

EDIFICIOS RESIDENCIALES EN ALTURA. COMPORTAMIENTO TÉRMICO-ENERGÉTICO EN CONSTRUCCIONES MÁSICAS Y LIVIANAS EN LA CIUDAD DE MENDOZA.

Julietta Balter¹ ; Carolina Ganem², Carlos Discoli³

(1)(2) Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda - Instituto Ciencias Humanas Sociales y Ambientales - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - CCT Mendoza C.P. 5500
e-mail: jbalter@mendoza-conicet.gob.ar

(3) Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC).
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). FAU - UNLP
Calle 47 N°162, La Plata, C.P. 1900 – Prov. de Buenos Aires

Recibido 02/09/15, aceptado 05/10/15

RESUMEN: El trabajo evalúa el comportamiento térmico-energético en edificios residenciales en altura con distintas materialidades de envolvente: másica y liviana. Se identifican y monitorean simultáneamente dos unidades de vivienda en uso, correspondientes a cada materialidad. Las mismas se ubican sobre el estrato arbóreo propio de una Ciudad-Oasis (más de 12m de altura) con plena exposición a la radiación solar. La validación de modelos dinámicos y su simulación permite ensayar propuestas de materialidad tendientes a la conservación de energía, posibles de ser transferidas a futuras normativas edilicias adecuadas al contexto en estudio. El diagnóstico de casos auditados en condiciones reales de uso se compara con el desempeño de las viviendas con materialidad mejorada. Se logran reducciones en los consumos energéticos del 77% en verano y 44% en invierno en edificios másicos; y del 75% en verano y 93% en invierno en edificios livianos. Se concluye en la importancia de la masividad en la envolvente y en la necesidad de usuarios consientes frente a estrategias de diseño pasivas.

Palabras claves: edificio residencial en altura, envolvente, evaluación térmica, consumos energéticos.

INTRODUCCIÓN

El sector edilicio continúa jugando un rol fundamental en el balance energético global. Ante la renovación de los centros urbanos y el incremento en el valor de suelo, cada vez se realizan más inversiones para edificios en altura en las áreas centrales consolidadas de las ciudades. Sin embargo, muchas veces, los edificios que se construyen en la actualidad no contemplan el entorno en el que van a ser construidos, y la tecnología y diseño arquitectónico no siempre involucran el aprovechamiento de los recursos naturales disponibles.

Los estudios realizados sobre el comportamiento ambiental interior y energético de edificios residenciales en altura se pueden encuadrar en dos orientaciones. Por un lado, dado que los edificios de viviendas presentan requisitos térmicos con un mayor grado de adaptación y flexibilidad que otro tipo de edificios, algunos trabajos se enfocan en la variabilidad de uso y costumbres de sus habitantes, quienes afectan en gran medida las condiciones térmicas y energéticas (Liu et al., 2014; Flores Larsen et al., 2009). En ciertos casos, esta influencia es positiva, y en muchos otros, involucra un uso intensivo de dispositivos convencionales de calefacción y enfriamiento (Juodis et al., 2010). Por otro lado, otros estudios profundizan su análisis en los aspectos tecnológicos y físicos de la materialidad de la envolvente en función de reducir el consumo de energía primaria (Liu et al., 2015; Konstantinou et

¹ Becaria Posdoctoral CONICET

² Investigadora Adjunta CONICET. Docente UNCuyo.

³ Investigador Independiente CONICET. Docente UNLP.

al., 2013; Ballarini et al., 2009). La potencial utilización de masa térmica para reducir las demandas energéticas ha sido demostrada en diferentes estudios de simulación, laboratorio y trabajos de campo. Palme et al. (2013) y Peng (2010) diferencian tipologías constructivas en cuanto a su masividad y liviandad, indicando que las construcciones másicas tienen un mejor desempeño energético y ambiental y son una estrategia contundente para reducir el impacto del cambio climático en el ambiente construido.

Por otra parte, las posibilidades de integración morfológica y ambiental de los edificios en los distintos sistemas urbanos se encuentran condicionadas, entre otros aspectos, por las características climáticas del lugar. Al respecto, las Ciudades-Oasis (Bórmida, 1984) insertas en climas áridos, cuentan con beneficios ambientales provocados por la forestación urbana y definen dos estratos. Por un lado, la situación bajo la copa de los árboles beneficia a las edificaciones de baja altura (3 - 4 niveles) (Cantón et al., 2003). En cambio, fuera del estrato acondicionado las edificaciones están expuestas directamente al clima de la región: la condición sobre la copa de los árboles consiente un acceso pleno a la radiación tanto en invierno (energía incidente deseada) como en verano (energía incidente no deseada) y una exposición al intercambio convectivo y radiativo de energías en ambas estaciones. Teniendo en cuenta a la envolvente como el principal moderador energético se evidencia la importancia de atender a las diferentes tecnologías de envolventes en contextos de ciudades oasis, en el caso específico de la ciudad de Mendoza (32° 40' LS, 68° 51' LO). Dicha ciudad cuenta con un clima templado continental con considerables diferenciaciones en las temperaturas estacionarias y variaciones de temperatura diarias muy pronunciadas (de 10 a 20°C), por lo que la inercia de la materialidad de la envolvente es crucial en el logro del confort interior.

El objetivo del presente trabajo es diagnosticar el comportamiento térmico y energético de unidades de vivienda en edificios en altura en la ciudad de Mendoza. Para ello se definen dos tipologías de envolvente –másica y liviana- a partir del porcentaje de materiales con inercia térmica en la envolvente en términos de densidad (ρ) y peso por metro cuadrado (kg/m^2). Se proponen variaciones en dicha materialidad considerando estrategias tendientes a la conservación de energía, con el fin de generar propuestas posibles de ser transferidas a futuras normativas edilicias. Se plantean los siguientes objetivos específicos: a) Realizar un diagnóstico en condiciones reales de uso en departamentos pertenecientes a dos edificios de distinta materialidad ubicados en el área de alta densidad de la ciudad de Mendoza; b) Validar modelos de simulación dinámica mediante el software *Energy Plus* correlacionando los resultados térmicos medidos y simulados; c) Simular diferentes alternativas de materialidad de envolvente relacionadas a la conservación de energía; y d) Analizar las diferencias térmicas y energéticas de las viviendas en condiciones reales de uso en comparación con los comportamientos termo-energéticos de los casos con materialidad de envolvente mejorada.

METODOLOGÍA

Diagnóstico de casos en condiciones reales de uso

El diagnóstico de casos se realizó mediante tres aproximaciones: mediciones *in situ*, relevamiento de los consumos energéticos y entrevistas a los usuarios.

Las auditorías *in situ* se realizaron simultáneamente en las dos viviendas en estudio, en las cuatro estaciones del año durante períodos entre veinte y treinta días. Se utilizaron micro-adquisidores de datos HOBO U12 de temperatura y humedad relativa y se fijaron intervalos de registro cada 15 minutos sincrónicos en todos los instrumentos, criterio adoptado de acuerdo a las recomendaciones de Longobardi y Hancock (2000). Se instalaron 3 micro-adquisidores para cada una de viviendas ubicados en diferentes ambientes: dos en el interior (estar y habitación) y uno en el exterior (balcón) protegido de la radiación solar. Los mismos se ubicaron a una altura media de 2 metros, siguiendo las recomendaciones de (Kolher y Hassler, 2002) y a una distancia suficiente de la masa de las paredes a los efectos de evitar distorsiones en los datos (Oke, 2004).

Las mediciones de radiación solar global se realizaron dentro de un radio de 2km, distancia apropiada para la validez de los datos de acuerdo a lo indicado para los registros de radiación solar de la Red Solarimétrica de la República Argentina (Grossi Gallegos et al., 1983), con un Solarímetro CM 5

KIPP & ZONEN en los mismos períodos y con la misma frecuencia de toma de datos establecida para las mediciones de temperatura de aire y humedad. Los datos de voltaje se registran por medio de un amplificador en un *data-logger* HOBO. Los resultados obtenidos se ajustan con la constante calibración del aparato (en este caso es igual a $12,09 \times 10^{-6}$ V por W/m^2). De esta forma se obtiene la Radiación Global incidente en W/m^2 .

A los efectos de analizar los requerimientos energéticos anuales de los departamentos en estudio se obtuvieron las facturas bimestrales durante dos años provenientes de los consumos de gas natural y electricidad. Se diferenciaron los consumos para climatización para invierno y verano a partir de los siguientes criterios:

- Climatización en invierno: se calculó el promedio de los consumos de gas natural en los períodos que no se utilizaban sistemas de calefacción (de setiembre a mayo). Con este dato se obtuvo el consumo para agua caliente y cocción en el periodo de invierno, diferenciando el consumo para calefacción.
- Climatización en verano: se calculó el promedio de los consumos de electricidad en los períodos que no se utilizaban sistemas de enfriamiento. Con este dato se obtuvo el consumo para iluminación y electrodomésticos en el periodo de verano, diferenciando el consumo para refrigeración. En este caso se diferenciaron las viviendas másicas de las livianas, dado que las últimas utilizaban medios de enfriamiento en períodos más extensos.

Por otro lado, se realizaron entrevistas abiertas a los habitantes de los departamentos en estudio con el objetivo de conocer el uso y ocupación de los espacios: horarios, gestión de la envolvente, uso de medios mecánicos de climatización, etc. Durante las entrevistas se realizó una auditoría extensa de los parámetros ambientales. Este tipo de relevamiento ambiental durante la entrevista facilita la contextualización de las respuestas a lo largo de las mediciones mensuales.

Validación de modelos de simulación dinámica

Las mediciones efectuadas fueron utilizadas para validar modelos de simulación dinámica mediante el programa *Energy Plus*, versión 7.0 (2009). Este programa gratuito fue desarrollado por el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (LBNL) y es actualmente el *software* oficial para la simulación del Departamento de Energía de EE.UU. Para la simulación térmica de los espacios se consideraron los siguientes aspectos:

- Dada la importancia de seleccionar una adecuada división de zonas térmicas (University of Illinois, 2013) las unidades de viviendas se separaron en 4 zonas. A tal fin se tuvieron en cuenta los espacios principales: estar, habitación 1 y habitación 2 (orientados al Norte en ambas tipologías) y zona de servicios.
- Teniendo en cuenta que el simulador considera la velocidad del viento local calculado a la altura del centro de gravedad de superficie, las viviendas en estudio se graficaron en la altura real en la que se encuentran. Asimismo, se incorporaron viviendas bajo y sobre las mismas (de acuerdo a la división de zonas) a los efectos de controlar los intercambios de calor por pisos y techos.
- Los pisos y techos se ingresaron como elementos con cuatro capas (del interior hacia el exterior): cielo raso aplicado (yeso), losa de hormigón, contrapiso de hormigón, piso de madera, por lo que se seleccionó diferencias finitas como algoritmo para el cálculo de balance de calor.
- Las superficies de sombras (*Building Shading*) se ingresaron para los elementos de protección solar, tales como balcones y persianas.
- Se incorporó la cantidad de personas por zona, determinando con los usos de horarios el tiempo de ocupación.
- Se utilizó el modelo de infiltraciones “Área de Fuga Efectiva” considerando una renovación de aire por hora en todas las zonas térmicas. Este modelo está indicado para edificios de tipo residencial (University of Illinois, 2013).
- Los coeficientes convectivos de las superficies de los muros interiores se fijaron en $6W/m^2K$. Los coeficientes de convección de las superficies exteriores son calculados por el software a través de un modelo detallado teniendo en cuenta la orientación y la velocidad y dirección del viento.

Con las variables climáticas medidas en los períodos seleccionados, se conformó el archivo de clima requerido para la simulación de los modelos. Los datos necesarios fueron: Radiación Global sobre superficie horizontal, Radiación difusa sobre superficie horizontal, Radiación directa normal al haz, Temperatura de bulbo seco exterior, Humedad relativa exterior, velocidad y dirección de vientos. La radiación directa al haz y difusa sobre plano horizontal se calculó por medio de un módulo de cálculo anexo al SIMEDIF (2005) ingresando la radiación global sobre superficie horizontal y los datos geográficos del lugar.

En cuanto a las estaciones seleccionadas para la validación, con el fin de aislar los aportes de calefacción o enfriamiento, se consideraron los períodos en los que no se utilizaron medios mecánicos de climatización. Esta situación se observó en los comportamientos térmicos de los espacios auditados y se corroboró en las entrevistas a los usuarios. Para el edificio másico el período corresponde a la estación de otoño del 6 al 11 de Abril (Figuras 1.a); y en el edificio liviano la validación se efectúa en la época de invierno del 22 al 28 de Julio (Figura 1.b) debido al uso moderado de calefacción en esta estación, siendo que en las tres restantes se observa el uso de aire acondicionado. Las simulaciones se programan 10 días antes de la fecha seleccionada dado que resulta importante que el modelo físico entre en régimen con anticipación. Las calibraciones se realizan en los estar, dado que son los espacios más ocupados y en los que se pudo saber con mayor detalle la influencia de los usuarios.

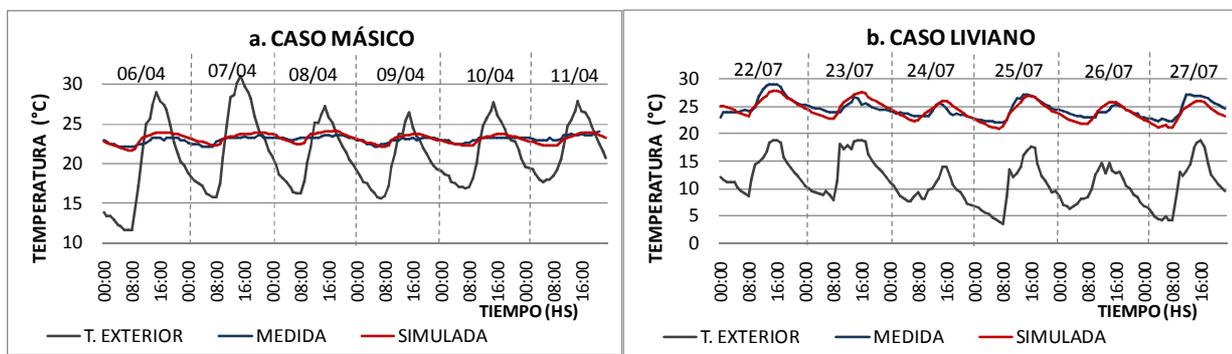


Figura 1. Ajuste de temperaturas interiores medidas y simuladas en los casos de estudio

Evaluación de variaciones en la materialidad de la envolvente opaca y transparente

Se simularon los comportamientos térmicos a partir de modificar la materialidad de envolvente vertical opaca y transparente. Se consideran los dos casos de estudio -másico y liviano-, con el fin de mejorar aspectos de su materialización respetando su imagen. La modificación en la materialidad se realiza en función de tener en cuenta la predominante en cada edificio, es decir, en el caso másico en primer lugar se modifican los elementos opacos y en el liviano los transparentes, y se identifican las combinaciones con mejores resultados.

Respecto a la materialidad opaca se trabajó con los elementos de construcción y cerramiento mayormente difundidos en el contexto en estudio, según las propiedades térmicas de materiales de construcción dadas en las Normas IRAM 1601 (ver Tabla 1). Como material aislante se seleccionó poliuretano expandido proponiendo dos espesores: de 0.1m a fines de cumplir con las mayores exigencias según la Norma IRAM 11.605, y de 0.05m de acuerdo a la propuesta a nivel local de Mercado y Esteves (2004) orientada a unificar aspectos térmicos, prácticos y económicos.

En cuanto a los materiales transparentes o translúcidos se trabaja con doble vidriado hermético (DVH) utilizando la información de las características físicas de los vidrios de VASA (2008), bajo el estándar de Pilkington. En la Tabla 1 se pueden ver los materiales evaluados y sus propiedades físicas.

MATERIALES OPACOS			
	Conductividad (W/m°C)	Densidad (Kg/m ³)	Calor específico (J/Kg°C)
H°A° in situ	1.70	2200	780
Ladrillo macizo (0.25 x 0.12 x 0.05 m)	0.72	1797	919
Ladrillo hueco (0.12 x 0.18 x 0.25 m)	0.41	1200	600
Bloques de H°A°	0.50	1300	1000
Poliuretano expandido	0.021	20	1300
MATERIALES TRANSPARENTES O TRANSLÚCIDOS			
	Factor Solar	Coefficiente de Sombra	Transmitancia (W/m ² °C)
DVH 6+12+6 (int. incoloro-ext. incoloro)	0.70	0.81	2.8
DVH 6+12+6 (int. incoloro – ext. verde)	0.50	0.58	2.8
DVH 6+12+6 (int. incoloro-ext. gris reflectivo)	0.33	0.38	2.8
DVH 6+12+6 (int. baja emisividad – ext. azul)	0.35	0.4	1.8

Tabla 1. Propiedades termo-físicas de los materiales opacos y transparentes evaluados

CASOS DE ESTUDIO

Metodología de selección

Para la selección de casos se tuvieron en cuenta tres escalas espaciales: contexto urbano, edificios en altura y unidades de vivienda. En relación al contexto urbano se abarcó la zona de mayor densidad edilicia en altura, mayormente residencial, y con una densidad poblacional alta (más de 800 hab/ha). Respecto a la clasificación edilicia se determinaron las principales variables involucradas en este trabajo (altura, morfología, materialidad y orientación) explicadas a continuación:

Altura: teniendo en cuenta la importancia y protagonismo de la vegetación urbana en la ciudad de Mendoza, se consideraron edificios en altura a las edificaciones que sobrepasan el nivel máximo de la copa de los árboles, es decir, construcciones con más de cinco niveles (15 m).

Morfología: los edificios en altura en Mendoza responden a tres tipologías morfológicas según las regulaciones dadas por los Códigos de edificación (1972). El relevamiento de la zona en estudio dio un conjunto muestral de 67 edificios residenciales. Estos se clasificaron según su tipología:

- Torre sin retiros: construcciones de hasta 10 niveles de altura, desarrolladas sobre los límites del terreno (sin retiros).
- Basamento y torre: el Basamento es una construcción que puede desarrollarse hasta los límites del terreno (sin retiros) con una altura máxima de 10m. Por sobre el mismo se permite la construcción de la Torre con retiros mínimos obligatorios.
- Torre retirada de las líneas divisorias de edificación: construcciones con retiros de los límites del terreno en todo su perímetro, pudiendo alcanzar alturas máximas según relaciones estipuladas dadas por la dimensión del terreno.

Materialidad: del total de los edificios relevados se calcularon los elementos opacos y transparentes en la envolvente y las superficies de envolvente expuestas (Balter et al., 2013). A partir de estos resultados se determinan dos tipologías:

- Tipología másica: construcciones con más del 50% de materiales con densidad (ρ) por metro cúbico mayor o igual a 1200kg/m³, y un peso por metro cuadrado mayor o igual a 100kg/m².
- Tipología liviana: construcciones con más del 50% de materiales con densidad (ρ) por metro cúbico menor a 1200kg/m³, y un peso por metro cuadrado menor a 100kg/m².

Orientación: a los efectos de evaluar la condición más favorable desde el punto de vista bioclimático (en el Hemisferio Sur), se evaluaron casos cuya fachada principal se encuentre orientada al Norte. Para seleccionar las unidades de vivienda se seleccionaron departamentos frontales, es decir, orientados a la vía pública y por ende a la arboleda urbana. Asimismo, se consideró pertinente, dado el contexto urbano que lo favorece, que la acera inmediata al Norte del edificio en estudio sea una plaza asegurando la ausencia de sombras por entorno.

Casos seleccionados

Se seleccionan dos edificios de distinta materialidad -másica y liviana- de acuerdo a la clasificación realizada. Ambos se encuentran frente a dos de las plazas principales de la ciudad y frente a canales viales de 20m de ancho forestados con ejemplares arbóreos adultos de Moreras.

El edificio másico (Figura 2.a) corresponde a la tipología de Torre sin retiros de las líneas divisorias de edificación. En cuanto a la materialidad, el 73% de la superficie de envolvente expuesta corresponde a materiales opacos. Los muros exteriores son de ladrillo cerámico hueco de 0,30m con revoque y pintura sin aislación ($K= 1,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$) y las divisiones interiores son del mismo material de 0,10 m de espesor ($K= 1,97 \text{ W/m}^2\text{°C}$). Las cubiertas son de losa nervada y aislación ($K =0,24\text{W/m}^2\text{°C}$). Los vidrios son simples de 4mm ($K= 5,8\text{W/m}^2\text{°C}$, factor solar = 0,87). La resistencia térmica media de la envolvente total es de $0,49 \text{ m}^2\text{°C/W}$. Asimismo, como elementos de protección solar cuenta con balcones de 1,20m de profundidad y persianas corredizas con celosías de madera color blanco.

El caso liviano (Figura 2.b) corresponde a la tipología de Torre retirada de las líneas de edificación. Respecto a la materialidad responde a la concepción de edificio de estructura de hormigón y piel de vidrio, y si bien la estructura resulta significativa debido al carácter sísmico de la región, predomina una estética transparente. Cuenta con un 76% de materiales transparentes en su envolvente. Los muros exteriores son de hormigón armado ($K= 2.55 \text{ W/m}^2\text{°C}$) con revoque texturado con base de polímero, y en el interior las divisiones son livianas, de tabiques de cartón y yeso tipo *Durlock*, de 10 cm de espesor ($K= 5,70\text{W/m}^2\text{°C}$). Las losas son de H°A° ($K=2,40 \text{ W/m}^2\text{°C}$) y los vidrios son vidrios laminados de 6 mm (3+3) ($K= 5,7\text{W/m}^2\text{°C}$ factor solar=0,70) con láminas de polivinil butiral (PVB) de 0,38 aplicadas con calor y presión con tramos incoloros, *artic-blue* y espejados. El edificio cuenta con balcones de 1m de profundidad, y ningún tipo de elementos de protección solar vertical en la envolvente.

Las unidades de vivienda en estudio se ubican sobre la copa de los árboles y cuentan con superficies semejantes. En el caso másico se monitorea el departamento del quinto nivel (5°), con una superficie cubierta de 122m^2 . En el caso liviano la vivienda analizada corresponde al nivel dieciséis (16°), con una superficie cubierta de 98m^2 . El análisis de forma de las dos viviendas en estudio se define a partir de dos factores: Factor de Forma: FF (Olgay, 1998) y Factor de Área de Envolvente de Piso: FAEP (Esteves, 2003). Los resultados muestran que ambas cuentan con similares factores: en las viviendas másicas $FF=1$ y $FAEP=0.60$ y en las viviendas livianas $FF=1.20$ y $FAEP=0.50$, lo cual indica equivalentes grados de compacidad.



Figura 2. Fachadas de los edificios en estudio y plantas de las unidades de viviendas monitoreadas.

RESULTADOS

Mediciones térmico-energéticas en condiciones reales de uso

Se presentan las características de los habitantes y su relación con las viviendas, información obtenida durante las entrevistas realizadas: en el caso másico reside una pareja de personas adultas mayores, aún en actividad laboral, ocupando la vivienda entre 14 y 16 horas diarias. Los usuarios expresaron un

uso adecuado de los elementos flexibles de la envolvente en verano y una gran capacidad de adaptación a las temperaturas extremas estacionarias. Respecto a los sistemas de climatización, la vivienda cuenta con un ventilador de techo (consumo de 0,10 kWh) en la habitación principal como único medio mecánico de enfriamiento. Para calefacción, existen tres estufas a gas tiro balanceado – una de 4.000 kcal/h (consumo por hora de 14,63kWh) en el estar y dos de 2.500 kcal/h (consumo por hora de 12,19kWh) en los dormitorios.

En cuanto a la vivienda liviana, reside una persona de género femenino en actividad laboral, ocupando la vivienda entre 12 y 14 horas diarias. Durante la entrevista realizada en verano, el usuario expresó el uso imprescindible de enfriamiento mecánico durante prácticamente todo el día. Mientras en invierno, los días de alta heliofanía (en Mendoza el 76% de los días del año) durante el período diurno, prácticamente no existe necesidad de contar con calefacción debido a la posibilidad de acceso pleno a radiación. La vivienda presenta tres equipos de aire acondicionado, uno en cada ambiente (estar y dos habitaciones). La capacidad de refrigeración de los equipos es de 3000Frig/h (consumo por hora de 1,32 kWh) para las habitaciones y 4500 Frig/h en el estar (consumo por hora de 1,98kWh). Como sistema de calefacción el departamento cuenta con losa radiante. En ambos sistemas existe un control central individual por departamento, en el cual se introduce una temperatura determinada y a partir de ahí se enciende el sistema requerido.

Asimismo, se presentan los resultados del desempeño térmico y energético de las viviendas existentes en condiciones reales de uso (sin mejoras en la materialidad). Del periodo de días medidos simultáneamente en cada caso de estudio se seleccionan para el análisis tres días representativos para cada estación extrema: en verano del 20 al 22 de diciembre y en invierno del 26 al 28 de julio.

Las mediciones de verano (Figura 3) muestran en el caso másico temperaturas interiores constantes y semejantes en los ambientes monitoreados, entre 27,3°C y 29,5°C. El ΔT diario promedio en el estar es de 1,3°C y en la habitación de 1,2°C. El consumo energético para enfriamiento en la vivienda es de 0,13 kWh/m². Respecto al caso liviano, las temperaturas varían en cada ambiente: el estar, con temperaturas entre 26,5°C y 32°C y ΔT diario promedio de 3°C, presenta oscilaciones durante el día debido al uso de medios mecánicos de enfriamiento. Mientras que en la habitación las temperaturas son más estables, entre 26,4°C y 29,4°C y ΔT diario promedio de 1,5°C. En esta vivienda el consumo para enfriamiento es de 2,72 kWh/m². Se puede observar que ambas viviendas sobrepasan el rango de confort térmico sugerido⁴. Sin embargo, los consumos energéticos resultan 20 veces superiores en el caso liviano (2000%).

En invierno (Figura 4) en el caso másico las temperaturas se mantienen estables y dentro del rango de confort, oscilando entre mínimas absolutas de 18,7°C y 21°C. Los resultados son semejantes en el estar y la habitación, con diferencias menores a 0,30°C y un ΔT diario promedio de 1°C. El consumo para calefacción es de 4,86 kWh/m². Respecto al caso liviano las temperaturas son mayores y con ΔT diario promedio de 2°C en ambos espacios. En el estar se encuentran entre 22,3°C y 27,1°C; y en la habitación son superiores, entre 24°C y 29,4°C, a casusa de la menor superficie de envolvente expuesta del espacio. En cuanto al consumo para calefacción es de 13,79 kWh/m². Al respecto, resulta llamativo que dicho consumo sea mayor al de enfriamiento, siendo que los usuarios indicaron que prácticamente no es necesario su uso en invierno y si señalaron el uso constante de aire acondicionado en verano (inclusive en primavera y otoño). Esto se explica debido a que en verano el aire acondicionado se enciende en las horas de permanencia de los habitantes en la vivienda y luego se apaga. Mientras que en invierno, se evidencia la dificultad de una regulación fina del sistema de losa radiante: aunque sea mínima la temperatura fijada y los usuarios perciban correctamente que se lograrían temperaturas interiores de confort sin el uso de calefacción, el uso de calefacción central en este tipo de edificios es constante. Tal situación es en parte consecuencia del subsidio económico del estado sobre el gas natural, generando confusión en la población con niveles de consumos medios y altos, enmascarando la compleja situación de disponibilidad y uso desmedido del recurso (Gil, 2006).

⁴ Givoni (1991) sugiere rangos de temperatura en condiciones de aire calmo entre 20°C-27°C para el 80% de personas en confort. Para países en vías de desarrollo, el autor sugiere la flexibilización de 2°C de las temperaturas límite debido a que el habitante se encuentra adaptado a su clima. El presente trabajo adopta un rango de confort entre 18°C y 28°C teniendo en cuenta las estaciones de verano e invierno.

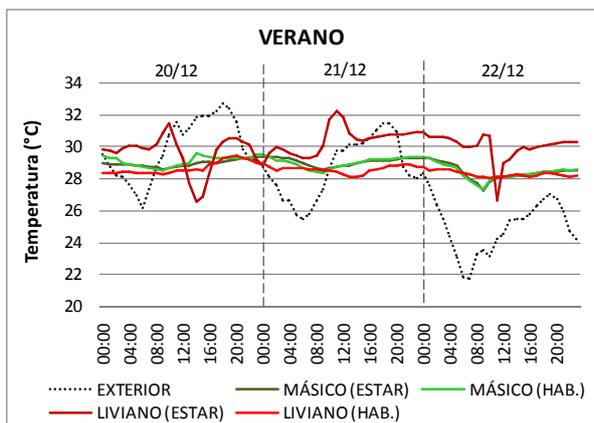


Figura 3. Comportamiento térmico de los casos existentes auditados (sin mejoras) en verano

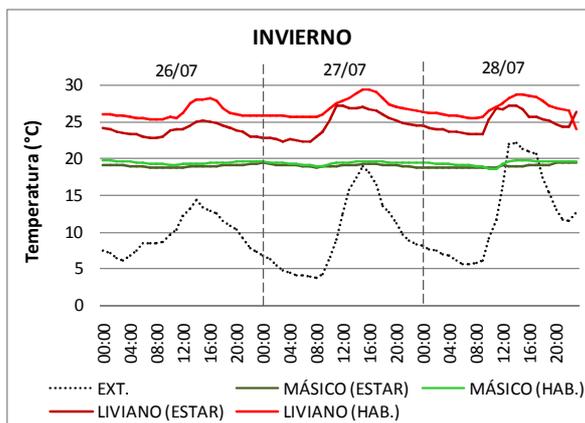


Figura 4. Comportamiento térmico de los casos existentes auditados (sin mejoras) en invierno

Variaciones en la materialidad de envolvente

Se realizan simulaciones para cada caso con las alternativas de mejoras tendientes a la conservación de energía. Se simularon cada uno de los materiales transparentes y opacos seleccionados para el análisis con aislaciones de 0.05 y 0.10cm (ver Tabla 1). Los resultados térmicos de las variaciones de materialidad en las estaciones extremas indicaron los siguientes resultados:

En el caso máscico la modificación de la materialidad opaca produce mejoras térmicas del orden de 1,50°C en verano y 3°C en invierno. Si bien los mejores resultados se obtienen con aislación de 0,10m, estos difieren muy poco respecto a la incorporación de la misma aislación de 0,05m (diferencias en el orden de 0,50°C en verano y 0,80°C en invierno). Por este motivo la materialidad opaca seleccionada para continuar con el análisis en el caso máscico es ladrillo macizo con aislación de 0,05m ($K=0,78 \text{ W/m}^2\text{°C}$). En la Figura 5 se muestra la relación entre la temperatura mínima media en invierno y la transmitancia térmica ($\text{W/m}^2 \text{°C}$) de cada materialidad evaluada. Se puede ver que a medida que disminuyen los valores de transmitancia las temperaturas interiores aumentan. Asimismo, para poder considerar otras posibilidades de aislación se presentan en la Tabla 2 las equivalencias de espesor y resistencia de los diferentes materiales utilizados en el mercado local.

En cuanto a las superficies transparentes, la incorporación de DVH produce reducciones en verano del orden de 4°C. En este caso las temperaturas más bajas se dan con DVH de color gris reflectivo. Sin embargo, la utilización en fachadas ampliamente vidriadas de vidrios reflectivos, en una ciudad de clima luminoso como es Mendoza (Pattini, 1996), pone en peligro el confort lumínico a nivel urbano por potencial riesgo de deslumbramiento. Por tal razón se selecciona el vidrio que le sigue en eficiencia, el DVH con interior de baja emisividad y exterior azul para continuar con el análisis previsto en ambos edificios. En la Figura 6 se puede ver la relación entre temperatura máxima media en verano y el factor solar de los vidrios evaluados en el caso liviano. Se observa que a medida que disminuye dicho factor las temperaturas interiores disminuyen.

MATERIALES AISLANTES		
	Espesor (m)	Resistencia ($\text{m}^2 \text{°C/W}$)
Poliuretano expandido	0.05	2.4
Poliestireno expandido	0.075	2.5
Lana mineral	0.075	2.4
Fibra de vidrio	0.1	2.5
Corcho en planchas	0.1	2.6

Tabla 2. Equivalencias de materiales aislantes

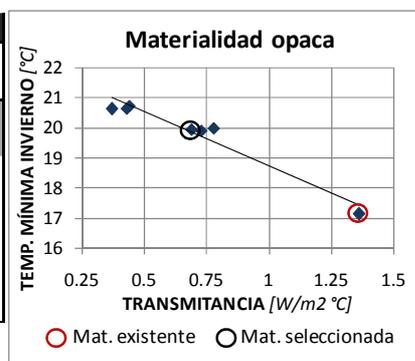


Figura 5. Relación transmitancias y temperaturas del caso máscico

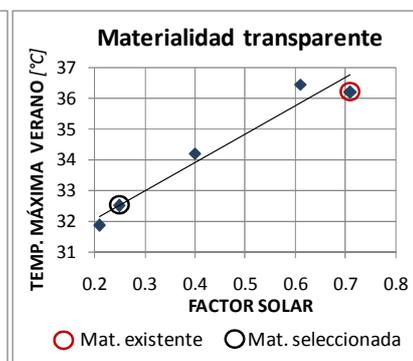


Figura 6. Relación de factor solar y temperaturas del caso liviano

Comparación del desempeño térmico y energético de espacios interiores

Se presentan los resultados de los casos simulados con la materialidad de envolvente seleccionada (mejorada), en comparación con los comportamientos de las mediciones en condiciones reales de uso (sin modificaciones). De los casos mejorados se analizan simultáneamente dos situaciones: por un lado, los resultados térmicos interiores sin aportes energéticos y sin incidencia por parte de los usuarios (se consideraron las viviendas sin ganancias internas por personas). Y por otro lado, se simularon los requerimientos de energía para climatización a partir de programar temperaturas constantes en cada vivienda: termostatos de 20°C para calefacción y de 25°C para enfriamiento. En la Tabla 3 se presenta la materialidad de envolvente opaca y transparente de los casos existentes y la materialidad seleccionada para continuar con el análisis.

	MATERIALIDAD EXISTENTE	MATERIALIDAD MODIFICADA
CASO MÁSIKO	Ladrillo cerámico hueco (0,30m) con revoque y pintura sin aislación ($K= 1,36\text{W/m}^2\text{°C}$)	Ladrillo macizo (0.30m) con aislación de poliuretano expandido 0,05m del lado exterior y revoque ($K= 0.63\text{W/m}^2\text{K}$)
	Vidrio simple 4mm ($K= 5,8\text{ W/m}^2\text{°C}$, $FS = 0,87$).	DVH 6+12+6 ($K= 1,80\text{ W/m}^2\text{°C}$, $FS=0,35$)
CASO LIVIANO	Estructura H°A°(0,40m) con revoque texturado ($K= 2.55\text{ W/m}^2\text{°C}$)	Estructura H°A° (0,40m) con revoque texturado ($K= 2.55\text{ W/m}^2\text{°C}$)
	Vidrio laminado 3+3 ($K= 5,7\text{ W/m}^2\text{°C}$, $FS=0,70$)	DVH 6+12+6 ($K= 1,80\text{ W/m}^2\text{°C}$, $FS=0,35$)

Tabla 3. Materialidad de envolvente existente y modificada para cada caso de estudio

En verano el caso másico con materialidad mejorada (líneas continuas en Figura 7) presenta disminuciones del orden de 2°C respecto a las temperaturas reales auditadas, logrando que ambos espacios se encuentren dentro del rango de confort. Respecto a los consumos para enfriamiento, el caso mejorado alcanzaría temperaturas de confort (25°C) con un consumo de 0,03 kWh/m² mensuales, es decir un 77% menos de consumos energéticos respecto al caso existente (ver Tabla 4). En la vivienda liviana (líneas continuas en Figura 8), el caso con materialidad mejorada (líneas continuas en Figura 4) logra temperaturas interiores por encima de las existentes del orden de 1°C en el estar y 1,5°C en la habitación, debido al uso de aire acondicionado en el caso medido. Sin embargo, para alcanzar temperaturas interiores de 25°C, el caso mejorado requiere 0,67kWh/m² mensuales, es decir, se logran disminuciones energéticas respecto al caso existente del orden del 75% (ver Tabla 4).

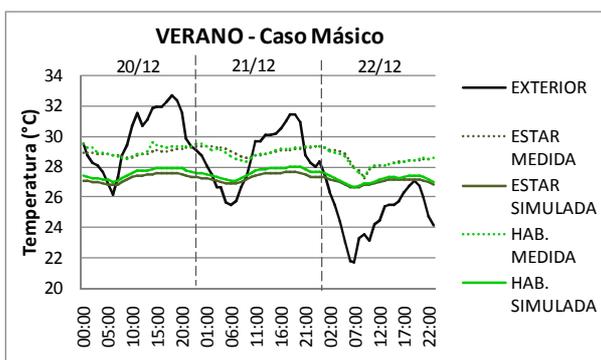


Figura 7. Caso másico: temperaturas medidas y simuladas en verano

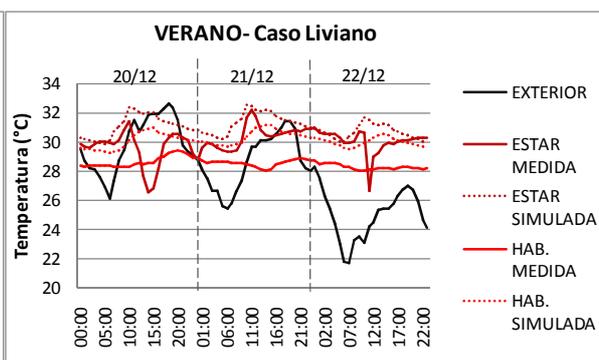


Figura 8. Caso liviano: temperaturas medidas y simuladas en verano

Respecto al invierno, el caso másico con materialidad mejorada (líneas continuas en Figura 9) muestran disminuciones térmicas en el orden de 2,50°C, debido al uso de medios de calefacción en el caso medido. Sin embargo, para alcanzar temperaturas interiores de 20°C, el caso mejorado requiere de 2,74 kWh/m² mensuales, es decir, las disminuciones energéticas resultan del 44% (ver Tabla 4). En la vivienda liviana, las temperaturas simuladas (líneas continuas en Figura 10) muestran disminuciones en el orden de 3°C debido al uso de calefacción central en el caso medido. Sin embargo, el caso mejorado, para alcanzar temperaturas interiores de 20°C, requiere 1 kWh/m²

mensuales. Es decir que las mejoras en la materialidad implican temperaturas de confort con disminuciones energéticas del 93% (ver Tabla 4).

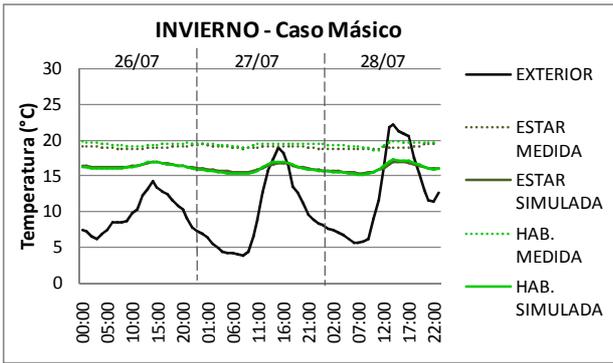


Figura 9. Caso másico: temperaturas medidas y simuladas en invierno

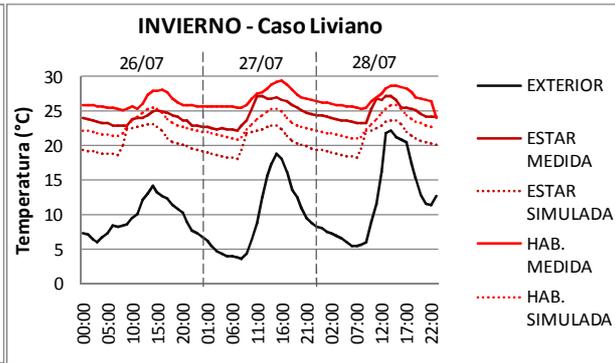


Figura 10. Caso liviano: temperaturas medidas y simuladas en invierno

Asimismo, la comparación de casos indica variaciones según la materialidad de la envolvente. En la Tabla 4 se puede ver que el consumo para calefacción en invierno es mayor en el caso másico con una diferencia respecto al caso liviano del 64%. Mientras en verano, los requerimientos energéticos para enfriamiento son mayores en el liviano, con diferencias respecto al másico del 96%.

CASOS	VERANO			INVIERNO		
	Existente (kWh/m ²)	Simulado (kWh/m ²)	Disminuciones (%)	Existente (kWh/m ²)	Simulado (kWh/m ²)	Disminuciones (%)
Másico	0.13	0.03	77	4.86	2.74	44
Liviano	2.72	0.67	75	13.79	1.00	93

Tabla 4. Consumos mensuales para climatización por metro cuadrado en los casos reales y simulados con materialidad mejorada

CONCLUSIONES

El diagnóstico de casos demuestra que las auditorías en condiciones normales de funcionamiento de las viviendas se ven afectadas no sólo por las características de la materialidad edilicia, sino también por el uso de sistemas mecánicos de acondicionamiento. Por esto, resulta fundamental usuarios consientes frente a estrategias de diseño pasivas. En este sentido se demuestra que si bien las mediciones dependen de numerosas circunstancias y variables, las mismas sirven para ajustar el método mediante simulaciones y luego evaluar alternativas en la materialidad de la envolvente.

Los casos en estudio -reales y simulados- indican que el debilitamiento de las propiedades de inercia térmica de la envolvente en ciudades con altos niveles de radiación, compromete las condiciones de confort interior. Esto promueve la necesidad de priorizar la masividad de las construcciones en altura en una ciudad con características climáticas áridas. No obstante, dado el carácter sísmico de la región, muchas veces la reducción de la masa permite disminuir el costo de la estructura. Por este motivo, a la hora de proyectar, es necesaria una relación de compromiso entre la eficiencia térmica y la eficiencia estructural de la construcción.

Asimismo, la resolución de envolventes livianas y transparentes con plena exposición solar resulta una materialidad riesgosa en relación a las fuertes condicionantes impuestas por el clima local en verano, generando implicancias energéticas asociadas al uso de recursos no renovables. La envolvente del edificio liviano (columnas de hormigón armado recubiertas en vidrio) con un 72% de superficie transparente, ofrece pocas posibilidades de amortiguamiento a las condiciones extremas exteriores en verano. Sin embargo, en invierno el alto grado de transparencia en la fachada es una tendencia beneficiosa en el interior de los espacios: durante el día se elevan las temperaturas por ganancia

directa, y durante la noche el calor absorbido por la masa de los muros de 0,40 m de espesor se propaga en parte hacia el interior.

La modificación de la envolvente mediante estrategias de conservación de energía (incorporación de materiales aislante y DVH) produce importantes disminuciones en las cargas energéticas para climatización tanto en verano como en invierno. Dichas reducciones -del 77 % y 75% en verano y del 44% y 93% en invierno para el caso másico y liviano respectivamente-, indican el carácter conservativo y compacto de las viviendas. Al haber considerado departamentos con unidades de vivienda por debajo y por sobre los mismos, se reduce ampliamente el intercambio con el exterior. Por otra parte, el menor porcentaje de mejora del caso másico en invierno (44%) se debe a una mayor adaptabilidad térmica por parte de los usuarios y en consecuencia, un menor uso de sistemas de climatización mecánica.

Finalmente, se esclarece que la falta de previsión de los factores ambientales del contexto en las etapas de diseño de los edificios en altura pone en riesgo, tanto el confort interior de las viviendas, como la eficiencia energética edilicia. Por esta razón, resulta imprescindible normalizar aspectos referidos a la materialización de la envolvente adecuados a la condición climática de la ciudad de Mendoza. A partir de estos estudios es posible generar propuestas transferibles a normativas edilicias mediante, por ejemplo, la determinación de valores de transmitancia térmica máximos. En este sentido, si la envolvente es apropiada, las posibilidades de manejo por parte de los usuarios pueden potenciar su calidad. De este modo los consumos, que serán inevitables, se pueden reducir al mínimo.

REFERENCIAS

- Ballarini, I., Corrado, V. (2009) Application of energy rating methods to the existing building stock: Analysis of some residential buildings in Turin, *Energy and Buildings* 41. 790–800
- Balter, J., Ganem, C., Cantón, M.A. (2013) Evolución morfológica y materialización en edificios en altura en la ciudad de Mendoza. Incidencias en el comportamiento térmico interior, *Revista ÁREA* 19. 9-25.
- Bórmida, E. (1984). Mendoza, una ciudad Oasis. Mendoza: Universidad de Mendoza.
- Cantón, M.A., Mesa, A., Cortegoso J.L., y De Rosa, C. (2003). Assessing the solar resource in forested urban environments. *Architectural Science Review* 24.
- Department of Energy (2009). Building Energy software Tools. Estados Unidos. Recuperado de: http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/
- Esteves, A., Gelardi, D. (2003) Docencia en Arquitectura Sustentable: Programa de Optimización de Proyectos de Arquitectura basado en el balance térmico. *Avances en Energías Renovables y Medioambiente* 7. 10.31-10.34.
- Flores Larsen, S., Filippín, C., Lesino, G. (2010). La incidencia de los usuarios en el comportamiento térmico de verano de una vivienda en el Noroeste Argentino. IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES_CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar (XVII- SPES), Cusco, 1 -5.11.
- Flores Larsen, S., Lesino, G., Saravia, L., y Alía de Saravia, D. (2005). SIMEDIF para Windows. Salta: INENCO – unas, 1984. Versión 2005.
- Grossi Gallegos, H., Nollman, U., Lopardo, R., Atienza, G. (1983) Evaluación preliminar del recurso solar en Argentina. 8° Actas de ASADES. 179-194.
- Gil, S. (2006) Gas Natural en la Argentina: presente y futuro. *Revista Ciencia Hoy*. 26-36.
- Juodis, E., Jaraminiene, E., Dudkiewicz, E. (2009) Inherent variability of heat consumption in residential buildings, *Energy and Buildings* 41.1188–1194.
- Kolher, N., Hassler, U. (2002). The Building Stock as a Research Object. *Building, Research & Information* 30, N°4. United Kingdom: Spon Press – Taylor & Francis Group.
- Konstantinou, T., Knaack, U. (2013). An approach to integrate energy efficiency upgrade into refurbishment design process, applied in two case-study buildings in Northern European climate, *Energy and Buildings* 59. 301–309
- Liu, L., Moshfegh, B., Akander, J., Cehlin, M. (2014). Comprehensive investigation on energy retrofits in eleven multi-family buildings in Sweden, *Energy and Buildings* 84. 704–715
- Liu, L., Rohdin, P., Moshfegh, B. (2015). Evaluating indoor environment of a retrofitted multi-family building with improved P energy performance in Sweden, *Energy and Buildings* 102.32–44

- Longobardi y Hancock (2000). Field Trip Strategies. Proceedings of TIA. Oxford.
- Mercado, M. V., Esteves, A. Arquitectura Sustentable: estudio térmico y técnico económico de la incorporación de aislación térmica. Energías Renovables y Medio Ambiente, Salta, v. 15, p. 45-52, 2004
- Municipalidad de Mendoza (1972). Código de edificación de la ciudad de Mendoza. Mendoza, Argentina: Municipalidad de la Capital.
- Norma IRAM 11601 (1996). Acondicionamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario.
- Norma IRAM 11605 (1996). Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos admisibles de transmitancia térmica en cerramientos opacos.
- Oke, T.R. (2004). Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites. Iom Report, Td In Press. World Meteorological Organization, Geneva.
- Olgay, V. (1998). Arquitectura y Clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas. Barcelona: Editorial Gustavo Gili.
- Palme, M., Isalgué, A., Coch, H. (2013). Avoiding the Possible Impact of Climate Change on the Built Environment: The Importance of the Building's Energy Robustness, Buildings 3.191–204.
- Peng, X. (2010). Demand Shifting with Thermal Mass in Light and Heavy Mass Commercial Buildings. Lawrence Berkeley National Laboratory. <http://escholarship.org/uc/item/9t700887>
- University of Illinois (2013). University of California, Energy Plus, Getting started.
- Vidriería Argentina S.A. - VASA (2008). www.vasa.com.ar Buenos Aires, Argentina.

ABSTRACT

This paper evaluates thermal and energy performance in high-rise residential buildings with different envelope materiality: massive and light. We identify and monitor simultaneously two apartments in use for each materiality. They are located above the tree canopy of an Oasis-City (over 12m high), that is, they have full exposure to solar radiation. The validation of dynamic models and simulation allows us testing materiality proposals aimed at energy conservation, potential to be transferred to future regulations appropriate to the context under study. The diagnosis of audited cases in real use is compared to the behavior of the apartments with improved materiality. Reductions are achieved in energy consumption 77% in summer and 44% in winter in mass buildings; and 75% in summer and 93% in winter in light buildings. It is concluded on the importance of masses on the envelope and on the need for conscious users from passive design strategies.

Keywords: high-rise residential building, envelope, thermal evaluation, energy consumption.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONICET (Consejo Nacional de Investigación Científica y Tecnológica) y a los propietarios de los departamentos evaluados, por permitir ser entrevistados y la instalación de equipos de monitoreo.