relevante en las áreas de referencia de los estudios piloto. Esta información también incluirá datos de bienestar obtenidos a través de cuestionarios y entrevistas, y la evaluación de factores sociales y económicos que afectan la IAQ. Esta información será clave para mejorar la comprensión de los impactos de la calidad del aire en la salud.

- **Análisis de los efectos de la IAQ sobre la salud y la identificación de los principales determinantes y fuentes de contaminación** mediante correlaciones holísticas entre la caracterización de la IAQ y los datos médicos obtenidos de los sistemas de vigilancia de la salud y de la información complementaria recopilada. Este sofisticado análisis se llevará a cabo a través de **Big Data** mediante **algoritmos de IA** (Inteligencia Artificial) que también integrará la identificación de patrones utilizando datos disponibles (de la OSHA, OMS, etc.) complementado con ensayos clínicos y pruebas (que incluyen estudios in vivo/in vitro), involucrando al menos a 200 pacientes ambulatorios.

- **Diseñar soluciones y planes de intervención** para mejorar la calidad del aire interior en cada uno de los escenarios representativos según la información monitoreada y el diagnóstico de los efectos en la salud. Estas soluciones incluirán sistemas de monitorización más accesibles y que generen mensajes más útiles, el desarrollo de un **nuevo sensor de aflatoxinas** para la detección de problemas generados por *aspergillus*, y sistemas híbridos de tratamiento del aire que combinen filtración y fotocatalisis. Se crearán guías para identificar los principales determinantes y apoyar intervenciones personalizadas en otros entornos futuros.

- **Desarrollar una plataforma de acceso abierto** para compartir la información, los resultados de los análisis y las soluciones generadas por el proyecto, que permita a los interesados consultar fácilmente los datos y las recomendaciones, garantizando el estricto cumplimiento de los principios del RGPD, asegurando el anonimato y la confidencialidad. Esta plataforma facilitará la creación de nuevas normativas basadas en ciencia, apoyando a los responsables políticos a nivel europeo.

- **Proponer nuevas normativas y estándares** para la mejora de la calidad del aire interior, en colaboración con otras iniciativas, proyectos relacionados y los responsables de políticas a nivel europeo, basadas en los hallazgos científicos del proyecto.

7. METODOLOGÍA

La metodología del proyecto se estructura en torno a la implementación de actividades científicas y técnicas que abarcan el monitorización de la calidad de aire interior, el análisis de datos de salud y el desarrollo de soluciones prácticas. Todo ello se realiza con un enfoque multidisciplinario que involucra a varios **grupos vulnerables** (pacientes de alto riesgo, personas mayores y niños) en diversos entornos representativos en Europa (**5 estudios piloto distribuidos**

en **10 escenarios en 6 países europeos**), garantizando de esta manera un amplio alcance y representatividad tanto en las ubicaciones como en los ocupantes.

El despliegue de investigación científica en estos pilotos, permitirá generar resultados relevantes y conocimiento asociado sobre la caracterización de la IAQ, sus efectos en la salud y las posibles soluciones para su mitigación, siendo completamente replicable en otras zonas de la UE sin grandes necesidades de adaptación.

El objetivo principal es identificar los **principales determinantes de la salud** en la IAQ europea que afectan la salud de las personas. Para ello, el proyecto combinará una recolección sistematizada y completa de datos relacionados con la IAQ con un análisis avanzado de estos datos, utilizando para ello el algoritmo de IA y pruebas clínicas. El conocimiento generado se compartirá en bases de datos abiertas, guías temáticas y propuestas de nuevas regulaciones a través de la Plataforma Abierta de Conocimiento. Los primeros resultados se aplicarán para definir soluciones de monitorización fáciles de usar que integren la IAQ con los signos vitales personales y los sistemas HVAC para ofrecer servicios de prevención de la salud y entornos saludables mediante tecnologías rentables y respetuosas con el medio ambiente.

Todo esto se desarrollará mediante la metodología que se explicará a continuación, la cual sigue una serie de etapas claramente definidas para garantizar resultados sólidos y aplicables a escala europea, las cuales se detallan a continuación.

7.1. Selección de grupos vulnerables y entornos representativos. Escenarios y pilotos.

Dentro de *K-HEALTHinAIR* se han seleccionado cinco estudios piloto en seis países europeos (España, Países Bajos, Noruega, Alemania, Polonia y Austria) que garantizan una amplia representatividad a nivel de la Unión Europea. Estos 5 pilotos cubren los efectos agudos y crónicos de la IAQ, incluyendo contaminantes físicos, químicos y biológicos, así como infecciones transmitidas por el aire. *K-HEALTHinAIR* recopilará toda la información necesaria para identificar los principales determinantes y sus fuentes, y propondrá planes de intervención para mejorar la salud.



Figura 2. Identificación de los pilotos y los escenarios incluidos en cada uno de ellos en el proyecto K-HEALTHinAIR.

Los escenarios incluyen **hospitales, residencias de ancianos, estaciones de metro, mercados, comedores, residencias estudiantiles, hogares y escuelas**, lo que cubre una diversidad de

infraestructuras y tipos de edificaciones, donde las personas pasan la mayor parte de su tiempo en interiores. Estos entornos también han sido seleccionados por su relevancia en cuanto a la posible exposición a contaminantes en el aire interior. Además, se presta especial atención a grupos vulnerables como pacientes de alto riesgo, personas mayores y niños debido a su mayor susceptibilidad a los efectos negativos de la IAQ.

En la Tabla 1 se muestran las actuaciones que se realizarán en cada escenario para poder determinar los principales determinantes, así como sus fuentes.

Tabla 1. Caracterización de los escenarios.

K-HEALTHinAIR Escenarios										
K-HEALTH	OUTPATIENTS	HOSPITAL	METRO-STATION	MARKET	SENIOR HOME	CANTEEN	STUDENTS RESIDENCE	LECTURE HALL	HOME	SCHOOL
Vigilancia médica	X	X	-	-	X	-	-	-	-	-
Monitorización biológica (metabolitos urinarios PAHs)	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-
COVs & Químicos	X	X	X	X	-	X	X	X	-	X
PMs	-	X	X	X	-	X	-	-	X	X
Microbioma	X	X	X	X	-	X	-	X	-	X
Radon	-	X	X	-	-	-	-	-	X	-
Datos salud pública	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Monitorización masiva	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Salud mental y calidad de vida	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
PROMS / PREMS	X	X	X	X	X	-	-	-	-	-
Otros datos	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Para ello, K-HEALTHinAIR incluye un conjunto completo de monitorización de datos:

- ❖ **Vigilancia médica.** Se incluye la recopilación de datos relacionados con la salud a través de una vigilancia médica, mediante la realización de espirometrías, monitorización mediante Beat One Watch (<https://beat-one.com/producto/la-salud-en-tu-mano/>), etc.
- ❖ **Monitorización biológica.** Consiste en una monitorización de salud de para evaluar la presencia de metabolitos de PAHs.
- ❖ **COVs y químicos.** Muestreo de agentes clave que afectan la salud, como COVs y químicos entre los que se encuentra el formaldehído.
- ❖ **PMs.** Muestreo de agentes clave que afectan la salud, como por ejemplo la concentración de PM.
- ❖ **Microbioma.** Muestreo de agentes clave que afectan la salud, como el microbioma.
- ❖ **Radón.** Muestreo de agentes clave que afectan la salud, como el radón.

❖ **Datos salud pública.**

❖ **Monitorización masiva.** Esta monitorización consiste en una monitorización continua en cada escenario. Para ello se colocarán sensores de INBIOT y/o de KAITERRA midiendo parámetros relevantes como la T, RH, CO₂, PM, COVs y formaldehído.

❖ **Salud mental y calidad de vida.** Recopilación de datos relacionados con la salud y el bienestar, tales como quejas de salud experimentadas, síntomas de salud física, bienestar, el uso de parámetros adicionales de monitorización de salud, varios resultados informados por los pacientes, a través de cuestionarios realizados por los grupos objetivo de cada escenario.

❖ **PROMS y PREMS.** Los pacientes ambulatorios de alto riesgo serán monitoreados intensivamente durante el estudio mediante: i) seguimiento de registros médicos electrónicos (incluyendo pruebas periódicas de función pulmonar), ii) encuestas digitales de PROMS (medidas de resultados informados por el paciente) y PREMS (medidas de experiencia informadas por el paciente), iii) dispositivos de muñeca para medir actividad física, frecuencia cardíaca, variabilidad, temperatura, saturación de oxígeno y presión arterial, y iv) un monitor portátil de calidad del aire, que mide PM, COV, temperatura y humedad relativa (y posteriormente O₃ y NO₂). Estos datos permitirán identificar alteraciones en los signos vitales que indiquen posibles determinantes de salud en este grupo vulnerable, sirviendo además como indicadores de posibles problemas de salud para la población general.

❖ **Otros datos.** La recolección de datos de OAQ en las áreas circundantes y su comparación con la IAQ. Los datos de OAQ se recogerán a través de la plataforma de Aeris Weather.

Como se ha explicado anteriormente, el estudio evalúa la IAQ de 5 pilotos en 6 países diferentes. Estos pilotos son:

1. **Barcelona (España):** Este piloto es el más holístico dentro del proyecto K-HEALTHinAIR y abarca dos enfoques: seguimiento de pacientes ambulatorios de alto riesgo con EPOC y análisis de tres entornos urbanos clave: hospital, estación de metro y mercado. En el seguimiento de 200 pacientes ambulatorios de alto riesgo, se investiga cómo la calidad del aire interior (IAQ) en sus hogares afecta la salud respiratoria, con especial atención a los contaminantes de interiores que pueden empeorar los síntomas respiratorios. Los escenarios incluyen:
 - Hospital: Estudio en el Hospital Clínic de Barcelona con 18 sensores en áreas de pacientes y personal para identificar contaminantes clave y mejorar la IAQ, protegiendo la salud de ambos grupos.
 - Estación de metro (La Barceloneta): Evaluación de IAQ en un entorno de transporte público con alta afluencia, midiendo contaminantes generados por el desgaste mecánico y las condiciones ambientales.
 - Mercado (La Concepció): Análisis de IAQ en un entorno comercial para evaluar su relación con la salud del personal.
2. **Rotterdam (Países Bajos):** Rotterdam se enfoca en pacientes ambulatorios de alto riesgo y analiza áreas hospitalarias y una residencia de ancianos. Se monitorean 50 pacientes en sus hogares y 60 en residencias, enfocándose en la relación entre la IAQ y su bienestar. Los estudios incluyen:

- Hospital: Instalación de 11 sensores en el Erasmus University Medical Center para monitorizar IAQ en áreas de pacientes y personal.
 - Residencia de ancianos (Maas Wonen Housing Corp): Monitorización de IAQ en áreas comunes para evaluar su impacto en la salud y bienestar de residentes y visitantes.
3. **Grimstad (Noruega)**: examina la IAQ y el impacto de la madera como material de construcción en tres entornos de la Universidad de Agder: comedor, residencia de estudiantes y sala de conferencias. Las áreas evaluadas incluyen:
- Cantina: Con 11 sensores en dos comedores, se analiza la influencia de la madera en IAQ y bienestar.
 - Residencia de estudiantes: Monitorización de IAQ en habitaciones seleccionadas y análisis de su impacto en la salud.
 - Sala de conferencias: Instalación de sensores en dos aulas frecuentadas por estudiantes, evaluando la carga de contaminantes en estos espacios.
4. **Ludwisburg (Alemania)**: Este piloto en Ludwigsburg identifica determinantes de IAQ en dos entornos: comedor y sala de conferencias en el Campus Heilbronn de la Universidad Técnica de Múnich. Los estudios incluyen:
- Sala de conferencias: Evaluación de IAQ en aulas para identificar contaminantes y proponer mejoras en la filtración de aire.
 - Cantina: Monitorización de IAQ en el comedor del personal, con 7 sensores distribuidos en distintas áreas.
5. **Lodz y Varsovia/ Viena (Polonia/Austria)**: Este piloto se centra en la IAQ en hogares y colegios en tres ciudades, considerando factores como sistemas de calefacción y características de construcción. Los estudios incluyen:
- Casas: Evaluación de IAQ en hogares con diferentes sistemas de calefacción en Polonia y Austria, con un enfoque en la salud de personas vulnerables.
 - Colegios: Monitorización de IAQ en 25 escuelas de Austria y Polonia, analizando su relación con eventos de salud agudos en estudiantes.

7.2 Mediciones de la calidad de aire interior

K-HEALTHinAIR ha seleccionado diferentes sistemas de caracterización de la calidad del aire mediante diferentes técnicas adaptadas a los distintos escenarios propuestos. Como primera fuente de información se ha seleccionado la instalación de equipos de monitorización de calidad de aire interior. Esta información se complementará con muestreos periódicos de COV, aldehídos (como grupo especial de volátiles que requieren una técnica analítica diferente), material particulado, material particulado asociado a PAH, microbioma y radón. Asimismo, K-HEALTHinAIR recogerá la información relativa a la calidad del aire exterior en cada una de las localizaciones de los distintos escenarios.

A continuación, se pasará a describir cada una de las técnicas de caracterización y la metodología empleada para la recogida de la información.

Monitorización masivo de IAQ

En proyecto se emplean dos monitores de IAQ diferentes. Uno de ellos es el MICA de inBiot (<https://www.inbiot.es/productos/dispositivos-mica/mica>) que proporciona monitorización en continuo de temperatura, humedad relativa, compuestos orgánicos volátiles totales, y concentración de formaldehído y de material particulado (1, 2.5, 4 and 10 μm de tamaño de partícula). Este dispositivo se emplea en los pilotos 1, 2 y 3. El otro dispositivo empleado es el Kaiterra Sensedge Mini SE-200P (<https://www.kaiterra.com/technical-specifications-sensedge-mini>) que proporciona monitorización en continuo de temperatura, humedad relativa, compuestos orgánicos volátiles totales, y concentración de material particulado (2.5 and 10 μm de tamaño de partícula).

Los monitores IAQ registran los datos con una periodicidad de 10 minutos de forma que se pueden disponer de los perfiles continuos de cada parámetro.

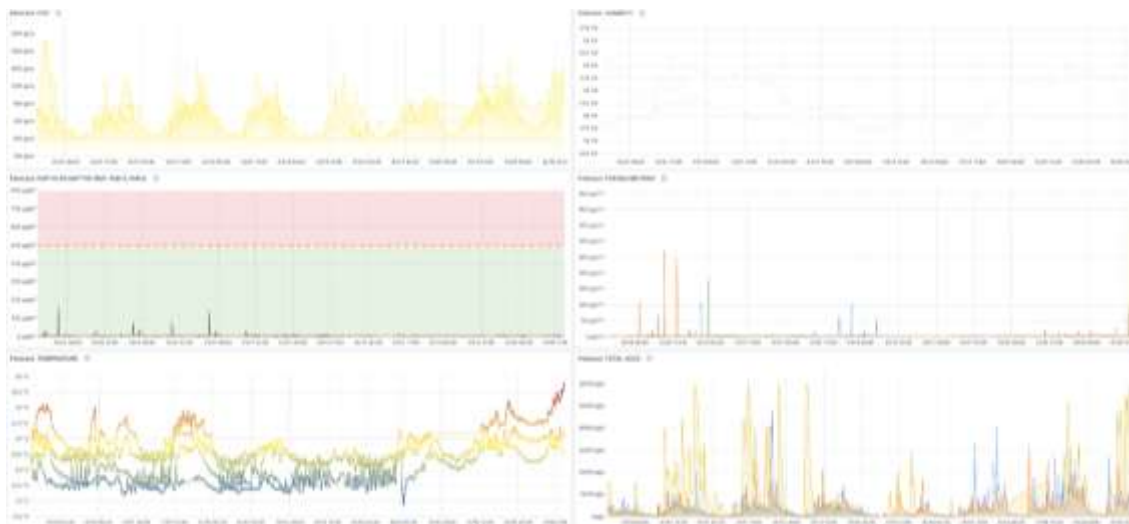


Figura 3. Captura de la vista gráfica de los registros de los sensores INBIOT (generada con la plataforma K-HEALTHinAIR).

En la Figura 3 se muestra a modo de ejemplo una captura con los registros de los sensores de inBiot en una de las ubicaciones del Proyecto durante varios días.

Calidad de aire exterior

Los datos de calidad de aire exterior se generan mediante la plataforma AerisWeather (<https://www.aerisweather.com/>), que abarca la temperatura, la humedad relativa y las concentraciones de contaminantes clave en el área circundante. Estos contaminantes incluyen PM, NO_x, CO y O₃ (en función de la disponibilidad de datos en cada localización). La incorporación de estos datos en el análisis tiene como objetivo contextualizar las condiciones del aire interior dentro del marco ambiental más amplio.

Los datos de series temporales generados a partir de OAQ se recopilan sistemáticamente y se presentan en la plataforma dedicada del proyecto. La Figura 4 muestra una instantánea de la vista gráfica de los registros de OAQ a lo largo del tiempo.

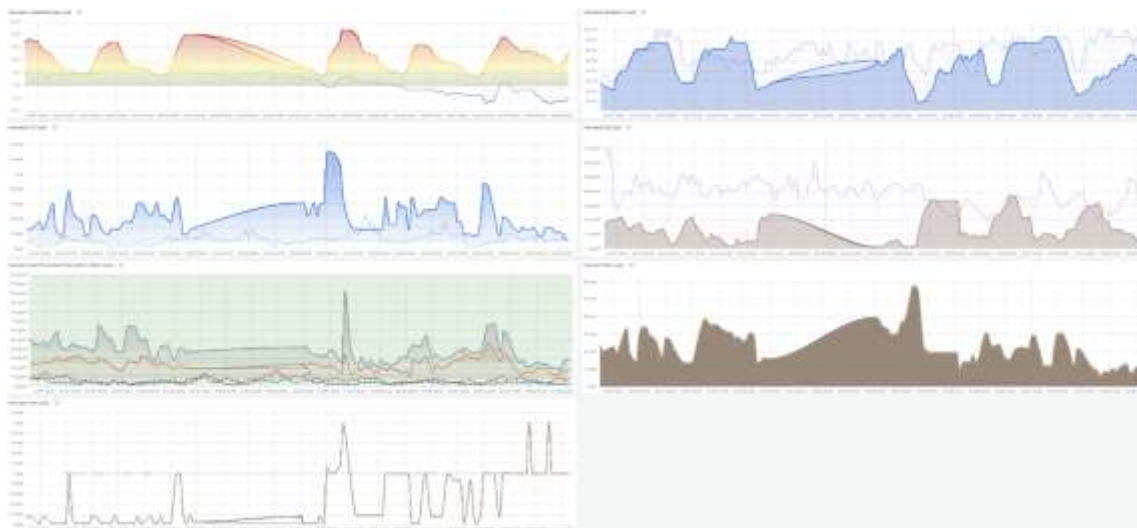


Figura 4. Captura de la vista gráfica de los registros de los datos de calidad de aire exterior (T, RH y concentraciones de CO, O₃, PM and NO_x) (generada con la plataforma K-HEALTHinAIR).

Muestreos de Compuestos Orgánicos Volátiles

El muestreo está planteado para capturar los principales COV en ambientes interiores. Se tienen dos protocolos diferentes para recoger todos los que se consideran interesantes. Un primer protocolo para volátiles en general y otro específico para aldehídos.

- **Protocolo COV** adsorbidos en Tenax y analizados mediante ATD-GC-MS: Los COV se muestrean periódicamente utilizando una bomba de 200 ml/min (ver Figura 5) durante 60 minutos en cada ubicación. Este método de muestreo activo permite capturar gases y vapores mediante el paso de aire por un tubo con adsorbente. Las muestras posteriormente se analizan mediante espectrometría de masas con ATD-GC-MS.
 - Tipo de muestreo: Activo
 - Adsorbente: Tenax TA® y Air Toxic®
 - Caudal: 200 ml/min
 - Tiempo de muestreo: 60 min
 - Número de réplicas: 2
 - Análisis: Desorción térmica automática y cromatografía de gases/espectrometría de masas.



Figura 5. Bomba de succión empleada para el muestreo del aire y ejemplo de los tubos adsorbentes empleados.

- **Protocolo Aldehídos** adsorbidos en DNPH y analizados por HPLC: Formaldehído y otros aldehídos se muestrean mensualmente utilizando una bomba de 500 ml/min durante 180 minutos. El aire se bombea a través de un cartucho con DNPH, y las muestras se analizan mediante HPLC con detector UV-Vis a 360 nm.

- Tipo de muestreo: Activo
- Adsorbente: 2,4-dinitrofenilhidrazina (DNPH)
- Caudal: 500 ml/min
- Tiempo de muestreo: 180 min
- Número de muestras: 1
- Análisis: HPLC con columna C18 y tamaño de partícula de 3.5 μm .

Muestreos de material particulado

Las partículas en suspensión se analizarán periódicamente en cada ubicación de muestreo utilizando un Contador de Partículas en el Aire (TESTO 985), que permite cuantificar específicamente la concentración de partículas con los siguientes tamaños: 0.3, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, y 10.0 μm . Las partículas se muestrearán dos veces durante 5 minutos en cada ubicación de muestreo. Periódicamente, y para comparar los resultados obtenidos con el equipo anterior en algunas localizaciones, se empleará también el Espectrómetro de Aerosol de Rango Amplio Portátil MINI-WRAS 1371. Este dispositivo proporciona resultados más detallados al clasificar las partículas en 41 tamaños diferentes, desde 0.01 μm hasta 35000 μm . En la Figura 6 se muestran imágenes de ambos equipos.



Figura 6. Equipos contadores de partículas empleados en el Proyecto. FLUKE 985 para muestreos periódicos manuales (izquierda) y Mini-Wras 1371 (derecha) empleado para validaciones periódicas en campo.

Para complementar los análisis de material particulado, en el escenario de las casas en el piloto 5 se muestrearán asimismo PAH en el aire. Las muestras de partículas respirables (PM_{10}) se recogerán utilizando bombas aspiradoras GilAirPlus de Gilian, empleando filtros de cuarzo de 25 mm de diámetro. Los filtros limpios se acondicionarán durante 48 horas en una sala de pesaje bajo condiciones constantes (humedad del $45\pm 5\%$ y temperatura de $20\pm 2^\circ\text{C}$). Luego, se pesarán en una microbalanza Radwag con una resolución de 0.00001 g hasta alcanzar un peso constante. Posteriormente, se colocarán en placas de Petri (de vidrio o plástico), las cuales serán numeradas y registradas en el protocolo de estudio.

Los filtros preparados de esta manera se colocarán en las soportes de los aspiradores, ubicados en lugares predeterminados, cuya localización será registrada en el protocolo. El muestreo se realizará durante 3-6 días (el tiempo exacto se definirá en las mediciones piloto) a un flujo de 2.2 l/min. Al finalizar el muestreo, se registrará el flujo total de aire durante todo el período. En

la Figura 7 se muestra la imagen de los filtros después de uno de los muestreos para que se pueda apreciar la coloración resultante. Tras la exposición en campo, los filtros se colocarán nuevamente en las cajas de Petri, se refrigerarán y transportarán al laboratorio, donde pasarán por el mismo procedimiento de acondicionamiento y pesaje que los filtros limpios.

La masa de las partículas recogidas se calculará en función de la diferencia de peso del filtro antes y después de la exposición, y se determinará la concentración de PM teniendo en cuenta el flujo total de aire en el período analizado. Los valores obtenidos se registrarán en el protocolo de estudio, y los filtros se conservarán en refrigeración hasta el análisis. Las muestras de PM de los filtros preparados se extraerán con diclorometano (DCM) en un baño ultrasónico. El extracto será percolado, lavado y secado con helio. Posteriormente, el residuo seco se diluirá en propanol-2, y se añadirá agua destilada para obtener una proporción de volumen alcohol/agua de 15/85. Para la purificación selectiva, las muestras obtenidas serán solidificadas (SPE) mediante extracción en columnas con octadecilsilano - C-18 (Supelclear™ ENVI-18 Tubes, Supelco). Los PAH se eluirán con DCM y el extracto se concentrará en helio hasta 0.5 cm³. El extracto de polvo será analizado cromatográficamente.



Figura 7. Apariencia de los filtros empleados después del muestreo PM₄-PAH.

Se utilizará un cromatógrafo de gases Clarus 500 Perkin Elmer con detector de ionización de llama (FID) y autosampler. Los compuestos se separarán en una columna capilar (Restek RTX-5, 5% fenil metil siloxano, 30 m × 0.32 mm × 0.25 μm). La tasa de flujo del gas portador, helio, será de aproximadamente 1.5 ml/min. Las curvas de calibración para el análisis cuantitativo se prepararán para 16 PAH estándar (naftaleno, acenaftileno, acenafteno, fluoreno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo[a]antraceno, criseno, benzo[b]fluoranteno, benzo[k]fluoranteno, benzo[a]pireno, indeno[1,2,3-cd]pireno, dibenzo[ah]antraceno, y benzo[ghi]perileno).

Durante el análisis de PAH, la temperatura inicial del horno (60°C) se mantendrá durante aproximadamente 4 minutos; luego aumentará a 10°C/min hasta 280°C y se mantendrá durante 14 minutos. El tiempo total de análisis será de unos 40 minutos. Los flujos de hidrógeno y aire

en el detector serán de 45 ml/min y 450 ml/min, respectivamente, y la temperatura del FID se mantendrá en 280°C.

Muestreo PAH en orina

Se recolectarán muestras de orina de la mañana (30 – 50 ml) en recipientes de polipropileno de aproximadamente 100 ml. Las muestras se enfriarán a temperatura ambiente y luego se congelarán a –20 °C. Para el análisis se empleará un sistema UPLC acoplado a un espectrómetro de masas en tándem (MS/MS) (Waters Acquity I Class Plus, espectrómetro XEVO TQ XS MS/MS) para analizar los siguientes compuestos: 1-hidroxinaftaleno; 2-hidroxinaftaleno; 2-hidrofluoreno; 1-hidroxifenantreno; 2-, 3-, 4- y 9-hidroxifenantreno y 1-hidroxipireno;

Las muestras se almacenarán a –20 °C y, antes del análisis, se descongelarán, centrifugarán (3000 RPM, 15 min) y se acidificarán a pH 5 con HCl 1 mol/l. Se transferirán 2 ml de orina a un vial de vidrio de 7 ml, a los que se añadirán 10 µl de β-glucuronidasa y 1 ml de tampón de acetato (pH 5). Después de añadir un estándar interno (deuterado-OH-PAHs a 500 ng/ml), la mezcla se incubará toda la noche (37 °C, 16 h) para liberar OH-PAHs de las formas conjugadas.

Para la purificación y preconcentración se usará una placa de 96 pocillos OASIS HLB (60 mg/60 µm). Cada pocillo se acondicionará con 1 ml de metanol y 1 ml de agua, luego se transferirán 2 ml del hidrolizado de orina. La resina se lavará con 1 ml de agua desionizada y se secará al vacío durante 1-2 min. La muestra se eluirá con 2 ml de metanol, y el solvente se evaporará bajo un flujo suave de nitrógeno; el residuo se disolverá en 0.1 ml de acetonitrilo.

La separación y detección se realizará en un cromatógrafo de líquidos Waters Acquity I Class Plus acoplado a un espectrómetro XEVO TQ XS MS/MS con una columna Waters BEH 100x2,1 mm, 1.8 µm y empleando como fase móvil Acetonitrilo y Agua.

Radón

La exposición al radón se monitorizará empleando un detector de trazas de alfa específico para radón en cada punto de muestreo. El detector (ver Figura 8) contiene una pieza plástica especial en su interior que, al exponerse al aire en un tiempo determinado, recoge las marcas dejadas por las partículas alfa producidas en la desintegración del radón. Al finalizar el muestreo, el detector se envía al laboratorio para su análisis, calculándose la concentración promedio de radón en el aire.

Desarrollada según la norma ISO 11665-4, esta metodología utiliza el sistema pasivo *Electret Passive Environmental Radon Monitor* (E-PERMR) para medir la concentración de ²²²Rn en el aire en zonas homogéneas y promedios temporales, asegurando los indicadores de calidad necesarios para el proceso. Es muestreo pasivo, realizado mediante difusión, sin bombas ni otros dispositivos activos, según UNE-EN ISO 11665-1:2019.



Figura 8. Radon-specific passive detector.

Microbioma

Las muestras de comunidades microbianas (hongos y bacterias) en el aire se recolectarán en varias ubicaciones del Proyecto. Para el muestreo, se empleará un muestreador de aire Coriolis Micro (Figura 9), con un tiempo de muestreo de 10 minutos y un flujo de hasta 300L/min, manteniendo el equipo a una altura aproximada de un metro.



Figura 9. Coriolis Micro device and equipment performance.

Para la captura de los microorganismos, se emplearán 15 mL de solución salina tampón de fosfato estéril (PBS) como líquido recolector. Los conos de muestreo deben estar esterilizados y cargarse en condiciones estériles para evitar la contaminación cruzada.

Para recuperar los microorganismos, se usará una jeringa estéril de 20 mL conectada a un portafiltros Swinnex con filtro de membrana de fibra de vidrio, que atrapará el ADN microbiano. Los filtros se conservarán en una solución de preservación LifeGuard hasta su procesamiento en el laboratorio.

El ADN se extraerá usando un kit DNeasy PowerSoil Pro con modificaciones, incluyendo un paso de incubación a 65°C. La homogenización se realiza en un TissueLyser II para asegurar la lisis celular. Se purificará el ADN en columnas MB Spin, finalizando con una elución en solución C6.

Para describir las comunidades de bacterias y hongos, se realizará una secuenciación de amplicones con el sistema Illumina NovaSeq 6000, utilizando la región 16S rRNA para bacterias y la región ITS para hongos. Los análisis bioinformáticos se llevarán a cabo en QIIME 2, identificando variantes de secuencia de amplicón (ASV) a través de Dada2 y usando bases de datos de referencia (Silva para bacterias y UNITE para hongos).

7.3. Vigilancia Médica y Correlación con la Salud

Una parte fundamental de la metodología es la integración de la monitorización de IAQ con datos médicos y de salud. Se realizará una vigilancia médica detallada de los pacientes de alto riesgo involucrados en el estudio. Esto incluye el seguimiento continuo de los signos vitales y la recopilación de datos sobre los efectos agudos y crónicos de la exposición a la contaminación del aire interior.

Para los pacientes ambulatorios de alto riesgo, se implementará un seguimiento cercano de sus registros médicos electrónicos (EMR), pruebas periódicas de función pulmonar y encuestas digitales para evaluar el impacto de la IAQ en su calidad de vida. Esta información se combinará con los datos de IAQ recolectados en los diferentes escenarios para identificar posibles relaciones entre la exposición a contaminantes y los eventos de salud.

Además, se analizarán datos provenientes de sistemas de vigilancia de la salud pública y de conjuntos de datos de hospitales, complementados con información de ciencia ciudadana y datos sobre contaminación urbana. Estos análisis permitirán correlacionar los eventos de salud (tanto agudos como crónicos) con los datos de IAQ recopilados, identificando los principales determinantes de salud asociados con la mala calidad del aire en interiores.

7.4. Análisis de Datos Mediante Big Data e Inteligencia Artificial

El análisis de los datos de calidad del aire y de salud se llevará a cabo utilizando técnicas avanzadas de análisis de Big Data y algoritmos de inteligencia artificial (IA). Estos enfoques permitirán manejar grandes volúmenes de información provenientes de diversas fuentes, identificar patrones y hacer correlaciones precisas entre los contaminantes del aire interior y los efectos sobre la salud.

El algoritmo de IA desarrollado por *K-HEALTHinAIR* integrará datos de calidad del aire con datos médicos y otros factores relevantes, como la contaminación exterior y las características socioeconómicas de los usuarios de los espacios monitoreados. Este algoritmo también permitirá identificar patrones específicos de riesgo para la salud, generar modelos predictivos y proponer soluciones personalizadas para mejorar la IAQ en cada escenario.

Este análisis incluirá la revisión de datos y referencias internacionales, como los valores límite de exposición establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y las directivas de la Unión Europea. También se analizarán factores socioeconómicos y de salud mental, que podrían influir en la percepción de los riesgos y en las decisiones relacionadas con la IAQ.

7.5. Identificación de Fuentes de Contaminación

Otro aspecto clave de la metodología es la identificación y caracterización de las fuentes de contaminación del aire interior. A través de análisis de laboratorio y monitorización en campo, se evaluarán las principales fuentes de contaminantes en los escenarios seleccionados. Estas fuentes pueden incluir materiales de construcción, productos de limpieza, sistemas de ventilación, emisiones de combustión, así como la interacción entre la calidad del aire exterior e interior.

Se realizarán pruebas en células experimentales para simular diferentes escenarios de contaminación y estudiar las fuentes potenciales de los principales determinantes identificados. Esta identificación es crucial para desarrollar planes de intervención específicos y proponer soluciones efectivas para cada tipo de entorno.

7.6. Desarrollo de Soluciones y Planes de Intervención

A partir de los datos recopilados y el análisis de las fuentes de contaminación, se diseñarán soluciones y planes de intervención para mejorar la calidad del aire interior en los distintos escenarios. Estas soluciones incluirán tecnologías avanzadas, como sensores de monitorización personalizados para cada entorno y sistemas de tratamiento de aire, que permitirán una mejora efectiva de la IAQ.

Entre las innovaciones que se desarrollarán, destaca la creación de un nuevo sensor de aflatoxinas para detectar contaminantes biológicos específicos, así como un sistema híbrido de filtración y fotocátalisis que permitirá eliminar contaminantes químicos y biológicos del aire interior. Además, se crearán guías prácticas para que los gestores de edificios, propietarios y usuarios puedan implementar intervenciones personalizadas para mejorar la calidad del aire según las características de cada espacio.

7.7. Plataforma de Acceso Abierto para Compartir el Conocimiento

K-HEALTHinAIR garantizará que todo el conocimiento generado por el proyecto esté disponible para el público, los responsables políticos y otros actores relevantes. Para ello, se desarrollará una plataforma de acceso abierto que contendrá los datos de monitorización de IAQ, los resultados del análisis de los efectos en la salud y las soluciones propuestas para mitigar los riesgos de la mala calidad del aire. La plataforma se diseñará con principios de usabilidad, simplicidad y accesibilidad, de modo que cualquier interesado pueda consultar los datos, las recomendaciones y las guías desarrolladas por el proyecto. Esta plataforma también servirá

como referencia para futuros estudios y para el desarrollo de nuevas normativas basadas en evidencia científica.

7.8. Propuestas Normativas y Acciones de Sensibilización

Basado en los resultados obtenidos, *K-HEALTHinAIR* elaborará propuestas para la revisión y actualización de los estándares y regulaciones de calidad del aire interior a nivel europeo. Estas propuestas serán diseñadas en colaboración con los responsables políticos y estarán respaldadas por los datos científicos obtenidos durante el proyecto.

Además, se implementarán acciones de sensibilización y formación dirigidas a autoridades públicas, gestores de edificios, profesionales de la salud y el público en general. El objetivo de estas acciones será aumentar la conciencia sobre los riesgos asociados a la IAQ y promover la adopción de medidas efectivas para mejorar la calidad del aire en interiores.

7.9. Colaboración con otros proyectos. CLUSTER IDEAL

El **clúster IDEAL** está formado por siete proyectos europeos de investigación e innovación enfocados en la calidad del aire interior (IAQ) y la salud, financiados por el programa *Horizon Europe*. Más de 100 organizaciones en Europa y otros lugares participan en esta iniciativa. Para alcanzar sus objetivos, el clúster IDEAL se organiza en siete grupos de trabajo (WG), cada uno con un propósito específico: el WG1 se dedica a traducir la investigación en políticas; el WG2 se centra en la estandarización de datos; el WG3 se enfoca en la comunicación y la divulgación; el WG4, liderado por el Instituto Alemán de Normalización, apoya esfuerzos de estandarización; el WG5 promueve la concienciación sobre la IAQ y el avance en sensores; el WG6 investiga los efectos de la calidad del aire en la salud; el WG7 desarrolla modelos in vitro para profundizar en el conocimiento sobre IAQ; y el WG8 que coordina los trabajos relativos al análisis del microbioma en el aire interior y la interpretación de los resultados. En la Figura 10 se muestra una de los carteles de diseminación del clúster IDEAL en que se pueden encontrar los canales para contactar y entrar con colaboración con el mismo.

Los proyectos dentro del clúster IDEAL contribuyen a una variedad de estudios innovadores sobre IAQ. *EDIAQI*, en particular, se centra en mejorar la calidad del aire interior en ciudades europeas mediante el monitorización y la identificación de fuentes de



Figura 10. IDEAL CLUSTER.

contaminación, apoyando políticas basadas en evidencias para la mejora de la IAQ. Otros proyectos en el clúster incluyen *InChildHealth*, que integra múltiples disciplinas para evaluar los efectos de la IAQ en los niños, utilizando pruebas de citotoxicidad y herramientas de evaluación de riesgos en escuelas. *INQUIRE* monitorea la IAQ en más de 200 hogares europeos, empleando análisis químicos, biológicos y de toxicidad. El proyecto *LEARN* aborda la IAQ en escuelas, con un enfoque en los impactos en la salud y la cognición mediante el desarrollo de sensores y biosensores avanzados. *SynAir-G* examina las interacciones entre contaminantes en entornos escolares, implementando purificadores de aire ecológicos y evaluaciones de salud gamificadas. Finalmente, *TwinAIR* emplea modelos digitales, IA y sensores avanzados para mejorar la calidad del aire en espacios interiores, buscando reducir riesgos para la salud y fomentar un estilo de vida sostenible.

Colectivamente, estos proyectos avanzan el conocimiento y las tecnologías sobre IAQ, alineándose con la misión del clúster IDEAL para mejorar los resultados en salud y dar forma a las políticas europeas sobre IAQ.

8. RESULTADOS ESPERADOS

Dentro de los resultados esperados se destacan cuatro ítems que pretenden recoger el compendio de los resultados de la investigación de los desarrollos planteados.

Conjunto de datos de la monitorización

Como ya se ha mencionado, actualmente, se está llevando a cabo una campaña de monitorización en diez escenarios clave distribuidos en distintos países de Europa (Figura 1). Un primer resultado clave del proyecto son los propios datos registrados. Esta información se analizará para extraer los resultados principales y realizar su interpretación. Sin embargo, también se presenta esta información como un resultado que se ofrecerá libremente al finalizar el proyecto. Esta fase de monitorización continuará durante un año más, permitiendo la recopilación de un conjunto exhaustivo de datos sobre la calidad del aire interior (IAQ) proveniente de los monitores de calidad del aire, pero también de los muestreos realizados periódicamente de compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, material particulado y microbioma.

Correlación entre la IAQ y la Salud

Se desarrollará un algoritmo basado en Big Data e inteligencia artificial (IA) que correlacionará la calidad del aire interior con problemas de salud, tanto agudos como crónicos. El análisis de la información en cada escenario permitirá identificar los principales determinantes (léase como los principales compuestos que pueden afectar a la salud en cada uno de los escenarios) que afectan a la salud de los grupos expuestos en cada uno de ellos, especialmente de los más vulnerables. Entre éstos se incluyen los pacientes ambulatorios de alto riesgo o los niños. Los resultados ayudarán a formular intervenciones específicas para mejorar la IAQ.

Además de la identificación de los determinantes, se buscará identificar las fuentes principales de los mismos de cara. De esta manera se podrán diseñar y definir medidas y soluciones que permitan mejorar la salud de las personas como último paso.

Como resultado tangible de este análisis, el proyecto creará una guía para cada uno de los escenarios en los que se recogerán los determinantes identificados, sus fuentes principales y, lo más importante, medidas y soluciones recomendables a implementar para mejorar la IAQ del espacio.

Desarrollo de Soluciones Tecnológicas

El proyecto prevé también la evaluación de soluciones tecnológicas innovadoras para mejorar la IAQ, incluyendo sistemas de filtración avanzada y un sistema híbrido de filtración y fotocatalisis para purificar el aire en interiores. Estas herramientas permitirán implementar medidas de mejora de la calidad del aire de forma eficaz y complementar las medidas que se propongan de forma específica para cada escenario.

Plataforma de Acceso Abierto

Se está creando una plataforma de acceso abierto (ver Figura 11) donde los datos del monitorización, los resultados de los análisis a las muestras recogidas, las guías de intervención y otra información estará disponible para responsables políticos, autoridades, la comunidad científica, las empresas interesadas en el tema y los ciudadanos en general.

Esta plataforma ofrecerá acceso a la información recogida pero también al conocimiento generado de forma organizada por escenarios, pero también adaptada a los grupos de interés identificados.





Figura 11. Capturas del aspecto actual del módulo de la plataforma que permite la visualización de la información recogida (Versión de evaluación, ATOS-EVIDEN).

Protocolo médico de gestión de pacientes con multimorbilidad con enfermedades respiratorias crónicas (Gómez-López et al., 2024)

En el marco del escenario con los pacientes externos, se está trabajando en crear un protocolo que se basa en la hipótesis de que acciones interrelacionadas en cuatro dimensiones: i) cambios en la gestión, ii) personalización de las intervenciones basada en la detección temprana y tratamiento de episodios agudos y mejor manejo de comorbilidades, iii) soporte digital maduro, y iv) evaluación integral, pueden superar de manera efectiva las limitaciones de estrategias preventivas anteriores. El objetivo principal es implementar un nuevo servicio preventivo de atención integrada para mejorar la gestión de estos pacientes y evaluar su potencial de generación de valor.

El protocolo definirá los detalles del nuevo servicio a través de cuatro componentes principales: i) Pruebas mejoradas de función pulmonar mediante oscilometría, ii) Monitorización continuo de la calidad del aire interior como factor desencadenante potencial, iii) Soporte digital con un enfoque de gestión adaptativa de casos, y iv) Modelado predictivo para la identificación y gestión temprana de exacerbaciones. Durante 2025, el servicio será evaluado mediante el enfoque de *Quintuple Aim*, y se aplicará el Marco Consolidado para la Investigación de Implementación para evaluar su despliegue. Los componentes del servicio se desarrollarán a través de cuatro ciclos de seis meses de Planificar-Hacer-Estudiar-Actuar, involucrando un proceso de co-creación con la participación activa de pacientes, profesionales de la salud, gestores y expertos digitales.

9. CONCLUSIONES

Dado que el enfoque de esta comunicación está en la metodología del proyecto K-HEALTHinAIR, las conclusiones se centran en destacar el potencial impacto y la aplicabilidad futura de los métodos y herramientas desarrollados en el proyecto, sin presentar resultados específicos. Estas conclusiones pueden estructurarse de la siguiente manera:

- **Implementación Innovadora para la IAQ:** La metodología desarrollada en K-HEALTHinAIR ofrece un enfoque exhaustivo para la caracterización de la calidad del aire interior (IAQ) en escenarios representativos de Europa. Con la implementación de sensores de bajo coste, métodos de muestreo y análisis avanzados, el proyecto apunta a una medición más accesible y continua, lo que facilita su replicabilidad en otras regiones y países.
- **Correlación de IAQ y Salud en Grupos Vulnerables:** Este proyecto establece una base sólida para la correlación de datos de IAQ con indicadores de salud específicos en grupos vulnerables como pacientes ambulatorios de alto riesgo y niños. La integración de estas mediciones en una plataforma abierta permite prever los determinantes clave de la salud en entornos cerrados y las interacciones entre la IAQ y las condiciones de salud.
- **Desarrollo de Soluciones y Herramientas de Monitorización Personalizadas:** A través del uso de sensores integrados y accesibles, K-HEALTHinAIR facilitará a los ciudadanos y responsables de políticas la detección y actuación temprana de la contaminación del aire en interiores. El desarrollo de sensores orientados al usuario, guías y recomendaciones basadas en los resultados obtenidos para cada escenario, asegurará que estas soluciones sean efectivas y adaptables a contextos diversos.
- **Contribución a la Normativa y Sensibilización sobre IAQ:** Los resultados esperados del proyecto tienen el potencial de influir en futuras normativas y políticas sobre calidad de aire interior en Europa. Además, la creación de la plataforma abierta no solo garantiza la transparencia y accesibilidad de los datos, sino que también fomenta la sensibilización pública sobre la IAQ, promoviendo la implementación de mejoras prácticas en distintos entornos.

10. DISCLAIMER

Este Proyecto forma parte del Programa *Horizon Europe* y está apoyado por la Unión Europea (*Grant Agreement No 101057693*). Las opiniones y puntos de vista expresados solo comprometen a sus autores y no reflejan necesariamente las de la Unión Europea ni las del Programa *Horizon Europe*. Ni la Unión Europea ni el Programa *Horizon Europe* pueden ser considerados responsables por ellas.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Bhui, K., Newbury, J. B., Latham, R. M., Ucci, M., Nasir, Z. A., Turner, B., O'leary, C., Fisher, H. L., Marczylo, E., Douglas, P., Stansfeld, S., Jackson, S. K., Tyrrel, S., Rzhetsky, A., Kinnersley, R., Kumar, P., Duchaine, C., & Coulon Background, F. (2023). Air quality and mental health: evidence, challenges and future directions. *BJPsych Open*, 9(4), e120. <https://doi.org/10.1192/BJO.2023.507>
- Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. V., Holguin, F., Hong, Y., Luepker, R. V., Mittleman, M. A., Peters, A., Siscovick, D., Smith, S. C., Whitsel, L., & Kaufman, J. D. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 121(21), 2331–2378. <https://doi.org/10.1161/CIR.0B013E3181DBECE1>

- Cedeño Laurent, J. G., Macnaughton, P., Jones, E., Young, A. S., Bliss, M., Flanigan, S., Vallarino, J., Chen, L. J., Cao, X., & Allen, J. G. (2021). Associations between Acute Exposures to PM_{2.5} and Carbon Dioxide Indoors and Cognitive Function in Office Workers: A Multicountry Longitudinal Prospective Observational Study. *Environmental Research Letters : ERL [Web Site]*, 16(9). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AC1BD8>
- Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente | US EPA.* (n.d.). Retrieved October 28, 2024, from <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
- EXPOSOME - The European Human Exposome Network (EHEN).* (n.d.). Retrieved October 28, 2024, from <https://www.humanexposome.eu/12400-2/>
- Formaldehído y el riesgo de cáncer.* (n.d.). Retrieved October 28, 2024, from <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/sustancias/formaldehido/hoja-informativa-formaldehido#cuales-son-los-efectos-en-la-salud-a-corto-plazo-por-la-exposicion-al-formaldehido>
- Gómez-López, A., Arismendi, E., Cano, I., Farré, R., Fígols, M., Hernández, C., Montilla-Ibarra, A., Sánchez-Ruano, N., Sánchez, B., Sisó-Almirall, A., Sorribes, M., Vela, E., Piera-Jiménez, J., Benavent, J., Feroso, J., Roca, J., & González-Colom, R. (2024). Protocol for the Enhanced Management of Multimorbid Patients with Chronic Pulmonary Diseases: Role of Indoor Air Quality. *MedRxiv*, 2024.05.17.24307036. <https://doi.org/10.1101/2024.05.17.24307036>
- Gopalakrishnan, P., Kavinraj, M., Vivekanadhan, & Jeevitha, N. (2021). Effect of indoor air quality on human health-A review. *AIP Conference Proceedings*, 2408(1). <https://doi.org/10.1063/5.0072656/745432>
- López, L. R., Dessì, P., Cabrera-Codony, A., Rocha-Melagno, L., Kraakman, B., Naddeo, V., Balaguer, M. D., & Puig, S. (2023). CO₂ in indoor environments: From environmental and health risk to potential renewable carbon source. *Science of The Total Environment*, 856, 159088. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.159088>
- Ródenas García, M., Spinazzé, A., Branco, P. T. B. S., Borghi, F., Villena, G., Cattaneo, A., Di Gilio, A., Mihucz, V. G., Gómez Álvarez, E., Lopes, S. I., Bergmans, B., Orłowski, C., Karatzas, K., Marques, G., Saffell, J., & Sousa, S. I. V. (2022). Review of low-cost sensors for indoor air quality: Features and applications. *Applied Spectroscopy Reviews*, 57(9–10), 747–779. <https://doi.org/10.1080/05704928.2022.2085734>
- Rouf, Z., Dar, I. Y., Javaid, M., Dar, M. Y., & Jehangir, A. (2022). Volatile Organic Compounds Emission from Building Sector and Its Adverse Effects on Human Health. *Ecological and Health Effects of Building Materials*, 67–86. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76073-1_5
- Van Tran, V., Park, D., & Lee, Y. C. (2020). Indoor Air Pollution, Related Human Diseases, and Recent Trends in the Control and Improvement of Indoor Air Quality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 2927. <https://doi.org/10.3390/IJERPH17082927>