

HERMETICIDAD AL AIRE DE VIVIENDAS PRECARIAS EN BARRIOS INFORMALES DE LIMA, PERÚ

AIR TIGHTNESS OF PRECARIOUS HOUSING IN INFORMAL SETTLEMENTS IN LIMA, PERU

HERMETICIDADE AO AR DE HABITAÇÕES PRECÁRIAS EM ASSENTAMENTOS INFORMAIS DE LIMA, PERU

Martín Wieser

Doctor en Arquitectura
 Docente investigador, Departamento de Arquitectura
 Pontificia Universidad Católica del Perú
 Lima, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-4556-3507>
mwieser@pucp.edu.pe

Ronald Mas

Doctor en Ingeniería
 Docente investigador, Departamento de Ingeniería
 Pontificia Universidad Católica del Perú
 Lima, Perú
<https://orcid.org/0000-0003-1507-462X>
rmass@pucp.edu.pe

Enrique Barrantes

Magíster en Ingeniería
 Docente investigador, Departamento de Ingeniería
 Pontificia Universidad Católica del Perú
 Lima, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-9037-3358>
ebarran@pucp.edu.pe

Enrique Mejía-Solis

Magíster en Ingeniería
 Docente investigador, Departamento de Ingeniería
 Pontificia Universidad Católica del Perú
 Lima, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-5512-1286>
enrique.mejia@pucp.edu.pe

Alessandra Gonzales

Bachiller en Arquitectura
 Asistente de investigación, Facultad de Arquitectura y Urbanismo
 Pontificia Universidad Católica del Perú
 Lima, Perú
<https://orcid.org/0009-0004-5184-1907>
a20201689@pucp.edu.pe

Jimena Valdivia

Bachiller en Arquitectura
 Asistente de investigación, Facultad de Arquitectura y Urbanismo
 Pontificia Universidad Católica del Perú
 Lima, Perú
<https://orcid.org/0009-0007-5170-5245>
a20200320@pucp.edu.pe

Luis-Ricardo Chirinos-García

Doctor en Ciencias Ambientales
 Docente investigador, Departamento de Ingeniería
 Pontificia Universidad Católica del Perú
 Lima, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-5620-3312>
Ichirin@pucp.edu.pe

RESUMEN

El nivel de hermeticidad al aire de una vivienda influye directamente en las condiciones térmicas, acústicas y de salubridad que se presentan en su interior. Ante la ausencia de estudios que abordan el tema en el ámbito local, la presente investigación tuvo como objetivo identificar el valor y los factores que condicionan el nivel de hermeticidad de viviendas precarias construidas en barrios informales de la ciudad de Lima. Mediante el método de 'puerta sopladora', se realizaron mediciones en cinco viviendas que evidenciaron tasas de renovación de aire de entre 280 y 40 ACH (renovaciones de aire por hora) a una presión diferencial de 50 pascales, valores considerablemente altos que reflejan la baja hermeticidad de estas viviendas. Estos hallazgos constituyen una primera aproximación empírica a la hermeticidad al aire en viviendas precarias, al aportar datos preliminares útiles para el análisis del confort térmico en contextos de alta vulnerabilidad urbana.

Palabras clave

construcción en pendiente, desarrollo sustentable, termodinámica

ABSTRACT

The level of air tightness in a dwelling directly affects its thermal, acoustic, and health-related conditions. Due to the lack of studies providing such data at a local level, this research aimed to determine both the values and the contributing factors that condition the level of air tightness in precarious housing built in informal settlements in Lima. Using the blower door method, measurements were conducted in five dwellings, revealing air change rates between 40 and 280 ACH (Air Changes per Hour) at a differential pressure of 50 pascals, which are remarkably high and indicate poor airtightness. These findings constitute the first empirical approach to airtightness in precarious housing, providing preliminary data useful for analyzing thermal comfort in contexts of high urban vulnerability.

Keywords

sloping construction, sustainable development, thermodynamics

RESUMO

O nível de hermeticidade ao ar de uma habitação influencia diretamente as condições térmicas, acústicas e de salubridade que se apresentam em seu interior. Diante da ausência de estudos que abordem o tema no âmbito local, a presente pesquisa teve como objetivo identificar o valor e os fatores que condicionam o nível de hermeticidade de habitações precárias construídas em assentamentos informais da cidade de Lima. Por meio do método da "porta ventiladora" (blower door), realizaram-se medições em cinco habitações, que evidenciaram taxas de renovação de ar entre 280 e 40 ACH (renovações de ar por hora) a uma pressão diferencial de 50 pascals — valores consideravelmente elevados, que refletem a baixa hermeticidade dessas edificações. Estes resultados constituem uma primeira abordagem empírica sobre a hermeticidade ao ar em habitações precárias, ao fornecerem dados preliminares úteis para a análise do conforto térmico em contextos de alta vulnerabilidade urbana.

Palavras-chave

construção em encosta, desenvolvimento sustentável, termodinâmica

INTRODUCCIÓN

La hermeticidad al aire constituye una propiedad clave en el desempeño energético y ambiental de los edificios, al estar directamente relacionada con las infiltraciones no controladas de aire entre el ambiente exterior e interior. Esta característica incide de forma significativa en el consumo energético, el confort térmico y la calidad del aire interior. Una elevada hermeticidad permite minimizar los flujos de aire no deseados, reduciendo las pérdidas energéticas asociadas a calefacción o refrigeración (Ambrosio Alfano et al., 2012). Asimismo, las corrientes de aire y las diferencias de temperatura generadas por estas infiltraciones pueden provocar discomfort térmico local en los ocupantes (Kalamees, 2007). Por otro lado, el ingreso de aire exterior producto de estas infiltraciones puede afectar negativamente la calidad del aire interior, al no estar sujeto a los procesos de filtrado y control propios de los sistemas de ventilación mecánica (Buonanno, Morawska & Stabile, 2009).

ESTUDIOS SOBRE HERMETICIDAD AL AIRE DE EDIFICACIONES

Los primeros estudios sobre hermeticidad al aire en edificaciones destacaron la relevancia de controlar las infiltraciones como parte del diseño eficiente de los edificios. Hutcheon (1953) fue uno de los pioneros en resaltar la necesidad de limitar el flujo de aire no deseado a través de la envolvente. A partir de la crisis energética de los años setenta, la hermeticidad adquirió un papel más relevante, en particular por su potencial para reducir las pérdidas de calor en invierno y, por ende, el consumo energético asociado a la calefacción (Etheridge, 2015).

En 1998, en Alemania se establecieron los primeros valores límite de hermeticidad al aire, a través de la norma DIN V 4108-7, que fijaba un máximo de 3.5 cambios de aire por hora (ACH) para edificios con ventilación natural y 1.5 ACH para aquellos con ventilación mecánica (Guyot, Schild & Carrié, 2010). Paralelamente, en Estados Unidos, la normativa ASHRAE incluía procedimientos para evaluar la hermeticidad mediante la prueba de presurización con 'puerta sopladora' (blower door test). Esta normativa también clasificaba los niveles de hermeticidad en viviendas: 2 ACH se consideraba un valor excelente, 5 ACH representaba un nivel medio, 10 ACH un valor común, y por encima de los 20 ACH se catalogaba como una vivienda con baja hermeticidad; todo ello evaluado bajo una presión diferencial estándar de 50 Pa (Persily, 1998).

En las últimas décadas, en los países industrializados, el control de la hermeticidad ha cobrado una creciente relevancia, impulsado principalmente por la necesidad de reducir el consumo energético, tanto por motivos económicos como ambientales (Zheng et al., 2019). En el caso particular de edificios residenciales, los valores típicos de hermeticidad, medidos bajo una presión

diferencial de 50 Pa, oscilan actualmente entre 1 y 3 ACH, dependiendo del tipo de ventilación, natural o mecánica (Poza-Casado et al., 2020). En este contexto, algunas certificaciones de alto rendimiento energético, como Passivhaus en Alemania y Minergie en Suiza, establecen criterios aún más estrictos, que exigen valores de hermeticidad inferiores a 0.6 ACH.

Por el contrario, en el sur global, el enfoque hacia la hermeticidad ha estado más relacionado con la necesidad de construir refugios habitables y reducir los riesgos para la salud (Kulshreshtha, Khare & Seetharaman, 2008; Lambert et al., 2023). Una ventilación inadecuada puede conducir a elevadas concentraciones de partículas, gases contaminantes como CO, SO₂ y NO₂, así como compuestos tóxicos emitidos por estufas y sistemas de cocción, lo que incrementa la incidencia de enfermedades respiratorias (Kulshreshtha et al., 2008). Además, la falta de control sobre la ventilación puede favorecer la proliferación de moho, un problema especialmente prevalente en viviendas de bajos ingresos (Choi et al., 2020). En general, las condiciones de ventilación no suelen ser una prioridad en el diseño de viviendas informales, lo que expone a sus ocupantes a riesgos sanitarios tanto por ventilación insuficiente como por ventilación excesiva no controlada.

A pesar de las diferencias en las prioridades regionales, en el sur global también se han llevado a cabo estudios experimentales sobre hermeticidad mediante el método de presurización con 'puerta sopladora'. Se evaluaron 189 viviendas en distintas zonas climáticas de Chile, obteniendo una hermeticidad media de 12.9 ACH a 50 Pa (Bobadilla et al., 2014). En dicho estudio los edificios de construcción ligera en madera resultaron ser los menos herméticos (24.6 ACH), mientras que las edificaciones masivas de hormigón mostraron mayor hermeticidad (9 ACH). A partir de estos resultados, Chile actualizó su "Reglamentación Térmica" en noviembre de 2025, estableciendo límites de hermeticidad que varían entre 4 y 8 ACH a 50 Pa, según la zona bioclimática. Por otra parte, en Uruguay se analizaron edificaciones de mampostería tradicional pesada (cerámica cocida), reportándose valores para dos viviendas de 3.5 y 5.2 ACH a 50 Pa (Rodríguez Muñoz et al., 2020). Estos resultados son comparables con estudios europeos realizados en diversas tipologías y materiales: en Estonia, se reportó una media de 4.9 ACH en viviendas unifamiliares aisladas de construcción ligera con marcos de madera (Kalamees, 2007); en Lituania, un promedio de 4.73 ACH en casas unifamiliares construidas con ladrillos o bloques de mampostería (Sfakianaki et al., 2008); y en Grecia, un valor de 7.0 ACH en viviendas unifamiliares de piedra, hormigón y ladrillo (Šadauskienė et al., 2016). Finalmente, en tipologías multifamiliares de mampostería, se han registrado promedios de 7.26 ACH en departamentos en España (Feijó-Muñoz et al., 2018) y 6.25 ACH en un departamento de hormigón y ladrillo en Montenegro (Tombarević, Vušanović & Šekularac, 2023).

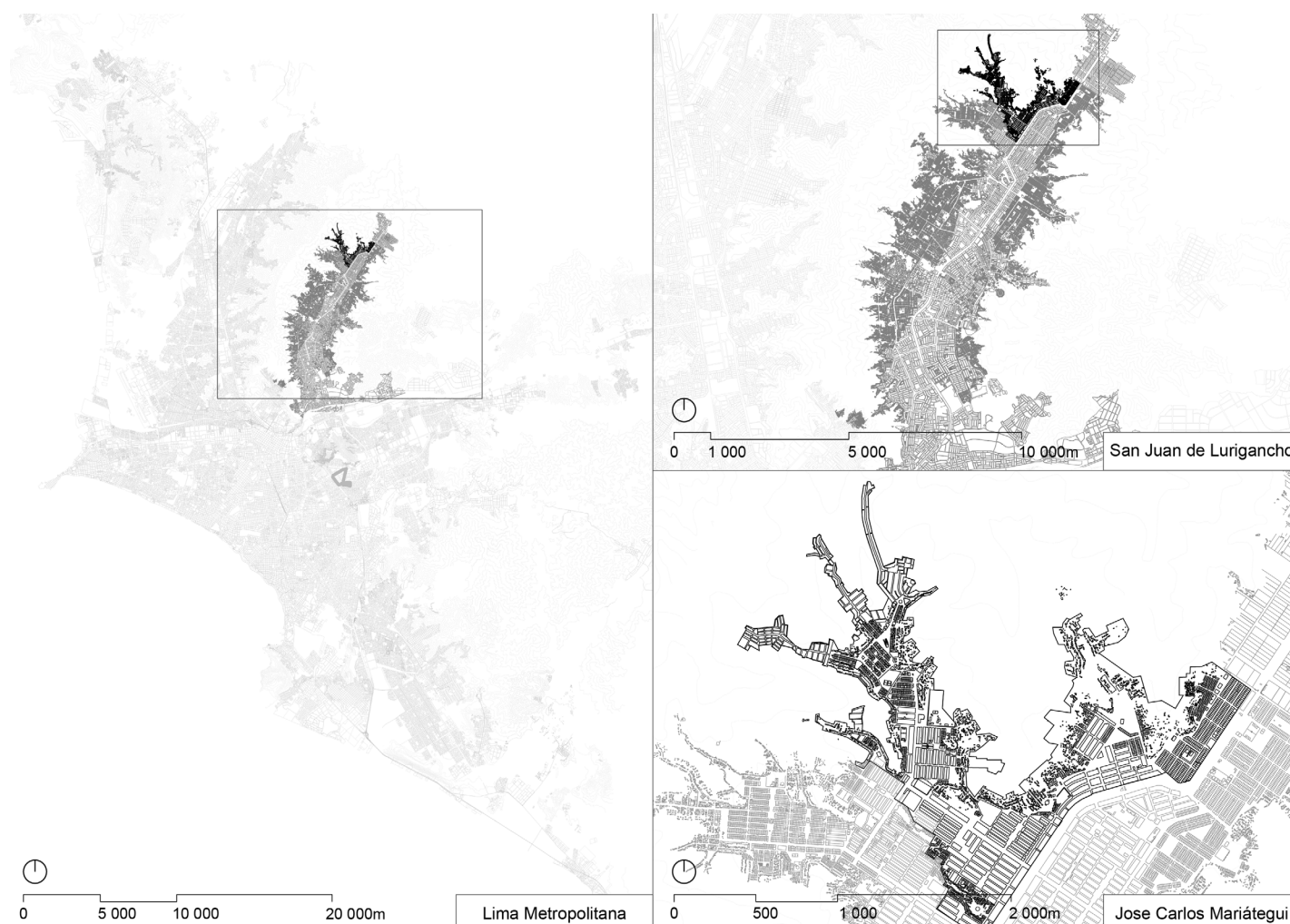


Figura 1. Ubicación del barrio de José Carlos Mariátegui en el distrito de San Juan de Lurigancho de la ciudad de Lima.
 Fuente: Elaboración de los Autores.

En el presente estudio se realizaron mediciones de hermeticidad mediante el método de presurización con puerta sopladora en viviendas informales construidas con recursos limitados, ubicadas en una zona periurbana de la ciudad de Lima, Perú. De acuerdo con nuestra revisión de la literatura, no se han identificado estudios previos que apliquen esta técnica en viviendas con características similares. Este trabajo busca abordar dicho vacío mediante la exploración de la hermeticidad en edificaciones no convencionales. La importancia de generar esta evidencia radica en que, al proporcionar datos empíricos iniciales sobre infiltraciones en contextos de precariedad, se pueden establecer puntos de partida para el estudio del confort térmico y la habitabilidad (Oraiopoulos et al., 2023). En consecuencia, estos hallazgos podrían ofrecer una primera aproximación empírica para alimentar el debate sobre estrategias de rehabilitación de la vivienda informal y la pertinencia de aplicar estándares internacionales en contextos de alta vulnerabilidad.

CASO DE ESTUDIO

EL BARRIO DE JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI

El barrio de José Carlos Mariátegui, ubicado en el distrito de San Juan de Lurigancho, Lima, se originó como un asentamiento informal a mediados de la década de 1980 sobre terrenos planos, áridos y carentes de infraestructura básica. Situado entre las estribaciones andinas, a aproximadamente 15 kilómetros del centro de Lima y a una altitud de 400 msnm (Figura 1), este barrio ha experimentado un crecimiento progresivo y no planificado, basado principalmente en la autoconstrucción. Con el paso del tiempo, los nuevos asentamientos han ocupado zonas cada vez más elevadas en las laderas que rodean la explanada original.

Este patrón de crecimiento refleja una dinámica común en las periferias urbanas de muchas ciudades latinoamericanas, donde la expansión urbana informal ha sido el principal motor del aumento del parque habitacional. En el caso específico de Lima, se estima que



Figura 2. Vista general del barrio de José Carlos Mariátegui. Fuente: Elaboración de los Autores.



Figura 3. Ubicación de las viviendas ensayadas sobre imagen de satélite. Fuente: Elaboración de los Autores basada en una imagen extraída de Google Earth.

Equipo	Marca	Modelo
Equipo de puerta sopladora, medidor de presión (manómetro integrado) y medidor de caudal de aire (placa orificio).	The Energy Conservatory	Minneapolis Blower Door con sensor de presión diferencial DG-700. Software TECLOG 4 versión 4.2.0.37
Registrador de señales	Yokogawa	MW100
Sensores de presión diferencial	Yokogawa	EJX110A
Registradores de Temperatura y humedad relativa	Onset	Hobo data logger U12-006
Micro estación meteorológica	Onset	Hobo data logger Microstation H21-002

Tabla 1. Instrumentos utilizados para la medición de los niveles de infiltración. Fuente: Elaboración de los Autores.

alrededor de 2 millones de personas residen en viviendas con techos contruidos con materiales ligeros y precarios como la madera, la calamina o materiales similares, lo que representa aproximadamente el 20% de la población (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2018). Estas condiciones de precariedad tienden a mantenerse durante un período promedio de 10 a 15 años antes de que las viviendas alcancen algún nivel de consolidación, tanto a nivel constructivo como en la provisión de servicios básicos (Lambert et al., 2023).

El menor grado de consolidación tanto de las viviendas como de la infraestructura en las zonas más elevadas de los barrios informales es fácilmente identificable y suele estar asociado a un mayor riesgo de deslizamientos, así como a dificultades en el acceso y en la provisión de servicios básicos. La precariedad inicial de las edificaciones se manifiesta en el uso de materiales ligeros, como muros de tablas o triplay y techos de planchas onduladas de metal (Figura 2). Estas condiciones constructivas, en combinación con el clima desértico, litoral y templado de Lima, generan ambientes interiores sumamente incómodos, caracterizados por un sobrecalentamiento durante el verano y temperaturas muy bajas durante el invierno (Wieser, Verdiere & Fennell, 2022). Las brisas suaves y moderadas son constantes a lo largo del año (generalmente entre 1 y 2 m/s), pero no mitigan el efecto de la intensa radiación solar en verano (5.7 kWh/m² en promedio diario), la elevada humedad relativa (60% en verano y 80% en invierno en promedio) ni la frecuente neblina que se presenta en invierno (Oraiopoulos et al., 2025).

METODOLOGÍA

Se realizaron ensayos de hermeticidad en cinco viviendas (Figura 3), en las que se utilizó el método de puerta sopladora, conforme al estándar ASTM E779-19, Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization (Advancing Standards Transforming Markets [ASTM], 2019). Este procedimiento, ampliamente aplicado en edificaciones convencionales (Hsu et al.,

2021), permite cuantificar las infiltraciones de aire, a través de la envolvente del edificio mediante la creación de una diferencia de presión controlada, generada por un ventilador que presuriza y despresuriza el espacio interior. La instrumentación empleada en los ensayos se detalla en la Tabla 1. Si bien el número de viviendas evaluadas es reducido, esta limitación es inherente al carácter exploratorio del estudio y a las condiciones difíciles del contexto: accesibilidad, seguridad y disponibilidad de las familias. El estudio se concibe como una aproximación exploratoria que aporta antecedentes empíricos iniciales sobre la hermeticidad para este tipo de edificaciones, ausentes hasta ahora en la literatura. Los valores obtenidos no pretenden ser estadísticamente representativos del universo de viviendas informales en Lima, sino proveer datos empíricos iniciales que orienten futuras investigaciones y sirvan de insumo para el modelado energético y la formulación de políticas públicas, en línea con estudios similares en contextos de difícil acceso (Rodríguez Muñoz et al., 2020; Oraiopoulos et al., 2023).

La envolvente de las viviendas estudiadas estuvo conformada por techos de planchas onduladas metálicas (calamina de zinc) y muros contruidos con madera, drywall, tableros de virutas orientadas (Oriented Strand Board, OSB) o ladrillo (Figura 4). Para la selección de las viviendas se empleó un muestreo por conveniencia, condicionado por la disposición de las familias y por la proximidad geográfica entre ellas. El objetivo fue registrar la realidad constructiva de las viviendas del barrio, donde las imperfecciones y el deterioro en las estructuras representan una condición usual derivadas de la autoconstrucción y de las limitaciones económicas. No obstante, cuatro de las cinco viviendas se encontraban en zonas de ladera, a aproximadamente 300 metros de distancia del punto de acceso vehicular y con una diferencia de altura cercana a los 90 metros, lo que representó un desafío adicional para el transporte del equipamiento necesario para los ensayos. Para el funcionamiento adecuado del equipo, fue necesario contar adicionalmente con un generador eléctrico que pueda proporcionar una corriente de arranque de entre 8 y 10 amperios, ya que la red local en las partes altas

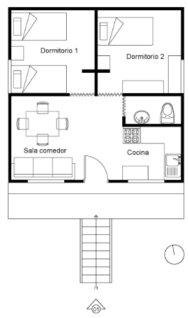
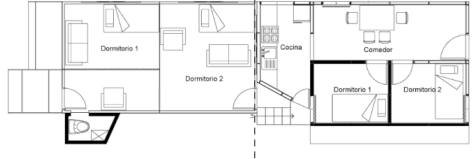
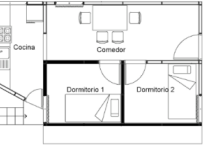
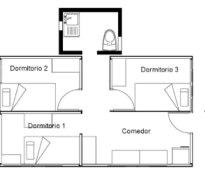
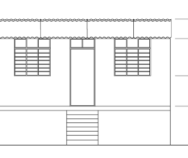
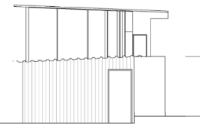
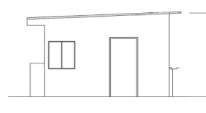
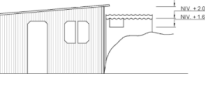
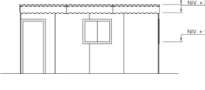
	V01	V02	V03	V04	V05
PLANTA					
ELEVACIÓN					
CARACTERÍSTICAS	Área techada: 40.19 m ² Volumen de aire: 111.54 m ³ Materialidad: Techo: Calamina Piso: Cemento Muros: Albañilería	Área techada: 29.52 m ² Volumen de aire: 67.75 m ³ Materialidad: Techo: Calamina Piso: Cemento Muros: Listones de madera	Área techada: 31.85 m ² Volumen de aire: 90.78 m ³ Materialidad: Techo: Calamina Piso: Cemento Muros: Drywall	Área techada: 30.80 m ² Volumen de aire: 68.88 m ³ Materialidad: Techo: Calamina Piso: Cemento Muros: Listones de madera	Área techada: 30.00 m ² Volumen de aire: 69.00 m ³ Materialidad: Techo: Calamina Piso: Cemento Muros: OSB
FOTOGRAFÍA					

Figura 4. Viviendas ensayadas. Planos y características. Fuente: Elaboración de los Autores.

de José Carlos Mariátegui es inestable y suministra únicamente entre 4 y 5 amperios.

Previo a los ensayos, se realizó una inspección minuciosa en cada una de las viviendas, en que se verificó que puertas y ventanas permanecieran completamente cerradas y que no existieran aperturas adicionales que pudieran afectar la precisión de la medición. Posteriormente, se instaló el equipo de la puerta sopladora, se ejecutaron las pruebas preliminares, y se aplicaron presiones desde 10 Pa, incrementándolas en intervalos de 5 Pa hasta alcanzar los 50 Pa. Cabe destacar que, en viviendas con altos niveles de infiltración, producto de una construcción deficiente, resultó difícil alcanzar las diferencias de presión requeridas. Para asegurar la confiabilidad de los datos obtenidos, las lecturas del manómetro integrado al equipo de puerta sopladora fueron contrastadas con las mediciones de cuatro manómetros calibrados adicionales.

Durante los ensayos realizados en cada vivienda, el ventilador del sistema de puerta sopladora generó una

diferencia de presión ΔP a través de la envolvente del edificio. Para caracterizar esta condición, se registraron mediciones de presión diferencial en tres puntos estratégicos del interior de la vivienda. De forma simultánea, el equipo midió el caudal de aire (Q) requerido para mantener dicha diferencia de presión. A partir de estos datos, se determinaron el coeficiente de fugas de aire (C) y el exponente de presión (n), mediante el ajuste de los valores obtenidos a la ecuación correspondiente del modelo de flujo de aire en función de la presión (Ecuación 1).

$$Q = C(\Delta P)^n \quad (\text{Ecuación 1})$$

El número de intercambios de aire por hora (ACH, por sus siglas en inglés) se calculó al multiplicar el caudal de aire (Q) por 3600 segundos (equivalente a una hora), y se dividió el resultado por el volumen interior de la vivienda (V), de acuerdo con la fórmula convencional utilizada en estudios de hermeticidad (Ecuación 2).

$$ACH = \frac{Q \times 3600}{V} \quad (\text{Ecuación 2})$$



Figura 5. Izquierda. Puerta sopladora instalada en la Vivienda V03. Fuente: Elaboración de los Autores.
 Figura 6. Derecha. Sensores instalados en la Vivienda V02. Fuente: Elaboración de los Autores.

Adicionalmente, se registraron los parámetros ambientales tanto interiores como exteriores durante los ensayos. La lista detallada de instrumentos utilizados se presenta en la Tabla 1. La Figura 5 y Figura 6 ilustran la instalación y el funcionamiento de los equipos en campo.

Se utilizó la vivienda V01 como caso de referencia para comparar las mediciones de diferencia de presión registradas por el manómetro del equipo de puerta sopladora con las obtenidas por los otros cuatro manómetros empleados en los experimentos (Figura 7). A lo largo de todo el rango de presiones ensayado, no se observaron diferencias significativas entre los instrumentos. Esto permitió validar la confiabilidad de las mediciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de flujos de infiltración y de intercambio de aire registrados en las viviendas evaluadas superaron

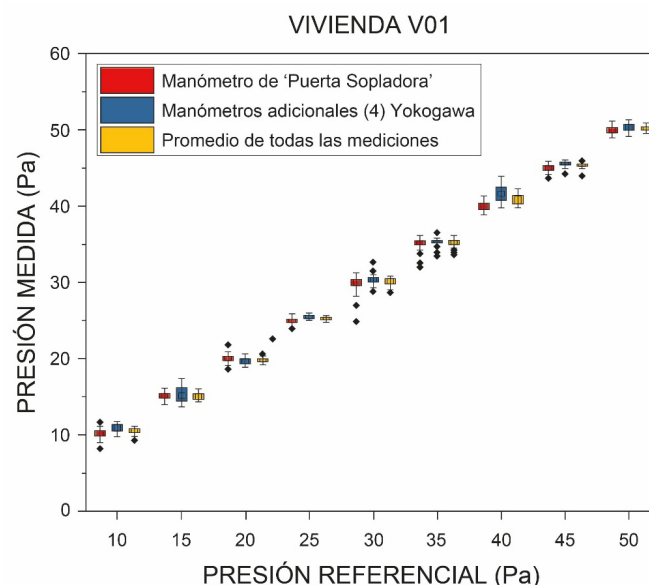


Figura 7. Mediciones de presión media en la vivienda V01. Fuente: Elaboración de los Autores.

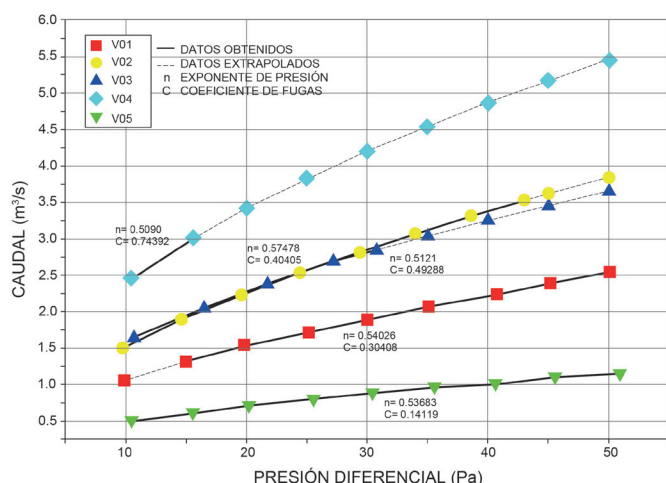


Figura 8. Infiltraciones de aire en cada una de las viviendas. Las líneas de trazo indican los valores extrapolados cuando no se pudo llegar a la diferencia de presión deseada durante el experimento. Fuente: Elaboración de los Autores.

ampliamente los rangos comúnmente reportados en la literatura especializada (Figura 8 y Figura 9). A una presión diferencial de 50 Pa, se obtuvieron tasas de infiltración que oscilaron entre 40 ACH y 285 ACH. En el caso particular de las viviendas V02, V03 y V04, no fue posible alcanzar la presión objetivo de 50 Pa debido a las elevadas tasas de infiltración, propias de construcciones altamente permeables; en esos casos, se estimaron dichos valores a partir de la extrapolación de la curva de flujo de aire, al aplicar la ecuación del modelo de ley de potencia ($Q=C(\Delta P)^n$) con los coeficientes C y n derivados del ajuste por mínimos cuadrados de los puntos medidos. No obstante, se debe precisar que en la vivienda V04, debido a su extrema permeabilidad, solo se pudieron obtener dos puntos de medición, por lo que su resultado se presenta como una estimación indicativa, al no alcanzar el mínimo de cinco puntos requerido por la norma ASTM E779-19.

Estos niveles inusualmente elevados de infiltración reflejan las deficiencias constructivas características de las viviendas informales analizadas. Para referencia, los valores más altos encontrados en la literatura fueron de 24.6 ACH, en viviendas chilenas de madera (Bobadilla et al., 2014), y 23.3 ACH en un edificio italiano construido en 1950 (Ambrosio Alfano, et al., 2012). Las principales causas identificadas fueron la presencia de intersticios visibles, tanto en los vanos como en las uniones entre los muros y la cubierta de plancha ondulada. En la muestra, las viviendas con muros de listones de madera (V02 y V04) y de drywall (V03) presentaron niveles significativamente mayores de infiltración en comparación con aquellas construidas con muros de albañilería (V01) y paneles de OSB (V05). Esta diferencia se explica porque los sistemas constructivos basados en elementos ensamblados, como tablas o placas de drywall, generan múltiples puntos

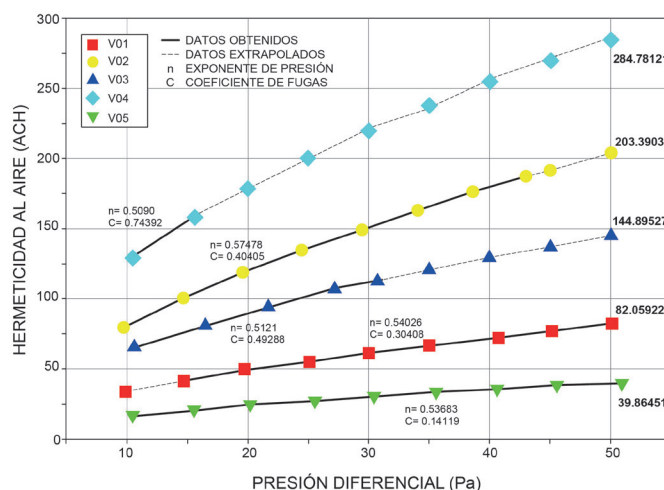


Figura 9. Renovación de aire por hora en cada una de las viviendas. Las líneas de trazo indican valores que fueron extrapolados para facilitar la comparación. Fuente: Elaboración de los Autores.

potenciales de fuga, los que tienden a ampliarse con el tiempo debido al desgaste, la exposición a la intemperie y la dilatación de los materiales, acentuándose así la pérdida de la hermeticidad.

Los logaritmos de los valores de flujo de aire de infiltraciones (Q) y de diferencia de presión (ΔP) medidos estuvieron estrechamente relacionados en todas las viviendas, con coeficientes de determinación (R^2) cercanos a 1 (Figura 10 y Tabla 2). Con ello es posible identificar una predictibilidad del comportamiento de las fugas de aire, lo que permitió a su vez, como se indicó anteriormente, la extrapolación de datos en los casos en los que no se pudo generar la diferencia de presión deseada durante los experimentos. En el gráfico de fuga de aire (Figura 10) se presenta para cada una de las viviendas el ingreso del caudal del aire generado por el ventilador con relación a la presión de aire que se aplica. Se puede observar, por ejemplo, para el caso de la Vivienda 01, el flujo de aire obtenido, el que varía entre 1.3 y 2.5 m³/s dependiendo de la presión ejercida. No obstante, se debe precisar que en el caso de la vivienda V04, los valores obtenidos representan estimaciones indicativas, ya que la extrema permeabilidad del inmueble impidió obtener el mínimo de cinco puntos exigido por la norma ASTM E779-19. En este caso específico, el coeficiente R^2 carece de valor interpretativo y los resultados deben leerse con la cautela propia de un hallazgo en condiciones de precariedad constructiva extrema.

Durante el trabajo de campo, en los preparativos para los ensayos y durante la colocación de los instrumentos, se pudo identificar en todas las viviendas, condiciones que hicieron presagiar niveles muy altos de infiltración. Se identificaron intersticios, ranuras, perforaciones, imprecisión en la unión de los componentes constructivos,

GRÁFICAS DE FUGA DE AIRE

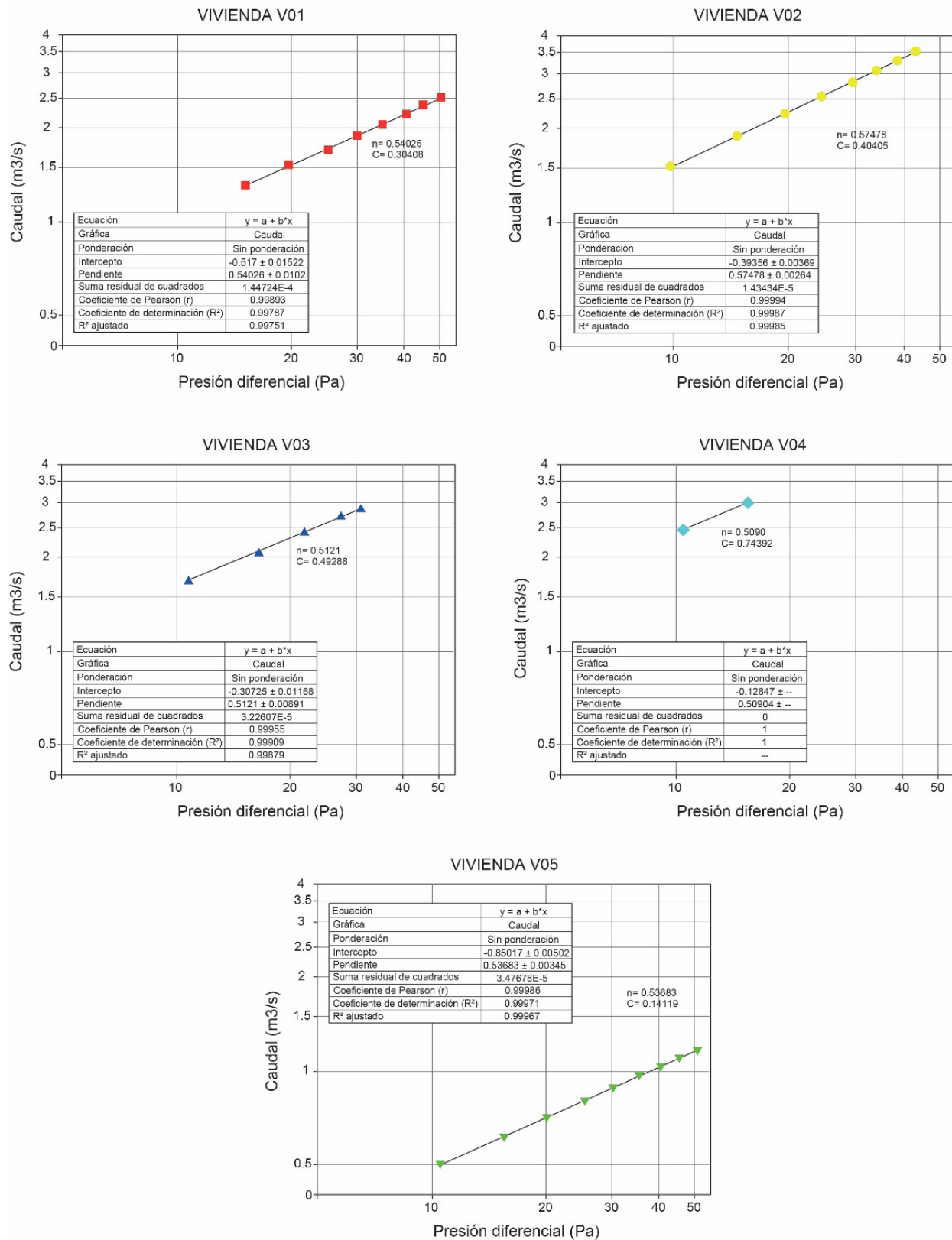


Figura 10. Resultados de fuga de aire en las cinco viviendas ensayadas. Para la vivienda V04, los valores representan estimaciones indicativas, ya que la extrema permeabilidad del inmueble impidió obtener el mínimo de cinco puntos exigido por la norma ASTM E779. Fuente: Elaboración de los Autores.

Vivienda	Material	Exponente de fugas de aire, n	Coefficiente de fugas, C	Caudal (m3/s) a 50 Pa	ACH a 50 Pa	R ²
V01	Ladrillo	0.540	0.304	2.5	82	0.99787
V02	Entablado	0.575	0.404	3.8	203	0.99987
V03	Drywall	0.512	0.493	3.7	145	0.99909
V04	Entablado	0.509	0.744	5.4	285	1.00000 ^a
V05	OSB	0.537	0.141	1.1	40	0.99971

a Valor obtenido con solo dos puntos de medición debido a que la extrema permeabilidad del inmueble impidió alcanzar los diferenciales de presión requeridos por el equipo. En este caso, el coeficiente R2 carece de valor interpretativo sobre la calidad del ajuste y los resultados deben considerarse como estimaciones indicativas no validadas bajo los criterios mínimos (5 puntos) de la norma ASTM E779.

Tabla 2. Valores obtenidos de los ensayos. Fuente: Elaboración de los Autores.

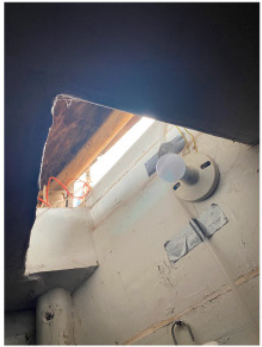
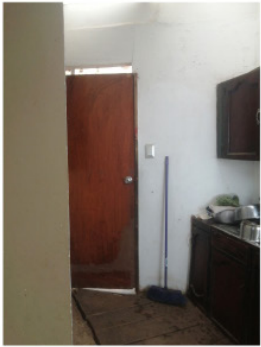
	V01	V02	V03	V04	V05
FOTOGRAFIA					
AMB.	Dormitorio	Baño	Cocina	Dormitorio	Dormitorio
INTERSTICIOS	-Vanos con partes sin cerramiento vidriado -Ladrillos con orificios debido a rajadura	-Abertura en el techo del baño -Intersticio entre el cerramiento y la calamina	-Aberturas en la puerta de entrada	-Rotura de listones de madera -Intersticio entre el muro del baño y de los dormitorios	-Intersticio entre el cerramiento y la calamina

Figura 11. Imágenes con situaciones que reducen el nivel de hermeticidad al aire de las viviendas. Fuente: Elaboración de los Autores.

e incluso vanos sin capacidad de cerramiento (Figura 11). En el caso de la vivienda V02, la abertura identificada en el techo es una característica de diseño intencional para ventilación e iluminación. Durante el levantamiento de información en la zona, se observó que este tipo de soluciones forman parte de la lógica constructiva espontánea de diversos habitantes, lo que permite considerar este caso como un ejemplo de cómo ciertas prácticas de habitabilidad impactan severamente en la hermeticidad al aire. Lo que en contextos formales se clasificaría como un defecto o daño constructivo, en la vivienda precaria representa una condición habitual derivada de la autoconstrucción y la falta de mantenimiento por limitaciones económicas. La precariedad constructiva observada se alinea con los diagnósticos socioeconómicos previos en estos asentamientos informales (Wieser et al.,

2022), que evidencian que las limitaciones de ingresos en la autoconstrucción restringen la capacidad de las familias para invertir en soluciones técnicas adecuadas y en la mejora de la envolvente de sus viviendas.

Estos niveles extremos de infiltración tienen implicancias relevantes sobre el confort térmico, la salud y la calidad del aire interior de los ocupantes. Por un lado, la presencia de corrientes de aire, filtraciones y pérdida del control térmico del espacio habitable pueden generar discomfort térmico severo, especialmente durante el invierno. Además, el elevado intercambio de aire no controlado dificulta el mantenimiento de temperaturas estables en el interior, lo que impacta negativamente en la habitabilidad general de la vivienda. En consecuencia, la entrada continua y no filtrada de aire exterior puede

introducir contaminantes, humedad y partículas en suspensión, que elevan el riesgo de enfermedades respiratorias, agravando problemas preexistentes como el asma, e incrementando la presencia de moho. Este problema es acrecentado por la gran presencia de arena en los exteriores.

La relevancia de este estudio radica no solo en ser la primera que realiza mediciones sistemáticas de hermeticidad en viviendas informales en el contexto peruano, sino también en su potencial para nutrir futuras simulaciones energéticas y de confort térmico. La disponibilidad de datos empíricos de hermeticidad específicos para viviendas autoconstruidas y precarias es fundamental para calibrar modelos que estimen pérdidas de energía, condiciones de habitabilidad y escenarios de intervención. En contextos donde la recolección de datos es difícil y costosa, estos resultados permiten definir rangos realistas de infiltración para estudios comparativos, evaluaciones de impacto o propuestas de mejora en programas de rehabilitación y políticas públicas.

Para dimensionar la magnitud de los resultados registrados, se reconoce que una vivienda con 100 ACH a 50 Pa —valor intermedio dentro del rango registrado— experimenta una renovación de aire involuntaria varias veces superior a la recomendada para garantizar condiciones mínimas de habitabilidad y confort. En términos prácticos, esto implica que cualquier estrategia pasiva de acondicionamiento térmico —como el uso de masa o aislamiento— tendría un efecto marginal sin una intervención previa sobre la envolvente que reduzca dichas infiltraciones. Del mismo modo, los niveles de infiltración identificados hacen prácticamente inviable el eventual uso eficiente de sistemas de calefacción activa, ya que el calor generado se disiparía casi de inmediato hacia el exterior.

Todas estas consideraciones son especialmente relevantes en el contexto del invierno limeño, caracterizado por temperaturas que, si bien no son extremas en términos absolutos, resultan difíciles de sobrellevar en interiores sin control térmico, debido a la combinación de humedad relativa elevada, escasa radiación solar directa y a la propia incapacidad de financiar sistemas de calefacción (Wieser et al., 2022). En consecuencia, la mejora de la hermeticidad de las viviendas en este contexto debería considerarse como una intervención prioritaria y de bajo costo relativo, previa a cualquier otra mejora asociada al confort y la eficiencia energética.

CONCLUSIONES

A partir de los valores obtenidos, se constata que los niveles de infiltración de aire en las viviendas precarias de barrios informales en Lima son extremadamente altos

en comparación con normativas internacionales, e incluso con viviendas de otros países de la región. Esta falta de hermeticidad, sumada a la ligereza y al bajo nivel de aislamiento de la envolvente, genera que los habitantes estén expuestos a condiciones extremas, reduciéndose los niveles de confort térmico, sobre todo durante los meses de invierno. Atendiendo a las características materiales identificadas y dado que la vulnerabilidad económica del sector limita la viabilidad de intervenciones de forma autónoma y rigurosa por parte de los habitantes, la mejora de la hermeticidad en estas viviendas sugiere la necesidad de implementar programas de apoyo público.

Adicionalmente, los resultados sugieren que eventuales intervenciones simples y de bajo costo orientadas al aumento de la hermeticidad al aire en estas viviendas, como sellar intersticios y mejorar el ajuste de puertas y ventanas, tendrían un impacto térmico significativo, haciendo necesaria su consideración en el diseño de eventuales programas de mejoramiento y políticas públicas de vivienda orientadas a estas poblaciones. Los resultados obtenidos constituyen un insumo fundamental para el desarrollo de normativas y estrategias de intervención orientadas a mejorar la habitabilidad en contextos de vulnerabilidad urbana.

En base al reconocimiento de la relación directa entre la hermeticidad al aire y el confort térmico en edificios ventilados de forma natural y sin sistemas de acondicionamiento térmico activo, resulta necesario un mayor interés por incluir estos aspectos en el debate local, tanto académico como público. Finalmente, se resalta la necesidad de ampliar significativamente el número de mediciones para consolidar una línea base que abarque los distintos tipos constructivos presentes en el parque habitacional de viviendas del país, tanto del sector formal como del informal. Dicha línea base permitirá sustentar normativas técnicas adaptadas a la realidad local, así como calibrar modelos de simulación energética aplicables a contextos de vivienda en otras ciudades del país y de la región.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, M.W.; Curación de datos, M.W., R.M., E.B., E.M., A.G., J.V., LC; Análisis formal, M.W., R.M., E.B., E.M., L.C.; Adquisición de financiación M.W.; Investigación, M.W., R.M., E.B., E.M., A.G., J.V., L.C.; Metodología, M.W., R.M., E.B., E.M., A.G., J.V., L.C.; Administración de proyecto, M.W.; Supervisión, M.W., R.M., E.B., E.M., A.G., J.V.; Validación, M.W., R.M., E.B., E.M., L.C.; Escritura – borrador original, M.W.; Escritura – revisión y edición, M.W., R.M., E.B., E.M., A.G., J.V., L.C.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio ha sido realizado gracias al financiamiento de las siguientes unidades de la Pontificia Universidad Católica del Perú: Departamento de Arquitectura, Centro de Investigación de la Arquitectura y la Ciudad CIAC, Laboratorio de Energía del Departamento de Ingeniería y Dirección Académica de Responsabilidad Social DARS. Se agradece a las familias que nos permitieron realizar las mediciones al interior de sus viviendas y a la ONG CENCA por el apoyo en el trabajo de campo y el vínculo con la comunidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ambrosio Alfano, F., Dell'Isola, M., Ficco, G., & Tassini, F. (2012). Experimental analysis of air tightness in Mediterranean buildings using the fan pressurization method. *Building and Environment*, 53, 16-25. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.12.017>

Advancing Standards Transforming Markets [ASTM]. (23 de enero de 2019). *ASTM 779-19. Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0779-19>

Bobadilla, A., Díaz, M., Figueroa, R., & Arriagada, R. (2014). Proposal of Acceptable Air Tightness Classes for Buildings in Chile. *Revista de la construcción*, 13(1), 15-23. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2014000100002>

Buonanno, G., Morawska, L., & Stabile, L. (2009). Particle emission factors during cooking activities. *Atmospheric Environment*, 43(20), 3235-3242. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.03.044>

Choi, Y., Lim, Y., Kim, J., & Song, D. (2020). Why Does a High Humidity Level Form in Low-Income Households Despite Low Water Vapor Generation? *Sustainability*, 12(18), 7563. <https://doi.org/10.3390/su12187563>

Etheridge, D. (2015). A perspective on fifty years of natural ventilation research. *Building and Environment*, 91, 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.033>

Feijó-Muñoz, J., Poza-Casado, I., González-Lezcano, R. A., Pardal, C., Echarri, V., Assiego De Larriva, R., Fernández-Agüera, J., Dios-Viéitez, M. J., Del Campo-Díaz, V. J., Montesdeoca Calderín, M., Padilla-Marcos, M. Á., & Meiss, A. (2018). Methodology for the Study of the Envelope Airtightness of Residential Buildings in Spain: A Case Study. *Energies*, 11(4), 704. <https://doi.org/10.3390/en11040704>

Guyot, G., Schild, P. G., & Carrié, R. (abril de 2010). *Stimulation of good building and ductwork airtightness through EPBD*. Assessment and Improvement of the EPBD Impact [ASIEPI]. <https://www.aivc.org/resource/stimulation-good-building-and-ductwork-airtightness-through-epbd>

Hsu, Y.-S., Zheng, X., Cooper, E., Gillott, M., & Wood, C. J. (2021). Evaluation of the indoor pressure distribution during

building airtightness tests using the pulse and blower door methods. *Building and Environment*, 195, 107742. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107742>

Hutcheon, N. B. (1953). Fundamental considerations in the design of exterior walls for buildings. Technical Report No.13 of the Division of Building Research Ottawa. NRC, 2057(37), 1-25. <https://publications-cnrc.canada.ca/eng/view/object/?id=e03a98e6-9755-42d8-a9ea-f8b34680bde>

Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI]. (2018). *Resultados definitivo de los Censo Nacional 2017. Región Lima*. XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1550/

Kalamees, T. (2007). Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia. *Building and Environment*, 42(6), 2369-2377. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.001>

Kulshreshtha, P., Khare, M., & Seetharaman, P. (2008). Indoor air quality assessment in and around urban slums of Delhi city, India. *Indoor Air*, 18(6), 488-498. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2008.00550.x>

Lambert, R., Escalante, C., De los Rios, S., Verdiere, M., & Wieser, M. (2023). *Dignified housing and energy justice: Learning from low-income neighbourhoods in Lima*. University College London (UCL). <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10181093/>

Oraopoulos, A., Wieser Rey, M., Verdiere, M., Fennell, P., & Ruysevelt, P. (September 4-6, 2023). *Thermal comfort in low-income housing in informal settlements in Lima, Peru. Towards a localised adaptive comfort standard* [Conference paper]. Building Simulation 2023: 18th Conference of International Building Performance Simulation Association [IBPSA], Shanghai, China. <https://doi.org/10.26868/25222708.2023.1474>

Oraopoulos, A., Wieser, M., Verdiere, M., Lambert, R., Fennell, P., & Ruysevelt, P. (2025). Improving habitability in informal settlements in the Global South: Exploring the impact of community urban green infrastructure on outdoor heat stress. *Building and Environment*, 287(Part A), 113787. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113787>

Persily, A. K. (December 6-10, 1998). *Airtightness of commercial and institutional buildings: Blowing holes in the myth of tight buildings*. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VII: proceedings of the Conference. Clearwater, Florida, EE.UU. https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_13149.pdf

Poza-Casado, I., Cardoso, V. E. M., Almeida, R. M. S. F., Meiss, A., Ramos, N. M. M., & Padilla-Marcos, M. Á. (2020). Residential buildings airtightness frameworks: A review on the main databases and setups in Europe and North America. *Building and Environment*, 183, 107221. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107221>

Rodríguez Muñoz, J. M., Sevrini, A., Gil, G., & Bove, I. (2020). Estudio experimental de la permeabilidad al aire de edificios en Uruguay. *ENERLAC. Revista de energía de Latinoamérica y el Caribe*, 4(2), 76-91. <https://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/view/119>

Šadauskienė, J., Šeduikytė, L., Paukštys, V., Banionis, K., & Gailius, A. (2016). The role of air tightness in assessment of building energy performance: Case study of Lithuania. *Energy for Sustainable Development*, 32, 31-39. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.02.006>

Sfakianaki, A., Pavlou, K., Santamouris, M., Livada, I., Assimakopoulos, M.-N., Mantas, P., & Christakopoulos, A. (2008). Air tightness measurements of residential houses in Athens, Greece. *Building and Environment*, 43(4), 398-405. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.006>

Tombarević, E., Vušanović, I., & Šekularac, M. (2023). The Impact of Windows Replacement on Airtightness and Energy Consumption of a Single Apartment in a Multi-Family Residential Building in Montenegro: A Case Study. *Energies*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/en16052208>

Wieser, M., Verdiere, M., & Fennell, P. (December 13-14, 2022). *The impact of built environment on thermal comfort in informal settlements. The case of José Carlos Mariátegui, Lima, Perú* [Conference paper]. Sixth Building Simulation and Optimisation Virtual Conference. Hosted by University of Bath, UK. https://publications.ibpsa.org/proceedings/bso/2022/papers/bso2022_52.pdf

Zheng, X., Cooper, E. W., Mazzon, J., Wallis, I., & Wood, C. J. (2019). Experimental insights into the airtightness measurement of a house-sized chamber in a sheltered environment using blower door and pulse methods. *Building and Environment*, 162, 106269. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106269>