

## ARTÍCULO - Tesis Premiadas Convocatoria de Premios RADE 2025

---

### TECNOLOGÍAS NO INVASIVAS MULTIMODALES PARA EL RECONOCIMIENTO DE ACTIVIDADES EN ENTORNOS DE CUIDADO\*

#### Non-invasive multimodal technologies for activity recognition in care environments

Aurora Polo Rodríguez\*\*, Javier Medina Quero

Departamento de Ingeniería de Computadores, Automática y Robótica. Universidad de Granada

[auro@ugr.es](mailto:auro@ugr.es), [javiermq@ugr.es](mailto:javiermq@ugr.es)

#### RESUMEN

El envejecimiento de la población y el aumento de situaciones de fragilidad plantean importantes retos para los sistemas de cuidado y asistencia, especialmente en lo relativo a la promoción de la autonomía personal y la permanencia en entornos domésticos seguros. En este contexto, los entornos inteligentes ofrecen nuevas oportunidades para la monitorización y el apoyo a las personas, siempre que se aborden adecuadamente aspectos clave como la invasividad, la privacidad y la aceptación tecnológica. Este artículo presenta un enfoque basado en la integración de tecnologías no invasivas para el reconocimiento de actividades cotidianas en entornos inteligentes. La propuesta se apoya en una arquitectura multimodal que combina sensores ambientales y de localización en interiores, junto con modelos de reconocimiento de actividades basados tanto en conocimiento como en datos. Se presenta una destacada innovación en la gestión de escenarios de multiocupación y trazabilidad entre usuarios y eventos, elementos críticos en entornos reales de convivencia. La validez del enfoque se analiza a través de distintos casos de estudio desarrollados en entornos reales, que permiten evaluar su viabilidad y adaptabilidad. Los resultados evidencian el potencial de estas tecnologías como base para sistemas de cuidado más respetuosos, escalables y orientados a mejorar la calidad de vida.

**PALABRAS CLAVE:** Reconocimiento de actividades; entornos inteligentes; tecnologías no invasivas; personas frágiles; multiocupación; cuidado asistido.

#### ABSTRACT

Population ageing and the increasing prevalence of frailty pose major challenges for care and assistance systems, particularly with regard to promoting personal autonomy and enabling safe living in domestic environments. In this context, smart environments offer new opportunities for monitoring and supporting individuals, provided that key aspects such as invasiveness, privacy and technological acceptance are properly addressed. This article presents an approach based on the integration of non-invasive technologies for the recognition of daily activities in smart care environments. The proposed solution relies on a multimodal architecture that combines environmental and indoor localization sensors, together with activity recognition models based on both knowledge-driven and data-driven approaches. Special attention is devoted to the management of multi-occupant scenarios and to user-event traceability, which are critical elements in real-world living environments. The validity of the approach is analysed through several case studies conducted in real settings, allowing the assessment of its feasibility and adaptability. The results highlight the potential of these technologies as a foundation for more respectful, scalable and quality-of-life-oriented care systems.

**KEYWORDS:** Activity Recognition; Smart Environments; Non-Invasive Technologies; Frail Individuals; Multi-Occupancy; Assisted Care.

---

\* La presente contribución forma parte de un trabajo previo mucho más extenso, inserto en la Tesis Doctoral titulada Integración de tecnologías no invasivas para promover la autonomía y mejorar la calidad de vida de personas frágiles.

\*\* La autora fue galardonada con el Premio Fundación ONCE en la Convocatoria de Premios a la Investigación RADE 2025 a la mejor tesis doctoral por su tesis *Integración de tecnologías no invasivas para promover la autonomía y mejorar la calidad de vida de personas frágiles*

## 1. INTRODUCCIÓN

---

El progresivo envejecimiento de la población, junto con el aumento de situaciones de fragilidad asociadas a la edad, la discapacidad o determinadas condiciones de salud, plantea importantes desafíos para los actuales modelos de cuidado y asistencia (1,2). Entre ellos, destaca la necesidad de promover la autonomía personal y favorecer la permanencia de las personas en sus entornos habituales, garantizando al mismo tiempo su seguridad y bienestar. Este reto resulta especialmente relevante en contextos domésticos, donde la supervisión continua no siempre es posible y donde las soluciones tecnológicas deben integrarse de manera respetuosa con la vida cotidiana de los usuarios. En los últimos años, los entornos inteligentes han emergido como una alternativa prometedora para dar respuesta a estas necesidades.

Mediante la integración de sensores y sistemas de procesamiento de la información, estos entornos permiten monitorizar la actividad diaria de las personas y detectar situaciones de riesgo o cambios significativos en sus rutinas (3,4). Sin embargo, muchas de las soluciones propuestas hasta la fecha presentan limitaciones relevantes, como un alto grado de invasividad, el alto coste de despliegue/mantenimiento, una dependencia excesiva de tecnologías poco aceptadas por los usuarios o una escasa adaptabilidad a contextos reales de convivencia, especialmente en poblaciones vulnerables (5). Asimismo, aspectos como la privacidad, la protección de los datos personales y la facilidad de despliegue siguen siendo factores críticos que condicionan la adopción real de estas tecnologías (6). En este contexto, el reconocimiento de actividades humanas se ha consolidado como un elemento clave para el desarrollo de sistemas de cuidado inteligentes. La capacidad de identificar de forma automática las tareas cotidianas de una persona proporciona información de alto valor para su asistencia y su cuidado, al permitir inferir estados funcionales, detectar anomalías y adaptar los servicios a las necesidades individuales de cada persona (7,8). No obstante, el reconocimiento de actividades en entornos reales plantea retos adicionales, especialmente cuando se consideran escenarios de multiocupación, en los que conviven varias personas y es necesario diferenciar entre usuarios y asociar correctamente los eventos detectados a cada uno de ellos (9,10).

Este artículo aborda estos desafíos desde una perspectiva centrada en la integración de **tecnologías no invasivas** para el reconocimiento de actividades en entornos inteligentes de cuidado. En este trabajo, se consideran como tecnologías no invasivas aquellas basadas en **sensorización ambiental, sistemas de localización en interiores y dispositivos wearable de uso cotidiano**, como relojes inteligentes, capaces de proporcionar información individual sobre actividad física y variables fisiológicas básicas sin interferir de forma significativa en la vida diaria de las personas. Este enfoque permite reducir la intrusividad del

sistema y favorecer su aceptación en contextos de cuidado prolongado, en línea con las recomendaciones actuales para el diseño de soluciones centradas en la persona (6,11).

La propuesta se fundamenta en una arquitectura flexible que combina fuentes multimodales de dispositivos no invasivos junto con modelos de reconocimiento de actividades, basados tanto en conocimiento como en datos, permitiendo adaptarse a diferentes contextos y perfiles de usuario. A lo largo del artículo se describen los principios de diseño de la arquitectura propuesta y se analizan sus principales componentes, prestando especial atención a la gestión de escenarios de multiocupación y a la trazabilidad entre usuarios y eventos. Asimismo, se presentan distintos casos de estudio desarrollados en entornos reales, que permiten evaluar la viabilidad y adaptabilidad del enfoque propuesto. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto el potencial de nuestra propuesta como base para el desarrollo de sistemas de cuidado más respetuosos, escalables y orientados a mejorar la calidad de vida de las personas en situación de fragilidad.

## 2. RECONOCIMIENTO DE ACTIVIDADES EN ENTORNOS INTELIGENTES MEDIANTE TECNOLOGÍAS NO INVASIVAS

---

El reconocimiento de actividades humanas constituye uno de los pilares fundamentales de los entornos inteligentes orientados al cuidado y la asistencia, al permitir identificar patrones de comportamiento, rutinas diarias y posibles desviaciones relevantes para la detección temprana de situaciones de riesgo. En el ámbito domiciliario, esta información resulta especialmente valiosa cuando se obtiene mediante tecnologías capaces de operar de forma continua y discreta, favoreciendo la aceptación del sistema y su uso prolongado en el tiempo. En este contexto, las aproximaciones basadas en **tecnologías no invasivas** han adquirido un papel destacado frente a soluciones que requieren el uso permanente de dispositivos corporales especializados o mecanismos de captación intrusivos. Diversos estudios han puesto de manifiesto que los sistemas basados en sensorización ambiental y dispositivos de uso cotidiano presentan mayores niveles de aceptación por parte de los usuarios y menores tasas de abandono, factores críticos en aplicaciones de cuidado a largo plazo (5,12,13). Estas tecnologías permiten capturar información relevante sin exigir una interacción activa ni alterar de forma significativa las rutinas diarias.

Entre las tecnologías no invasivas más empleadas para el reconocimiento de actividades, sobre todo en sus orígenes, se encuentran los **sensores ambientales**, que permiten registrar eventos asociados a la interacción con el entorno, como la apertura de puertas, la activación de electrodomésticos o la ocupación de determinadas estancias. La combinación de múltiples sensores distribuidos en el entorno facilita la caracterización de actividades complejas a partir de secuencias de eventos simples, ofreciendo una alternativa eficaz para

describir el comportamiento cotidiano en el hogar (14,15). Además, su bajo coste y facilidad de despliegue los convierten en una opción especialmente adecuada para entornos de cuidado domiciliario.

De forma complementaria, los **sistemas de localización en interiores** aportan información espacial clave para el reconocimiento de actividades, al permitir estimar la posición y los desplazamientos de los usuarios dentro del entorno doméstico. Tecnologías como Bluetooth de baja energía o banda ultra ancha facilitan la asociación entre eventos detectados por los sensores ambientales y las personas que los generan, reduciendo ambigüedades en escenarios compartidos (16). Esta capacidad resulta especialmente relevante en contextos de multiocupación, donde la coexistencia de varios usuarios introduce una mayor complejidad en la interpretación de los datos.

Asimismo, los **dispositivos wearable no invasivos**, como relojes inteligentes o pulseras de actividad, se han consolidado como una fuente complementaria de información individual en sistemas de reconocimiento de actividades. Estos dispositivos permiten registrar variables relacionadas con la actividad física y el estado fisiológico, como el número de pasos, la frecuencia cardíaca o la conductancia de la piel, proporcionando señales individualizadas que enriquecen la interpretación contextual de las actividades (17). Su carácter discreto, su amplia disponibilidad comercial y su integración en la vida cotidiana favorecen su aceptación en escenarios de cuidado prolongado. La relevancia de estas señales biométricas radica en su capacidad para actuar como un flujo de datos continuo e individualizado que, a diferencia de los sensores ambientales, no depende de la interacción física con el mobiliario. Esto permite que el sistema mantenga la trazabilidad incluso cuando el usuario se encuentra en reposo o en zonas de baja densidad de sensores ambientales.

Desde el punto de vista metodológico, los enfoques de reconocimiento de actividades basados en tecnologías no invasivas suelen apoyarse en modelos basados en conocimiento, modelos orientados a datos o combinaciones de ambos. Los modelos basados en conocimiento permiten incorporar reglas expertas y restricciones contextuales, ofreciendo interpretabilidad y facilidad de adaptación a entornos específicos (18). Por su parte, los enfoques orientados a datos permiten capturar patrones complejos y variabilidad interindividual a partir de la información recogida por sensores ambientales, sistemas de localización y dispositivos wearable (19).

A pesar de los avances logrados, el reconocimiento de actividades mediante tecnologías no invasivas sigue enfrentándose a desafíos relevantes, como la variabilidad en los hábitos de los usuarios, la dependencia del contexto y la necesidad de mantener altos niveles de privacidad y aceptación. Estas limitaciones ponen de manifiesto la importancia de diseñar arquitecturas flexibles y escalables que permitan integrar distintas fuentes de información

no invasiva y adaptarse a escenarios reales de convivencia. En esta línea, el presente trabajo se sitúa dentro de los enfoques que apuestan por la integración de sensorización ambiental, localización en interiores y dispositivos wearable no invasivos como base para el desarrollo de sistemas de cuidado inteligentes y respetuosos con las personas. La integración de ambos paradigmas se ha consolidado como una estrategia eficaz para mejorar la robustez y la capacidad de generalización de los sistemas. Esta integración permite además el tratamiento de flujos de datos continuos en tiempo real, optimizando la capacidad de respuesta del sistema ante eventos críticos (20).

### 3. PRINCIPIOS DE DISEÑO Y ARQUITECTURA MULTIMODAL PROPUESTA

---

#### 3.1. Principios de diseño para sistemas de cuidado no invasivos

El diseño de sistemas de reconocimiento de actividades orientados al cuidado de personas frágiles en entornos domésticos requiere una aproximación que trascienda los criterios puramente técnicos. En este contexto, la adopción real y sostenida de estas tecnologías depende en gran medida de su capacidad para respetar la autonomía y la privacidad de los usuarios, aspectos críticos para su despliegue en contextos de cuidado prolongado (5,6,11). Uno de los principios fundamentales del enfoque propuesto es la **baja invasividad**, entendida como la minimización tanto del impacto físico como cognitivo de la tecnología sobre las personas. Este principio se materializa mediante el uso combinado de sensores ambientales, sistemas de localización en interiores y dispositivos wearable de uso cotidiano, como relojes inteligentes, que no requieren una interacción activa ni alteran significativamente las rutinas diarias. Estudios previos han mostrado que este tipo de soluciones favorecen una mayor aceptación y continuidad de uso en escenarios de cuidado prolongado (5,12).

La **privacidad** constituye otro eje central del diseño. La monitorización continua en el entorno doméstico plantea riesgos evidentes si no se limita la captación de información sensible. En este trabajo, la exclusión deliberada de tecnologías de captación audiovisual y el uso de señales abstractas procedentes de sensores ambientales, localización y dispositivos wearable biométricos contribuyen a reducir la exposición de datos identificables, alineándose con las recomendaciones actuales para sistemas de asistencia centrados en la persona (6,11). La **escalabilidad y adaptabilidad** del sistema representan asimismo requisitos clave. Los entornos domésticos presentan una elevada heterogeneidad en términos de distribución espacial, número de ocupantes y hábitos de vida. Por ello, el sistema se concibe desde un enfoque modular, que permite adaptar el número y tipo de sensores no invasivos a las características específicas de cada entorno sin necesidad de rediseños estructurales complejos (21). Finalmente, el diseño del sistema presta especial

atención a la **trazabilidad usuario-actividad**, especialmente relevante en escenarios de multiocupación. La capacidad de asociar de forma fiable los eventos detectados por el entorno con la persona que los genera resulta indispensable para proporcionar asistencia personalizada y evitar inferencias erróneas. Este principio guía tanto la selección de tecnologías como los mecanismos de fusión de información descritos en las secciones siguientes (22).

### 3.2. Arquitectura multimodal basada en tecnologías no invasivas

A partir de los principios descritos, se propone una arquitectura escalable y multimodal para el reconocimiento de actividades en entornos inteligentes de cuidado basada exclusivamente en tecnologías no invasivas. La arquitectura se estructura en diferentes capas funcionales en nodos edge y fog, que facilitan la separación entre adquisición de datos, procesamiento e inferencia, y favorece la reutilización y escalabilidad del sistema. En la Figura 1 se detalla el flujo de información de dicha arquitectura, desde la recolección de señales de localización y sensores ambientales hasta la generación de la cronología de actividades vinculadas a cada usuario.

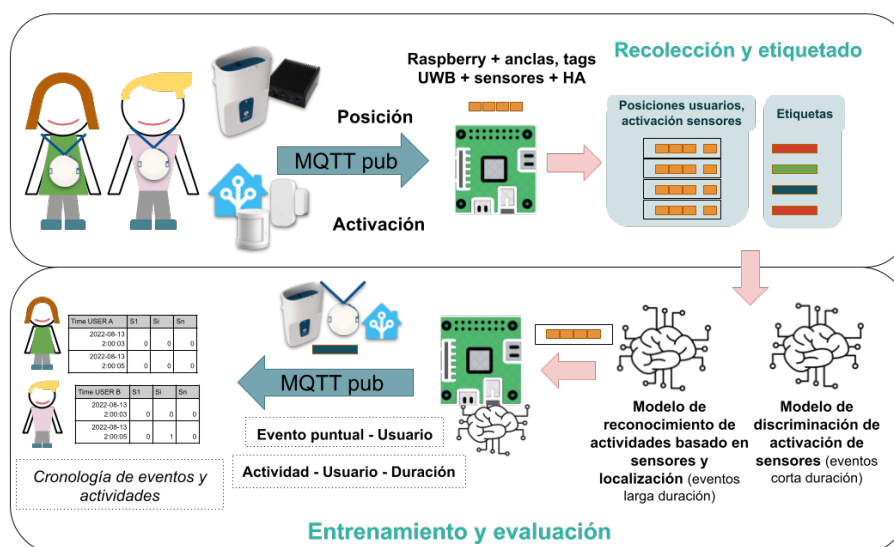


Figura 1. Esquema de la arquitectura multimodal. Se describe el proceso de flujo de datos: (1) Recolección y etiquetado mediante infraestructura de banda ultraancha y sensores ambientales; (2) Capa de procesamiento y publicación vía MQTT; y (3) Modelos de reconocimiento diferenciados por duración de eventos para garantizar la trazabilidad usuario-actividad.

Como se observa en la arquitectura, la inferencia se divide en dos procesos especializados según la temporalidad del evento:

- **Modelos de discriminación de activación:** Algoritmos diseñados para eventos de corta duración que resuelven activaciones puntuales de sensores binarios, asignándolos instantáneamente a un usuario mediante la posición reportada por el sistema de localización.

- **Modelos de reconocimiento de larga duración:** Redes neuronales o lógica difusa que analizan secuencias persistentes de datos multimodales para identificar actividades complejas (ej. cocinar o asearse), garantizando que la cronología de eventos sea coherente para cada ocupante del hogar.

La **capa de sensorización** integra tres tipos principales de fuentes de información: sensores ambientales, sistemas de localización en interiores y dispositivos wearable no invasivos. Los sensores ambientales permiten registrar eventos discretos asociados a la interacción con el entorno, como la apertura de puertas, el uso de electrodomésticos o la ocupación de determinadas estancias (14,15). Los sistemas de localización en interiores aportan información espacial sobre la posición y los desplazamientos de los usuarios dentro del entorno doméstico, lo que resulta esencial para contextualizar los eventos detectados y reducir ambigüedades en escenarios compartidos en multiocupación (16).

De forma complementaria, los **dispositivos wearable biométricos no invasivos** proporcionan información individual continua relacionada con la actividad física y el estado fisiológico básico de cada usuario, como el número de pasos, la frecuencia cardiaca o la conductancia de la piel (22–24). Estas señales permiten enriquecer la descripción contextual de las actividades y refuerzan la asociación entre eventos del entorno y usuarios concretos, especialmente en situaciones de multiocupación. El procesamiento de esta información heterogénea se realiza mediante nodos de computación en el borde (*edge computing*), que procesan las señales cerca de las fuentes para reducir la latencia y mejorar la privacidad (23, 24).

La **capa de procesamiento** se encarga de la sincronización, normalización y fusión de los datos procedentes de las distintas fuentes. En esta etapa, la información de localización y los datos individualizados de los dispositivos wearable desempeñan un papel clave para establecer correspondencias fiables entre eventos ambientales y usuarios, constituyendo la base para la trazabilidad usuario-actividad. Este proceso permite reducir la ambigüedad inherente a la sensorización ambiental aislada y mejorar la robustez del reconocimiento de actividades en entornos reales (9,16).

Sobre esta base, la **capa de reconocimiento de actividades** combina modelos basados en conocimiento y modelos orientados a datos. Los modelos basados en conocimiento permiten incorporar reglas expertas, restricciones espaciales y temporales, y conocimiento contextual del entorno, ofreciendo interpretabilidad y facilidad de adaptación a escenarios específicos (9). Por su parte, los enfoques orientados a datos permiten capturar patrones complejos y variabilidad interindividual a partir de la información multimodal recogida por el sistema, mejorando la capacidad de generalización frente a comportamientos no previstos

explícitamente (25,26). Estos modelos se ejecutan dentro de los entornos inteligentes en computadores reducidos bajo arquitecturas de computación en la niebla (fog computing).

La integración de estos enfoques se concibe como un mecanismo complementario, orientado a equilibrar precisión, flexibilidad e interpretabilidad, aspectos especialmente relevantes en aplicaciones de cuidado. Asimismo, la arquitectura contempla mecanismos de **adaptación orientada a la persona**, que permiten ajustar modelos y reglas a partir de la observación continuada del comportamiento de los usuarios, facilitando la detección de cambios en las rutinas o en el estado funcional de las personas.

En conjunto, la arquitectura multimodal propuesta proporciona un marco flexible y escalable para el reconocimiento de actividades en entornos inteligentes de cuidado, alineado con los principios de baja invasividad, privacidad y trazabilidad necesarios para su despliegue en escenarios domésticos reales.

#### 4. MULTIOCUPACIÓN Y TRAZABILIDAD USUARIO-ACTIVIDAD EN ENTORNOS DOMÉSTICOS

---

La presencia de múltiples ocupantes en un mismo entorno doméstico introduce uno de los principales retos para el reconocimiento de actividades en sistemas de cuidado inteligentes. En escenarios de multiocupación, los eventos detectados por sensores ambientales no pueden asociarse de forma directa a un único usuario, lo que genera ambigüedades que dificultan la correcta interpretación del comportamiento y limitan la utilidad de los sistemas de asistencia (9,21). Este problema resulta especialmente crítico en contextos de cuidado, donde una asignación incorrecta de actividades puede dar lugar a inferencias erróneas sobre el estado funcional o las necesidades de las personas monitorizadas.

Diversos trabajos han puesto de manifiesto que los enfoques basados exclusivamente en sensorización ambiental presentan limitaciones significativas en entornos compartidos, debido a la falta de información individualizada sobre los usuarios (14,15). Para abordar este desafío, se han propuesto estrategias que combinan múltiples fuentes de información no invasiva con el objetivo de mejorar la trazabilidad entre usuarios y eventos, reduciendo la ambigüedad inherente a los entornos de convivencia (16,20).

En este contexto, la **integración de dispositivos wearable no invasivos** emerge como un elemento clave para reforzar la identificación individual en escenarios de multiocupación. Los dispositivos wearable biométricos proporcionan señales continuas asociadas a cada usuario, como niveles de actividad física o respuestas fisiológicas básicas, que pueden utilizarse para complementar la información contextual procedente del entorno (22–24). Estas señales permiten diferenciar entre usuarios incluso cuando interactúan de forma simultánea con el

mismo espacio o con objetos compartidos. El uso de lógica difusa para el razonamiento espacio-temporal permite modelar la incertidumbre inherente a los desplazamientos de los usuarios en el hogar (27).

El enfoque propuesto en este trabajo se apoya en la **fusión de información procedente de sensores ambientales, sistemas de localización en interiores y dispositivos wearable**, con el objetivo de establecer una trazabilidad fiable entre usuarios y eventos. La información de localización permite acotar espacialmente los eventos detectados por el entorno, mientras que los datos procedentes de los dispositivos wearable aportan señales individualizadas que refuerzan la asociación con un usuario concreto. La integración de la banda ultraancha (UWB) estima de forma precisa la posición, permitiendo que el sistema de procesamiento cree un 'vínculo lógico' entre las coordenadas espaciales del usuario y el radio de acción de los sensores ambientales. Esta sinergia es la que permite resolver el conflicto cuando dos usuarios se encuentran en la misma estancia e interactúan con objetos distintos o similares de forma simultánea. La localización precisa es crucial para resolver actividades concurrentes en situaciones en las que varios usuarios se encuentran próximos entre sí.

Desde el punto de vista metodológico, la trazabilidad usuario-actividad se aborda mediante modelos que combinan conocimiento contextual y patrones extraídos de los datos. Las reglas basadas en conocimiento permiten incorporar restricciones espaciales y temporales, así como información sobre la configuración del entorno y los hábitos de los usuarios. Por su parte, los enfoques orientados a datos permiten capturar correlaciones entre eventos ambientales, desplazamientos y señales biométricas, mejorando la robustez del sistema frente a la variabilidad interindividual y contextual (17,20,26).

La evaluación de estas estrategias en entornos reales pone de manifiesto que la integración de tecnologías no invasivas de localización mejora de forma significativa la capacidad del sistema para diferenciar entre usuarios y adaptar el reconocimiento de actividades a perfiles individuales. En particular, la incorporación de los dispositivos wearable biométricos no invasivos permite reducir la tasa de ambigüedad en escenarios de multiocupación sin incrementar la intrusividad del sistema, reforzando su viabilidad para aplicaciones de cuidado prolongado en entornos domésticos compartidos.

En conjunto, la gestión de la multiocupación y la trazabilidad usuario-actividad constituye un elemento central para el despliegue efectivo de sistemas de reconocimiento de actividades en contextos reales de cuidado. El enfoque presentado sienta las bases para ofrecer asistencia personalizada y contextualizada en entornos compartidos, manteniendo al mismo tiempo los principios de baja invasividad, privacidad y aceptación tecnológica que guían este trabajo.

## 5. CASOS DE ESTUDIO Y VALIDACIÓN EN ENTORNOS REALES

---

La evaluación de sistemas de reconocimiento de actividades orientados al cuidado de personas frágiles requiere su validación en entornos reales de uso, donde concurren condiciones de variabilidad, incertidumbre y coexistencia de múltiples usuarios. Frente a evaluaciones basadas en escenarios controlados o simulados, la experimentación en contextos reales resulta esencial para analizar la viabilidad, adaptabilidad y robustez de las soluciones propuestas (5,12).

En este trabajo, la validación del enfoque propuesto se ha llevado a cabo mediante distintos **casos de estudio desarrollados en entornos domésticos reales**, diseñados para representar situaciones habituales de convivencia y cuidado. Los escenarios considerados incluyen viviendas con uno o varios ocupantes, con distintos perfiles de fragilidad y patrones de actividad, lo que permite evaluar el comportamiento del sistema en condiciones representativas del uso cotidiano. Concretamente, se desplegó un sistema de localización UWB/BLE en dos viviendas (60 m<sup>2</sup> con 4 anclas UWB y 4 balizas BLE; 100 m<sup>2</sup> con 6 anclas UWB), registrando 18 trayectos (≈86 min en total) y 26.055 muestras de sensores de localización (16.879 en el piso A y 9.176 en el piso B).

Los casos de estudio se desarrollan en entornos instrumentados de acuerdo con la arquitectura descrita en la Sección 3, con el objetivo de evaluar el comportamiento del sistema en condiciones reales de uso. La instrumentación se ha realizado priorizando baja invasividad y facilidad de despliegue. Es fundamental destacar que la adaptabilidad del sistema permite gestionar la denominada 'deriva del comportamiento'. En procesos degenerativos, el sistema no solo reconoce la actividad, sino que es capaz de caracterizar variaciones longitudinales sutiles en la forma de realizar las rutinas, transformando datos heterogéneos en información accionable para el seguimiento clínico de la fragilidad. Este planteamiento ha permitido minimizar la interferencia con las rutinas diarias de los usuarios y favorecer la continuidad del uso del sistema durante periodos prolongados de tiempo.

En la validación se evaluó el rendimiento del sistema en escenarios de multiocupación, prestando especial atención a la trazabilidad usuario-actividad. En un caso de estudio con dos usuarios, la discriminación de activaciones de sensores de apertura/cierre alcanzó F1 medio ≈0,90 en el conjunto de evaluación (0,93 y 0,88 por usuario), y se comparó con baselines que obtuvieron precisión 0,86 (distancia mínima) sobre un conjunto de 238 eventos. Los resultados obtenidos permiten evidenciar que la combinación de información procedente del entorno y de los dispositivos wearable biométricos facilita una asociación más consistente entre eventos detectados y usuarios concretos, especialmente en situaciones de coexistencia y actividades concurrentes, donde los enfoques basados exclusivamente en sensorización ambiental presentan mayores niveles de ambigüedad.

Asimismo, los casos de estudio permiten evaluar la **adaptabilidad del sistema** frente a la variabilidad interindividual y a los cambios en las rutinas de los usuarios. La integración de modelos basados en conocimiento y modelos orientados a datos facilita la personalización progresiva del reconocimiento de actividades, permitiendo ajustar el sistema a las características específicas de cada entorno y persona sin necesidad de reconfiguraciones complejas. Asimismo, el sistema permite la suscripción a eventos agregados, facilitando una visión holística del estado del paciente de forma distribuida (28).

Desde una perspectiva cualitativa, la validación en entornos reales pone de manifiesto la importancia de la **aceptación tecnológica** como factor determinante para el éxito de los sistemas de cuidado inteligentes. La utilización de tecnologías no invasivas y de dispositivos wearable integrados en la vida cotidiana contribuye a una percepción más positiva del sistema por parte de los usuarios, favoreciendo su uso continuado y su potencial aplicación en contextos de cuidado a largo plazo (6,11,22).

En conjunto, los casos de estudio realizados confirman la **viabilidad de la plataforma propuesta** para el reconocimiento de actividades en entornos inteligentes de cuidado, así como su capacidad para operar de forma fiable en escenarios reales de convivencia. Estos resultados respaldan el uso de arquitecturas multimodales basadas en tecnologías no invasivas como una alternativa sólida y respetuosa para el desarrollo de sistemas de asistencia orientados a mejorar la calidad de vida de las personas en situación de fragilidad.

## 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

---

El trabajo presentado aborda uno de los retos centrales en el diseño de sistemas de cuidado inteligentes: el reconocimiento de actividades cotidianas en entornos domésticos reales bajo el paradigma de la **privacidad por diseño**. Frente a aproximaciones basadas en visión artificial u otras formas de monitorización potencialmente intrusiva (29), los resultados respaldan que la **fusión sensorial no invasiva** puede ofrecer un equilibrio favorable entre utilidad, aceptación y protección de la intimidad. Su integración en iniciativas de gran escala, como el proyecto nacional **AMALTEA**, refuerza la orientación hacia criterios de interoperabilidad y despliegue. Además, desde una perspectiva clínica, al evitar la captación audiovisual, el enfoque puede reducir el denominado 'efecto Hawthorne' (alteración del comportamiento al sentirse observado) y favorecer la obtención de datos naturales del desempeño cotidiano.

Desde una perspectiva tecnológica, los resultados obtenidos apoyan la robustez de la arquitectura multimodal propuesta. En particular, la combinación de sensorización binaria con localización UWB contribuye a mitigar el denominado "obstáculo de la multiocupación",

habitual cuando conviven dos o más personas en una misma estancia. En este contexto, la UWB actúa como un mecanismo de **desambiguación crítica**, al proporcionar evidencia adicional para asociar eventos y actividades a cada usuario. Esta sinergia facilita una trazabilidad usuario-evento de mayor fidelidad y reduce la ambigüedad en hogares compartidos, una limitación frecuente en soluciones de bajo coste.

Metodológicamente, los resultados sugieren que los enfoques híbridos -que combinan modelos basados en el conocimiento con modelos orientados a datos- pueden ser especialmente adecuados en asistencia inteligente, sin depender exclusivamente de modelos de "caja negra". La incorporación de semántica y conocimiento experto sobre la fragilidad y las rutinas geriátricas favorece que el sistema sea **interpretable** para el personal clínico, cuidadores y familiares, lo que facilita su evaluación y ajuste. En línea con el marco desarrollado en la tesis doctoral que sustenta este artículo, las técnicas de inteligencia computacional permiten transformar datos heterogéneos en información accionable. Esta adaptabilidad resulta relevante para abordar la "deriva del comportamiento" en procesos degenerativos, donde los cambios se manifiestan de forma gradual y longitudinal.

Desde el punto de vista ético y social, la exclusión de mecanismos de captación audiovisual y el uso de dispositivos no estigmatizantes responden a barreras de adopción descritas en poblaciones vulnerables. La integración de la tecnología de forma discreta en el entorno, o mediante dispositivos de uso cotidiano (p. ej., smartwatches), puede disminuir la sensación de vigilancia y el rechazo asociado, favoreciendo un uso sostenido. No obstante, la dependencia de la configuración física de cada hogar (la denominada "huella digital" del entorno) plantea desafíos de generalización y escalabilidad. Por ello, se identifican como líneas futuras el **aprendizaje por transferencia (Transfer Learning)** y estrategias de autoconfiguración de redes de sensores orientadas a reducir tiempos y costes de despliegue usando datos de varios centros domiciliarios afines.

En conclusión, la propuesta presentada ofrece un marco práctico para el reconocimiento de actividades en escenarios reales de convivencia y apunta hacia un **cambio de paradigma en el modelo de cuidados**: pasar de una teleasistencia reactiva (centrada en responder tras la emergencia) a una monitorización más proactiva y preventiva, capaz de detectar señales tempranas de declive funcional. En el contexto del envejecimiento poblacional, arquitecturas como la descrita pueden contribuir a mejorar la seguridad y el apoyo en el domicilio, preservando al mismo tiempo la privacidad y la autonomía personal.

## 7. AGRADECIMIENTOS

---

La autora premiada desea expresar su agradecimiento a **Javier Medina Quero** por su labor de dirección, acompañamiento y orientación a lo largo del desarrollo de la tesis doctoral en la que se basa este artículo. Asimismo, expresa su agradecimiento a la **Real Academia de Doctores de España** por la concesión del **Premio Fundación ONCE 2025 a la Investigación**, otorgado en el marco de los **Premios RADE a la Investigación**.

Igualmente, la autora agradece el apoyo de los proyectos de investigación **PHARAON – Pilots for Healthy and Active Ageing** (Grant Agreement nº 857188), financiado por el programa **Horizonte 2020 de la Unión Europea**, y **AMALTEA – Entornos autónomos con sensorización de planes de cuidados en personas con discapacidad cognitiva** (DTS21/00047), financiado por el **Instituto de Salud Carlos III**, cuyo respaldo ha sido fundamental para el desarrollo de la investigación presentada.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

1. J. I. Conde-Ruiz and C. I. González, “El proceso de envejecimiento en España”, Estudios sobre la economía Española, 2021.
2. J. P. Díaz and A. A. García, “Retos sanitarios de los cambios demográficos”, Medicina Clínica, vol. 146, no. 12, pp. 536–538, 2016.
3. J. Medina-Quero, S. Zhang, C. Nugent, and M. Espinilla, “Ensemble classifier of long short-term memory with fuzzy temporal windows on binary sensors for activity recognition”, Expert Systems with Applications, vol. 114, pp. 441–453, 2018.
4. P. Rashidi and A. Mihailidis, “A survey on ambient-assisted living tools for older adults”, IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, vol. 17, no. 3, pp. 579–590, 2012.
5. A. Lentzas and D. Vrakas, “Non-intrusive human activity recognition and abnormal behavior detection on elderly people: A review”, Artificial Intelligence Review, vol. 53, no. 3, pp. 1975–2021, 2020.
6. Y. Yang, L. Wu, G. Yin, L. Li, and H. Zhao, “A survey on security and privacy issues in internet-of-things”, IEEE Internet of Things Journal, vol. 4, no. 5, pp. 1250–1258, 2017.
7. H. F. Nweke, Y. W. Teh, M. A. Al-Garadi, and U. R. Alo, “Deep learning algorithms for human activity recognition using mobile and wearable sensor networks: State of the art and research challenges”, Expert Systems with Applications, vol. 105, pp. 233–261, 2018.
8. L. Chen and C. D. Nugent, “Sensor-based activity recognition review”, in Human Activity Recognition and Behaviour Analysis, pp. 23–47, Springer, 2019.
9. L. Chen, C. D. Nugent, and H. Wang, “A knowledge-driven approach to activity recognition in smart homes”, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 24, no. 6, pp. 961–974, 2011.
10. H. Mshali, T. Lemlouma, M. Moloney, and D. Magoni, “A survey on health monitoring systems for health smart homes”, International Journal of Industrial Ergonomics, vol. 66, pp. 26–56, 2018.
11. J. Calvillo-Arbizu *et al.*, “A sensor-based mhealth platform for remote monitoring and intervention of frailty patients at home”, Int. Journal of Env. Research and Public Health, vol. 18, no. 21, p. 11730, 2021.

12. M. Trombini *et al.*, “A solution for the remote care of frail elderly individuals via exergames”, *Sensors*, vol. 21, no. 8, p. 2719, 2021.
13. R. A. Hamad *et al.*, “Efficient activity recognition in smart homes using delayed fuzzy temporal windows on binary sensors”, *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 24, no. 2, pp. 387–395, 2019.
14. G. Singla, D. J. Cook, and M. Schmitter-Edgecombe, “Tracking activities in complex settings using smart environment technologies”, *Int. Journal of Biosciences, Psychiatry, and Technology*, vol. 1, no. 1, p. 25, 2009.
15. T. Van Kasteren, G. Englebienne, and B. J. Kröse, “An activity monitoring system for elderly care using generative and discriminative models”, *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 14, no. 6, pp. 489–498, 2010.
16. F. Zafari, A. Gkelias, and K. K. Leung, “A survey of indoor localization systems and technologies”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2568–2599, 2019.
17. F. J. Ordóñez and D. Roggen, “Deep convolutional and LSTM recurrent neural networks for multimodal wearable activity recognition”, *Sensors*, vol. 16, no. 1, p. 115, 2016.
18. A. Polo-Rodríguez, F. Cavallo, C. Nugent, and J. Medina-Quero, “Human activity mining in multi-occupancy contexts based on nearby interaction under a fuzzy approach”, *Internet of Things*, vol. 25, p. 101018, 2024.
19. Bouchabou, D., Nguyen, S. M., Lohr, C., LeDuc, B., & Kanellos, I. (2021). A Survey of Human Activity Recognition in Smart Homes Based on IoT Sensors Algorithms: Taxonomies, Challenges, and Opportunities with Deep Learning. *Sensors*, 21(18), 6037.
20. N. C. Krishnan and D. J. Cook, “Activity recognition on streaming sensor data”, *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 10, pp. 138–154, 2014.
21. C. Debes *et al.*, “Monitoring activities of daily living in smart homes: Understanding human behavior”, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 33, no. 2, pp. 81–94, 2016.
22. J. Heikenfeld *et al.*, “Wearable sensors: Modalities, challenges, and prospects”, *Lab on a Chip*, vol. 18, no. 2, pp. 217–248, 2018.
23. M. A. Lopez Medina *et al.*, “Fuzzy cloud-fog computing approach application for human activity recognition in smart homes”, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 38, no. 1, pp. 709–721, 2020.
24. F. Bonomi *et al.*, “Fog computing and its role in the internet of things”, in *Proc. of the First Edition of the MCC Workshop*, pp. 13–16, 2012.
25. L. Chen *et al.*, “Sensor-based activity recognition”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C*, vol. 42, no. 6, pp. 790–808, 2012.
26. A. S. A. Sukor *et al.*, “A hybrid approach of knowledge-driven and data-driven reasoning for activity recognition in smart homes”, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 36, no. 5, pp. 4177–4188, 2019.
27. J.-M. Le Yaouane and J.-P. Poli, “A fuzzy spatio-temporal-based approach for activity recognition”, in *Int. Conference on Conceptual Modeling*, pp. 314–323, Springer, 2012.
28. J. Medina-Quero, L. Martinez, and M. Espinilla, “Subscribing to fuzzy temporal aggregation of heterogeneous sensor streams in real-time distributed environments”, *Int. Journal of Communication Systems*, vol. 30, no. 5, p. e3238, 2017.
29. S. Zhang *et al.*, “A review on human activity recognition using vision-based method”, *Journal of Healthcare Engineering*, vol. 2017, 2017.