

CORRELACIÓN ENTRE EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE MUROS Y LAS CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DEL SITIO DE CONSTRUCCIÓN

Beatriz M. Marino, Natalia Muñoz, Luis P. Thomas

Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro Provincia de Buenos Aires (CIFICEN)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Universidad Nacional del Centro de la
Provincia de Buenos Aires – Pinto 399, 7000 Tandil

E mail: lthomas@exa.unicen.edu.ar

RESUMEN: El objetivo del presente estudio es establecer las correlaciones entre el flujo de calor total intercambiado a través de componentes opacas de la envolvente edilicia bajo los regímenes estacionario y variable y las características climáticas locales. Para ello, el comportamiento térmico de cinco tipos de muros fue evaluado a partir del desarrollo en serie de Fourier de la temperatura sol–aire en enero y junio cuando la demanda energética para calefacción y refrigeración es mayor, en diez ciudades de referencia localizadas en diferentes regiones de Argentina. Así es posible determinar donde importa considerar las características térmicas estacionarias y/o dinámicas de los muros. El procedimiento se extendió a todo el territorio argentino usando los datos meteorológicos disponibles mediante el análisis multivariante. Los factores clave son la utilización de la temperatura sol–aire que da cuenta de los efectos de la irradiancia solar sobre los muros, las relaciones entre su valor medio y el de la amplitud de sus variaciones diarias con los flujos entrantes de calor constante y variable respectivamente, y la estimación de tales valores medios con un número reducido de variables meteorológicas. Los resultados resultaron satisfactorios y concordantes con los obtenidos aplicando las normas técnicas que usan otras metodologías.

Palabras clave: Envolvente. Comportamiento térmico. Flujo de calor. Análisis multivariante. Clima.

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad del recurso solar según la posición geográfica y las condiciones climáticas del lugar de emplazamiento del edificio son importantes al momento de evaluar el intercambio de calor transferido por conducción a través de la envolvente, ya que este intercambio depende de todas las variables meteorológicas locales y no sólo del valor medio de la temperatura exterior del aire como usualmente se considera. Además, es de esperar que esos factores influyan en forma diferente sobre el flujo de calor en los regímenes estacionario y dinámico. El flujo de calor que ingresa en una edificación depende del tipo de muro y se caracteriza por el coeficiente de transferencia global del calor U y por los parámetros de respuesta dinámicos que dan cuenta de las propiedades térmicas de la envolvente frente a las variaciones de la temperatura externa del aire. Expresiones simplificadas, como las proporcionadas por la norma IRAM 11900 (2017), permiten determinar los efectos de la radiación solar y las características térmicas dinámicas de los materiales sobre intercambio de calor global a través de la envolvente. En particular, la influencia de la inercia térmica sobre el comportamiento energético de edificios es uno de los tópicos más estudiados, aunque la bibliografía da cuenta, en base a simulaciones numéricas, de un potencial ahorro de energía de hasta casi el 80% (Goia et al., 2015). Existen muchos estudios en lo que se relacionan los requerimientos edilicios de calefacción en invierno, enfriamiento en verano y la inercia térmica edilicia (Aste et al. 2009; Di Perna et al., 2011; Rossi y Rocco, 2014; Verbeke y Audenaert, 2018; Goia et al., 2015). También se cuenta

con diversos criterios de diseño y construcción de edificios que consideran las diferentes condiciones climáticas para aprovechar las características térmicas, estacionarias y dinámicas, de la parte opaca de la envolvente y minimizar el consumo energético.

El requerimiento energético de un edificio depende de la zona de emplazamiento. Para cada zona, la Norma IRAM 11603 (2012) indica las pautas generales del diseño, las orientaciones favorables de las paredes y el asoleamiento mínimo para el acondicionamiento térmico edilicio. La definición de las zonas bio-ambientales de Argentina considera, para verano, los índices de confort de la *Temperatura Efectiva Corregida*, correlacionada con el *Voto Medio Estimado* (ASHRAE 55, 2017) y el índice de estrés térmico de Beldin y Hatch (1955) desarrollados para las zonas cálidas. Para invierno, la evaluación se realiza con los grados-días según las necesidades de calefacción. Los indicadores usados para demarcar las zonas bio-ambientales son, fundamentalmente, la latitud geográfica y la altitud sobre el nivel del mar. Con respecto al flujo de calor a través de la parte opaca de la envolvente, la norma IRAM 11601 (2002) establece el método de cálculo en el régimen estacionario y los valores típicos de las propiedades físicas de los materiales de construcción. Si bien estas normas y otras relacionadas constituyen valiosas herramientas para los diseñadores y constructores, el calentamiento por asoleamiento y la inercia térmica de la mampostería debidos a las variaciones diarias de la temperatura externa del aire y la radiación solar no están incorporados en los cálculos.

El objetivo del presente estudio fue relacionar los flujos de calor estacionario y dinámico con las características del clima local para evaluar las pérdidas y ganancias de calor de una construcción erigida en cualquier lugar del país usando la temperatura equivalente sol-aire y el análisis multivariante. La aplicación del desarrollo metodológico propuesto, ya en la etapa del diseño de un edificio, permite optimizar el empleo de los materiales de construcción y prever su disposición en las envolventes opacas atendiendo a las condiciones climáticas del lugar de emplazamiento, y cuantificar anticipadamente sus requerimientos energéticos.

METODOLOGÍA

El diagrama de la Figura 1(i) resume el estudio previo de Muñoz et al. (2020) para el que se eligieron diez ciudades distribuidas en la extensa geografía argentina, cubriendo una variación de unos 32° en latitud, 13° en longitud y 2800 m en altitud, y representando diferentes características climáticas. Ellas son Tartagal, La Quiaca, Pilar, Mendoza, Ezeiza, Tandil, Neuquén, Bariloche, Comodoro Rivadavia y Ushuaia. A partir de la evolución diaria de la temperatura externa T_e y de la irradiancia solar medida I_{meas} recibida por un tipo de muro vertical orientado al norte y al sur, se estableció el valor medio de la temperatura sol-aire, $\overline{T_{sa}}$, y la amplitud media de sus variaciones diarias, $\overline{A_{Tsa}}$, en enero y junio. Además, encontraron las relaciones entre $\overline{T_{sa}}$ y $\overline{A_{Tsa}}$ y los flujos de calor estacionario q_{ss} y dinámico q_{vi} que atraviesan la cara interna de la envolvente respectivamente. Se adoptó el valor de la absorptividad de la radiación solar de un muro de color claro, i.e. $\alpha = 0.65$ (ASHRAE, 2011), cercano al valor establecido por la norma IRAM 11605 ($\alpha = 0.7$). Para paredes de color oscuro ($\alpha > 0.65$), se espera una mayor diferencia entre T_{sa} y T_e lo cual genera un incremento del flujo de calor medio y una mayor amplitud del flujo de calor variable con respecto a los valores reportados aquí. Por el contrario, la diferencia entre T_{sa} y T_e podría ser muy escasa para paredes de colores muy claros. La elección del valor de α merece un estudio por separado y no se trata aquí.

La Tabla 1 presenta las características constructivas de los cinco muros evaluados en este trabajo. La Tabla 2 contiene los elementos matriciales obtenidos aplicando el método de la admitancia, relacionados con las características dinámicas de los muros. Con los valores proporcionados por ambas tablas se calcularon los flujos de calor q_{ss} y q_{vi} a partir de $\overline{T_{sa}}$ y $\overline{A_{Tsa}}$, respectivamente, para las diez ciudades de referencia. Luego, con los valores medios mensuales de la velocidad del viento \overline{V} , la

humedad relativa \overline{HR} , la amplitud térmica $\overline{A_T}$, la temperatura externa del aire $\overline{T_e}$ y la irradiancia solar $\overline{I_{meas}}$, obtenidos de los registros meteorológicos de cada una de las diez ciudades, junto con los valores de $\overline{T_{sa}}$ y $\overline{A_{Tsa}}$ ya calculados, se aplicaron los pasos mostrados en el diagrama de flujo de la Figura 1(ii) y que se describen a continuación.

	e m	λ W/m°C	ρ kg/m ³	C_p J/kg°C	R m ² °C/W		e m	λ W/m°C	ρ kg/m ³	C_p J/kg°C	R m ² °C/W
Muro 1 (m₁)						Muro 2 (m₂)					
Ladrillo Visto	0.12	0.81	1600	1000	0.148	Rev. Fino	0.005	0.70	1400	1012	0.007
EPS	0.035	0.037	17	1700	0.946	Rev. Grueso	0.020	0.93	1400	1050	0.022
Ladrillo Hueco	0.12	0.3	800	920	0.400	Ladrillo Hueco	0.180	0.30	800	920	0.600
Rev. Grueso	0.02	0.93	1400	1050	0.022	Rev. Grueso	0.020	0.93	1400	1050	0.022
Rev. Fino	0.005	0.7	1400	1012	0.007	Rev. Fino	0.005	0.70	1400	1012	0.007
Total	0.300				1.523	Total	0.230				0.658
Muro 3 (m₃)						Muro 4 (m₄)					
Rev. Fino	0.005	0.70	1400	1012	0.007	Rev. Fino	0.005	0.70	1400	1012	0.007
Rev. Grueso	0.020	0.93	1400	1050	0.022	Rev. Grueso	0.020	0.93	1400	1050	0.022
Ladrillo Macizo	0.250	0.81	1600	1000	0.309	Ladrillo Hormigón	0.190	0.86	1750	880	0.220
Rev. Grueso	0.020	0.93	1400	1050	0.022	Rev. Grueso	0.020	0.93	1400	1050	0.022
Rev. Fino	0.005	0.70	1400	1012	0.007	Rev. Fino	0.005	0.70	1400	1012	0.007
Total	0.300				0.367	Total	0.240				0.278
Muro 5 (m₅)											
Rev. Fino	0.005	0.700	1400	1012	0.007						
Rev. Grueso	0.020	0.930	1400	1050	0.022						
Ladrillo Hueco	0.120	0.300	800	920	0.400						
EPS	0.035	0.037	17	1700	0.946						
Ladrillo Macizo	0.120	0.810	1600	1000	0.148						
Rev. Grueso	0.020	0.930	1400	1050	0.022						
Rev. Fino	0.005	0.700	1400	1012	0.007						
Total	0.325				1.552						

Tabla 1. Características térmicas de los materiales de las capas que componen los muros analizados.

	$P_1 = 24 \text{ h} = 2\pi/\omega_1$			$P_2 = 12 \text{ h} = 2\pi/\omega_2$		
	a_{11}	a_{12}, a_{21}	a_{22}	b_{11}	b_{12}, b_{21}	b_{22}
m_1	3.449+2.173i	-0.165-0.080i	6.193+5.392i	4.461+2.0220i	-0.036+0.039i	8.870+5.041i
m_2	3.069+2.110i	-0.109-0.701i	3.311+3.765i	4.277+2.178i	-0.326-0.118i	5.277+5.213i
m_3	4.372+1.566i	-0.417-0.399i	6.278+3.991i	5.082+1.430i	-0.194+0.082i	8.271+4.602i
m_4	4.364+1.602i	-0.228-1.021i	6.365+4.082i	5.102+1.418i	-0.440-0.201i	8.333+4.561i
m_5	4.620+1.776i	-0.06+0.023i	3.474+3.760i	5.188+1.381i	0.003+0.0152i	5.275+5.168i

Tabla 2. Valores de los elementos de las matrices de transmisión de calor involucrados en el cálculo del flujo de calor a través de los muros analizados.

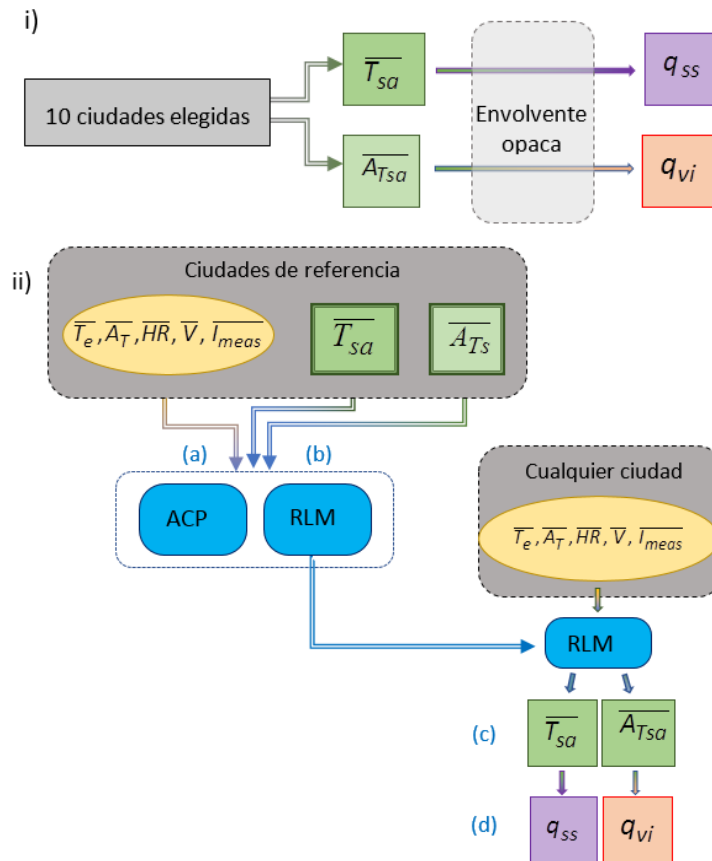


Figura 1. (i) Esquema del estudio de Muñoz et al. (2020). (ii) Diagrama de flujo de la metodología presentada en este trabajo.

a) Análisis de Componentes Principales (ACP)

El ACP se aplicó con la matriz de correlaciones (Lam et al., 2010; Gaitani et al. 2010; Pommer et al., 2004) para encontrar el grado de correlación estadística entre las variables de interés (\overline{T}_{sa} , \overline{A}_{Tsa}) y las variables meteorológicas elegidas (\overline{T}_e , \overline{A}_T , \overline{HR} , \overline{I}_{meas} , \overline{V}) para cada una de las diez ciudades. Así, se determinaron las componentes principales (CP) y sus respectivos autovalores que dan cuenta de la importancia de las correspondientes correlaciones reveladas por las CP, cuando cualquiera de los muros se orienta al N y S, en enero y junio. El análisis de los resultados del ACP permitió establecer si \overline{T}_{sa} y \overline{A}_{Tsa} son realmente variables independientes entre sí, y si pueden ser razonablemente descriptas por las variables meteorológicas elegidas que conforman el conjunto de datos disponible.

b) Regresión lineal múltiple (RLM)

Una vez asegurada la calidad de los datos y de las variables elegidas usando el ACP, se aplicó el modelo RLM para encontrar las relaciones cuantitativas entre \overline{T}_{sa} , \overline{A}_{Tsa} , y las variables meteorológicas y la

irradiancia solar locales. De este modo, $\overline{T_{sa}}$ y $\overline{A_{Tsa}}$ se consideraron funciones lineales de las variables independientes $\overline{T_e}$, $\overline{I_{meas}}$, \overline{HR} , \overline{V} y $\overline{A_T}$. Las variables se adimensionalizaron y centraron en cada valor medio siguiendo la forma tradicional (Mendenhall y Sincich, 2016). Por ejemplo, el valor medio adimensionalizado de la temperatura exterior es

$$\overline{T_e}|_{ad} = \frac{\overline{T_e} - \langle \overline{T_e} \rangle}{\sigma_{\overline{T_e}}} \quad (1)$$

donde $\langle \overline{T_e} \rangle$ y $\sigma_{\overline{T_e}}$ son el valor medio y la desviación estándar obtenidos al promediar las temperaturas medias mensuales de todas las localidades. El resto de las variables se adimensionalizaron en forma similar, obteniéndose $\overline{I_{meas}}|_{ad}$, $\overline{HR}|_{ad}$, $\overline{V}|_{ad}$, $\overline{A_T}|_{ad}$ y también las variables dependientes:

$$\overline{T_{sa}}|_{ad} = \frac{\overline{T_{sa}} - \langle \overline{T_{sa}} \rangle}{\sigma_{\overline{T_{sa}}}} \quad (2)$$

$$\overline{A_{Tsa}}|_{ad} = \frac{\overline{A_{Tsa}} - \langle \overline{A_{Tsa}} \rangle}{\sigma_{\overline{A_{Tsa}}}} \quad (3)$$

Luego, el modelo RLM permitió obtener las siguientes relaciones que mejor ajustan los datos:

$$\overline{T_{sa}}|_{ad} = c_1 + c_2 \overline{T_e}|_{ad} + c_3 \overline{A_T}|_{ad} + c_4 \overline{HR}|_{ad} + c_5 \overline{I_{meas}}|_{ad} + c_6 \overline{V}|_{ad} \quad (4)$$

$$\overline{A_{Tsa}}|_{ad} = d_1 + d_2 \overline{T_e}|_{ad} + d_3 \overline{A_T}|_{ad} + d_4 \overline{HR}|_{ad} + d_5 \overline{I_{meas}}|_{ad} + d_6 \overline{V}|_{ad} \quad (5)$$

Así, se determinaron c_i y d_i , $i = 1, \dots, 6$ que minimizan la suma de la diferencia cuadrática media entre el resultado de las Ecs. (4–5) y el valor de la variable dependiente suministrado como dato para iguales variables independientes.

c) Cálculo de $\overline{T_{sa}}$ y $\overline{A_{Tsa}}$ en cualquier otra ciudad del país

Con el modelo RLM pudieron predecirse los valores que adoptan las variables dependientes $\overline{T_{sa}}$ y $\overline{A_{Tsa}}$ para los valores de interés de las variables independientes. El primer paso consistió en adimensionalizar los datos meteorológicos y la irradiancia solar de cualquier otra ciudad del país en la misma forma que indica la Ec. (1). Las Ecs. (4) y (5) con los coeficientes c_i y d_i obtenidos en el paso (b) permitieron estimar $\overline{T_{sa}}|_{ad}$ y $\overline{A_{Tsa}}|_{ad}$ de las nuevas ciudades de interés. Luego, usando los valores medios y las desviaciones estándares correspondientes incluidos en las Ecs. (2) y (3), se obtuvieron:

$$\overline{T_{sa}} = \sigma_{\overline{T_{sa}}} \overline{T_{sa}}|_{ad} + \langle \overline{T_{sa}} \rangle \quad (6)$$

$$\overline{A_{Tsa}} = \sigma_{\overline{A_{Tsa}}} \overline{A_{Tsa}}|_{ad} + \langle \overline{A_{Tsa}} \rangle \quad (7)$$

d) Cálculo de los flujos de calor

Finalmente, se calcularon los flujos de calor estacionario q_{ss} con $\overline{T_{sa}}$ por una parte, y variable q_{vi} con $\overline{A_{Tsa}}$ por otra, que atraviesan la cara interna de los muros evaluados y en cualquier sitio del país.

RESULTADOS

El porcentaje de la variancia explicada para las dos primeras CP para cada mes y orientación de los muros evaluados alcanza un valor próximo o mayor al 80%, indicando que estas dos CP ofrecen las principales correlaciones entre las variables. La Figura 2 muestra los gráficos *Biplot* con los resultados del ACP en función de las dos primeras componentes principales CP1 y CP2 correspondientes a mes de enero. Las ciudades son representadas con puntos de acuerdo con sus características climáticas por

medio de dichas componentes, mientras que las variables originales ($\overline{T_{sa}}$, $\overline{A_{Tsa}}$, $\overline{T_e}$, $\overline{A_T}$, \overline{HR} , $\overline{I_{meas}}$ y \overline{V}) se representan por líneas que surgen del origen de coordenadas. Los puntos se distribuyen en los cuatro cuadrantes corroborando la gran variabilidad de las características climáticas representativas de las diez ciudades, las que son descritas razonablemente bien por las siete variables meteorológicas elegidas. Los puntos que representan a las ciudades solo cambian ligeramente con la orientación del muro. Los puntos más alejados del origen corresponden a Ushuaia, Tartagal y Bariloche debido a sus características meteorológicas extremas. Similares resultados se encuentran para junio, correspondiendo los puntos más alejados a Ushuaia, Tartagal y La Quiaca.

Por otra parte, la cercanía entre vectores sugiere una mayor correlación entre las correspondientes variables. En general, $\overline{T_{sa}}$ y $\overline{A_{Tsa}}$ presentan direcciones diferentes indicando que los valores medios y las amplitudes de las variaciones diarias de T_{sa} son variables independientes y deben analizarse por separado. El vector de $\overline{T_{sa}}$ se ubica cerca de los vectores de $\overline{T_e}$ y $\overline{I_{meas}}$ mientras que el de $\overline{A_{Tsa}}$ se sitúa más próximo a $\overline{A_T}$ y $\overline{I_{meas}}$ excepto para muros orientados al sur. Los vectores de \overline{HR} y \overline{V} tienen otras direcciones.

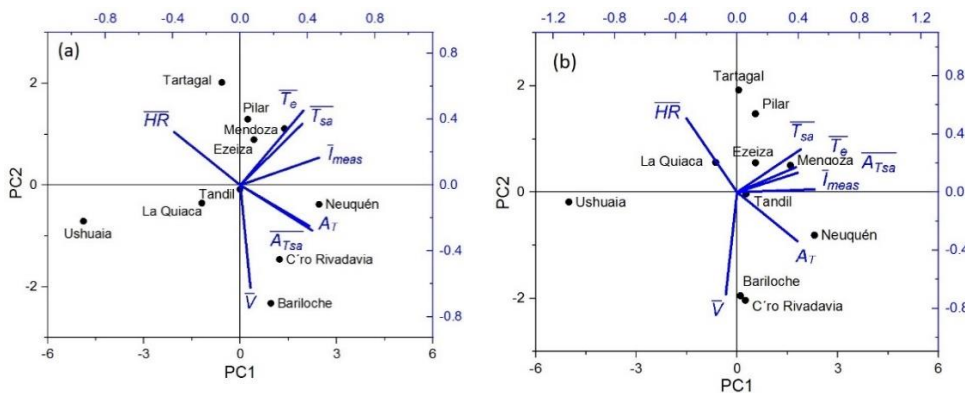


Figura 2. Resultados del ACP para $\overline{T_{sa}}$ correspondientes a muros orientados al norte (a) y al sur (b) para enero.

Los resultados de la RLM se presentan en la Tabla 3. Los coeficientes de determinación corregidos $Adj.R^2 \geq 0.8$ para $\overline{T_{sa}}|_{ad}$ y $\overline{A_{Tsa}}|_{ad}$ en junio, lo que significa que los resultados del ajuste son razonables. Por otro lado, $Adj.R^2 \geq 0.65$ para $\overline{A_{Tsa}}|_{ad}$ en enero. Los valores de c_1 y d_1 son tan bajos que podría considerarse $\overline{T_{sa}}|_{ad} = \overline{A_T}|_{ad} = 0$ cuando las variables independientes son nulas. Los dos coeficientes con mayor valor absoluto, resaltados en rojo, corresponden a las variables independientes asociadas que más contribuyen en el cálculo de $\overline{T_{sa}}|_{ad}$ y $\overline{A_T}|_{ad}$. En consecuencia, resulta que $\overline{T_{sa}}|_{ad}$ se correlaciona más con $\overline{T_e}|_{ad}$ y $\overline{I_{meas}}|_{ad}$ que con el resto de las variables, y que $\overline{A_{Tsa}}|_{ad}$ se correlaciona en mayor medida con $\overline{A_T}|_{ad}$ y $\overline{I_{meas}}|_{ad}$. A pesar que estas relaciones son dominantes, las otras variables también son significativas aunque su importancia depende de la orientación del muro y de la estación del año. Por otro lado, la importancia relativa de HR y V son menores en ambas regresiones. Lo mismo ocurre con las correlaciones de otras variables meteorológicas como la nubosidad, la precipitación, el tiempo de permanencia de la luz solar, etc. (los resultados obtenidos incluyendo estas variables se omiten por brevedad).

Con el valor de $\overline{T_{sa}}$ se determinó la magnitud de q_{ss} . La Figura 3 muestra q_{ss} para cada uno de los muros evaluados. La pendiente de cada recta corresponde al valor de U de cada muro; la menor pendiente (i.e., menor valor de U) corresponde al muro con aislación interna (m_1 , y m_5) mientras la mayor pendiente corresponde al muro m_4 construido con bloques de hormigón que presentan alta conductividad térmica. Los puntos se ubican sobre las rectas de acuerdo al valor de $\overline{T_{sa}}$

correspondiente a cada una de las ciudades de referencia, siendo $q_{ss} > 0$ (el interior gana calor) en verano para todas las localidades excepto para Ushuaia (la ciudad más austral) y La Quiaca (que tiene la mayor altitud). Además, una escasa diferencia entre q_{ss} para los muros orientados al sur y al norte es observada para todas las ciudades. La Figura 3b muestra que las construcciones pierden calor a través de los muros durante junio independientemente de la ciudad. Sin embargo, el orden de los puntos que identifican las localidades sobre las rectas cambia. Los mayores cambios corresponden a Mendoza y Bariloche, siendo máximo para esta última donde los muros presentan pérdidas de calor casi como en Ushuaia. Los muros de edificaciones en Tandil, Neuquén y Comodoro Rivadavia muestran pérdidas a través de los muros algo menores que los casos extremos de Bariloche y Ushuaia.

$\overline{T_{sa}} _{ad}$							
Variable		$\overline{T_e} _{ad}$	$\overline{A_T} _{ad}$	$\overline{HR} _{ad}$	$\overline{l_{meas}} _{ad}$	$\overline{V} _{ad}$	
Coefficiente	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	Adj. R^2
Enero – N	-2.54×10^{-3}	0.804	0.098	0.081	0.154	-0.171	0.818
Junio – N	-7.86×10^{-7}	0.478	-0.738	-0.045	1.162	-0.139	0.916
Enero – S	-5.01×10^{-7}	0.761	0.043	0.092	0.217	-0.211	0.823
Junio – S	1.04×10^{-6}	0.773	-0.045	0.187	0.437	-0.060	0.849
$\sum_j (c_j)^2$		2.050	0.558	0.052	1.613	0.097	
$\overline{A_{Tsa}} _{ad}$							
Coefficiente	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	Adj. R^2
Enero – N	5.99×10^{-3}	-0.374	-0.047	-0.150	1.035	0.405	0.659
Junio – N	2.08×10^{-7}	-0.412	-0.849	-0.154	1.715	0.046	0.863
Enero – S	8.83×10^{-7}	-0.463	0.112	0.060	1.013	-0.308	0.667
Junio – S	6.41×10^{-7}	0.100	1.186	0.471	0.306	0.225	0.947
$\sum_j (d_j)^2$		0.534	2.142	0.272	5.132	0.311	

Tabla 3. Coeficientes resultantes de la RLM para $\overline{T_{sa}}|_{ad}$ y $\overline{A_{Tsa}}|_{ad}$

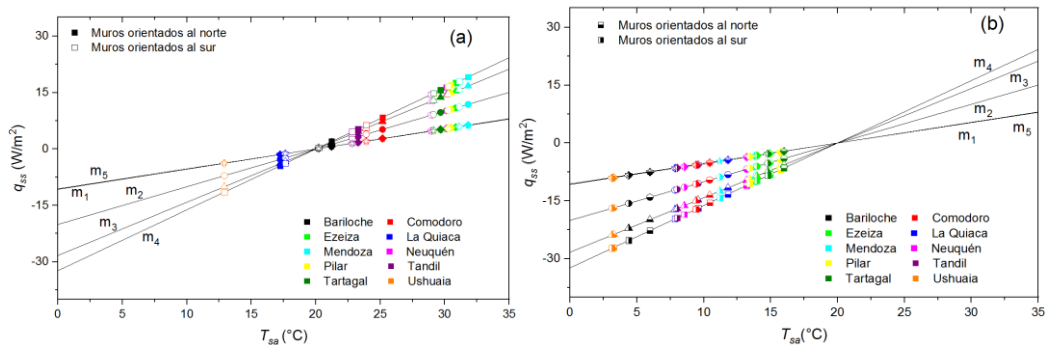


Figura 3. Flujo de calor en el régimen estacionario para los muros m_1 (rombos), m_2 círculos), m_3 triángulos, m_4 (cuadrados) y m_5 (estrellas) orientados al norte y al sur en (a) verano e (b) invierno.

El flujo de calor variable q_{vi} que llega al interior atravesando la envolvente se calculó a partir del desarrollo en serie de Fourier de $T_{sa}(t)$ siguiendo a Muñoz et al. (2020). La parte variable de este desarrollo (T_{ve} – línea roja en Figura 4a) tiene una primera contribución de frecuencia angular ω_1 (período 24 h) y otra de frecuencia angular ω_2 (período 12 h) con sus correspondientes tiempos de retraso $\tau_{Te,\omega1}$ y $\tau_{Te,\omega2}$ con respecto al comienzo del día (i.e., 00:00 h). A partir de las respectivas amplitudes de estas contribuciones se calcularon las correspondientes amplitudes $q_{vi,\omega1}$, $q_{vi,\omega2}$ y los desfases $\tau_{qi,\omega1}$ y $\tau_{qi,\omega2}$. La suma de estas contribuciones da el flujo de calor variable total q_{vi} .

El resultado de este procedimiento para todos los muros evaluados en La Quiaca se muestra en las Figuras 4b. Las dos contribuciones periódicas de T_{SQ} generan contribuciones a q_{vi} con diferentes amplitudes y retrasos temporales de acuerdo a las propiedades dinámicas de los muros. El menor flujo de calor es el que se registra a través de m_5 (Figura 4b₅); ambas contribuciones a este flujo son atenuadas fuertemente, pero la segunda contribución lo es mucho más por lo que el flujo resultante es determinado prácticamente por la primera. Notar también que, en m_5 , el máximo de T_{SQ} (que se verifica a la hora 13:30) determina un flujo máximo de calor en el interior a la hora 4:30, es decir que el flujo de calor experimenta un retraso de unas 15 horas respecto a la evolución de T_{SQ} . El muro m_1 , que se compone de las mismas capas que m_5 pero con orden invertido, transmite un q_{vi} tres veces mayor que el transmitido a través de m_5 con un retraso de unas 12 horas con respecto a T_{SQ} . Los muros m_2 y m_4 transmiten un q_{vi} (cuyo máximo ocurre a la hora 21:00) mucho mayor que los correspondientes a m_1 y m_5 presentando un retraso de sólo unas 8 horas con respecto a $T_{SQ}(t)$. El muro m_3 , que presenta valores de amplitud y fase intermedios a los mencionados, transmite un flujo máximo menor a los máximos transmitidos a través de m_2 y m_4 con un retraso de 10 horas, pero 4 veces mayor que el máximo transmitido a través de m_1 y 12 veces mayor que el máximo flujo que atraviesa m_5 .

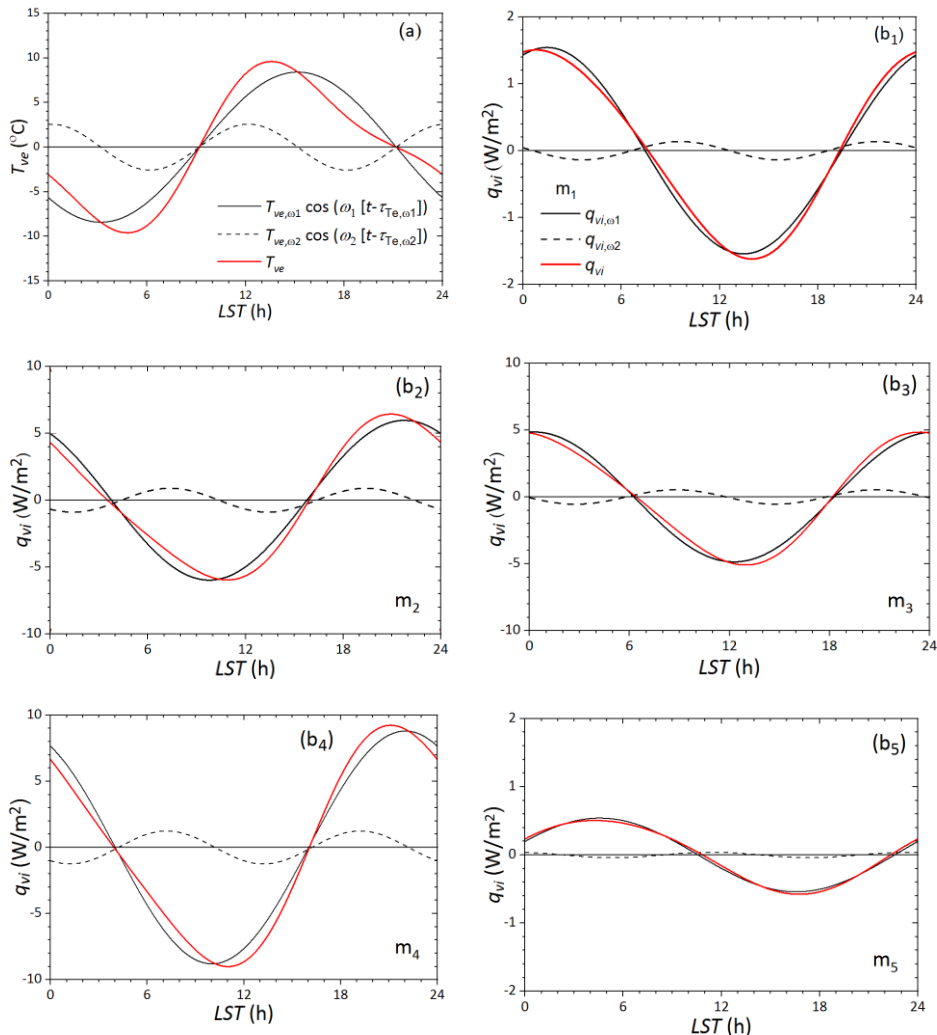


Figura 4. (a) Evolución de la primera y segunda contribuciones (líneas negras continua y discontinua, respectivamente) de la parte variable de T_{SQ} , T_{ve} , para muros orientados al norte en La Quiaca correspondiente a enero. (b) Evolución del flujo de calor variable resultante q_{vi} que atraviesa la cara interna de los muros $m_1 - m_5$. Notar que los gráficos (b₁) y (b₅) tienen diferentes escalas verticales.

La evolución de T_{SQ} es específica para cada ciudad de referencia mientras que q_{Vi} resultante depende del tipo de muro como ilustra la Figura 5. Luego, la fase de q_{Vi} , determinada fundamentalmente por el retraso que sufre la primera contribución periódica, es la misma para un cierto tipo de muro independientemente del sitio geográfico de construcción. Por otra parte, la forma de la onda de q_{Vi} cambia sólo ligeramente debido a la particular combinación de las primera y segunda contribuciones periódicas de T_{SQ} ; es atenuada en forma diferente para cada tipo de muro y para cada localidad y estación del año. En definitiva, en Tartagal no se observan grandes diferencias entre los flujos q_{Vi} transmitidos a través de los muros en enero o junio, en La Quiaca q_{Vi} se duplica en junio respecto al de enero, mientras que en Ushuaia q_{Vi} es despreciable durante junio.

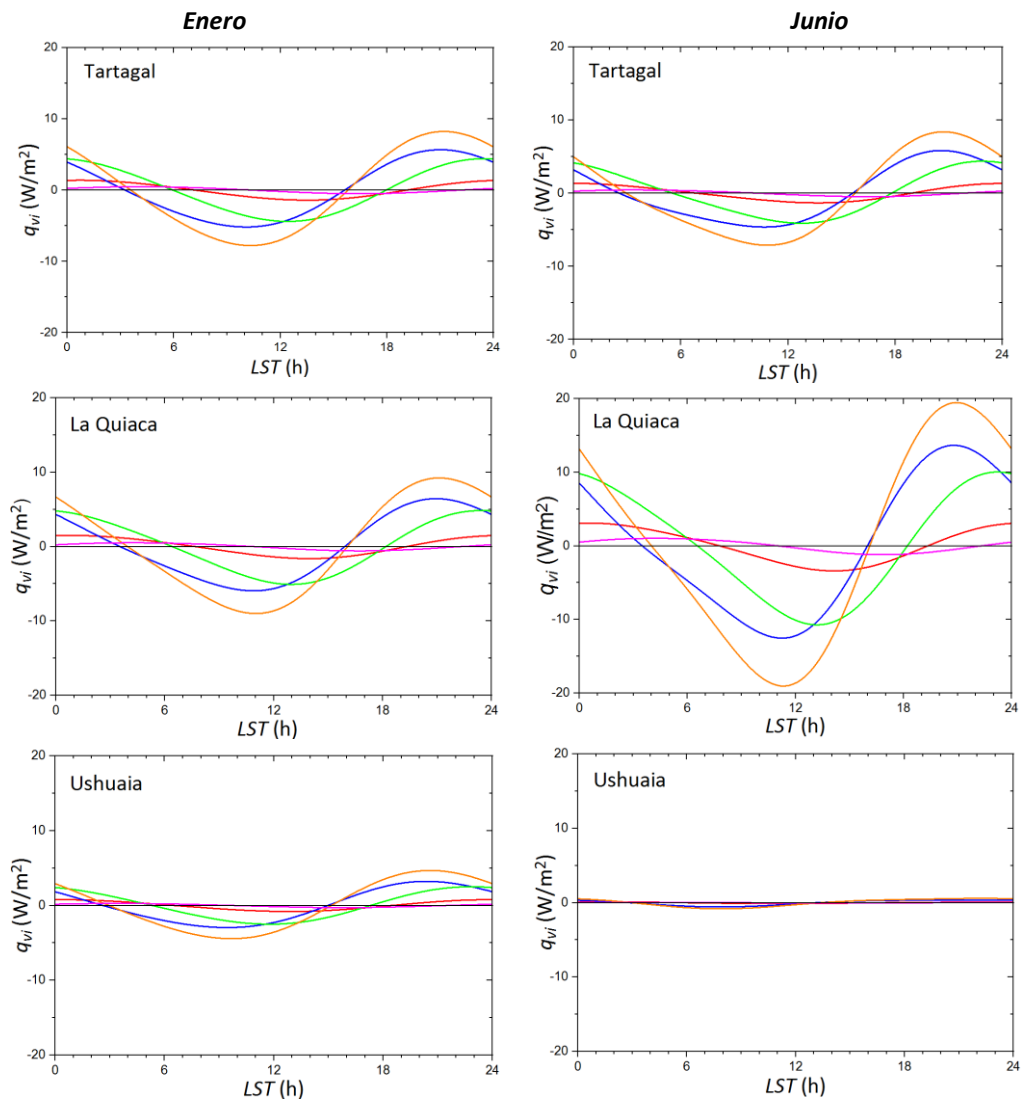


Figura 5. Flujo de calor variable que atraviesa la cara interna de los muros m_1 (rojo), m_2 (azul), m_3 (verde), m_4 (naranja) y m_5 (magenta), orientados al norte para tres ciudades representativas.

La aplicación de las Ecs. (4–7) resulta en los gráficos de contorno en falso color de la Figura 6, contruidos a partir de los datos recogidos en las ciudades representadas por puntos negros. Un claro efecto de la latitud sobre $\overline{T_{SQ}}$ se observa tanto en enero como en junio: los mayores valores de $\overline{T_{SQ}}$ se obtienen en el norte del país (con menor latitud) y disminuyen hacia las regiones australes. Otros efectos, especialmente sobre $\overline{A_{T_{SQ}}}$, aparecen en el NE (clima caluroso húmedo), y en la región de cuyo que registra las mayores altitudes y, por lo tanto, menor temperatura media y mayor radiación solar.

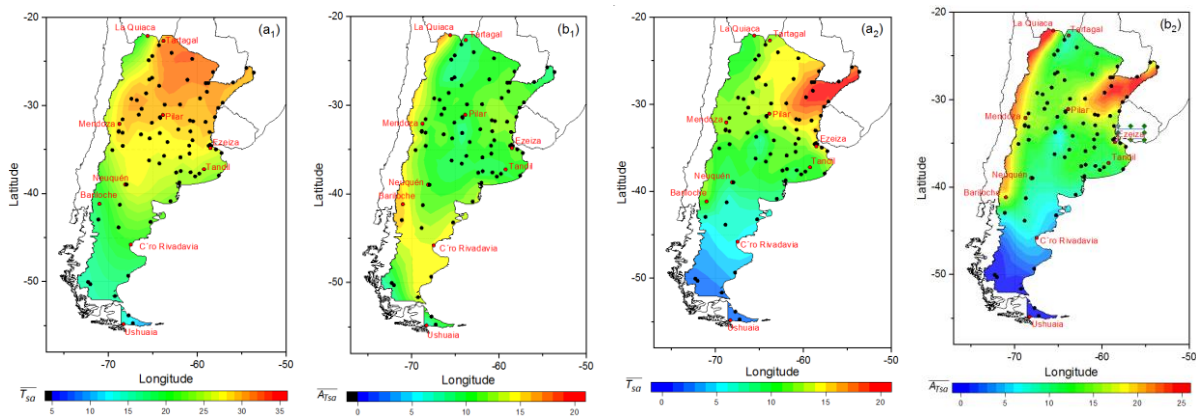


Figura 6. Distribuciones de $\overline{T_{sa}}$ (a) y $\overline{A_{Tsa}}$ (b) para enero (a₁ y b₁) y junio (a₂ y b₂) construidas a partir de los datos meteorológicos de las ciudades indicadas con puntos negros. Los puntos rojos indican las ciudades tomadas como referencia.

ANÁLISIS

La diferencia entre los valores de q_{ss} correspondientes a las ciudades de referencia es pequeña si se considera sólo la orientación de los muros, tanto en enero como en junio (Figura 3). Durante el verano hay regiones de Argentina que presentan un valor de $\overline{T_{sa}}$ próximo a la temperatura de confort y, por lo tanto, la diferencia $\overline{T_{sa}} - T_i$ genera un escaso flujo de calor diario promedio hacia el interior. Con respecto a la parte opaca de la envolvente, las construcciones emplazadas en estas regiones (de color verde en Figura 6a) no requerirían demasiada energía para establecer el confort interior a lo largo del día, independientemente del muro elegido. Por otra parte, q_{ss} que atraviesa la envolvente de construcciones ubicadas en la zona amarillo-rojo se ubica en la posición más alejada (a la derecha) de la recta de la Figura 3a. En estos casos es importante disponer de muros con buena aislación (es decir, del tipo m_1 , m_2 o m_5), y complementar con estrategias de ventilación natural para contrarrestar las altas temperaturas estivales locales y sombreado para reducir los efectos del asoleamiento. En invierno, todos los muros pierden calor en la mayor parte del territorio argentino (Figura 3b), excepto en la región NE muy cálida y húmeda. En general, las pérdidas de calor resultan ser mayores, cuanto mayores son la latitud y la distancia al océano Atlántico. La relación entre pérdidas/ganancias de calor y la ubicación geográfica coincide, en líneas generales, con resultados de estudios previos que condujeron a la clasificación bioclimática de Argentina (IRAM 11603), pero en el presente estudio surge de aplicar una única metodología para calcular directamente el flujo de calor en las estaciones estival e invernal y sumando el efecto de las variaciones de temperatura, irradiancia solar, amplitud térmica, etc. Las ganancias o pérdidas de calor en verano e invierno dependen de la localidad debido a sus condiciones climáticas particulares, en especial la temperatura y la irradiancia solar medias. De esta forma, la importancia de q_{ss} en verano e invierno es diferente, lo que explica el orden diferente en las posiciones de las localidades de referencia sobre las rectas de la Figura 3. Las construcciones ubicadas en Ushuaia y Comodoro Rivadavia (mayores latitudes australes), Bariloche, Neuquén, Mendoza y La Quiaca (cercanas a la cordillera de los Andes) y Tandil (con microclima serrano), requieren muros con alta aislación térmica como los m_1 y m_5 para soportar los crudos inviernos.

Finalmente, la comparación entre q_{ss} y q_{vi} posibilita elegir el muro más adecuado según el clima local caracterizado por $\overline{T_{sa}}$ y $\overline{A_{Tsa}}$. Por ejemplo, se mencionó que hay regiones del país donde los interiores ganan q_{ss} en verano (Figura 6a), en cuyo caso puede aprovecharse el retraso de q_{vi} (Figura 5) para generar interiores más frescos, restando ambos flujos de calor al mediodía y sumándolos a la noche, y evacuando el calor interno por medio de una adecuada ventilación natural nocturna. Notar que es importante balancear ambos flujos de calor y no necesariamente reducirlos lo más posible ya que dicho balance depende de la temperatura que se desee establecer al mediodía y la eficiencia de la

ventilación nocturna disponible. Esto puede ser útil en edificios construidos a gran altitud (como en La Quiaca) o cerca de las altas montañas (como en Neuquén, Mendoza y Bariloche), donde $A_{T_{sa}}$ es importante todo el año. Por el mismo motivo, en ciudades australes (como Ushuaia y Comodoro Rivadavia) conviene que q_{ss} y q_{vi} sean mínimos, por lo que muros del tipo m_5 son los más adecuados ya que los del tipo m_1 transmiten mayor q_{vi} . A estas latitudes, el orden de las capas de materiales en el interior de la envolvente también importa.

CONCLUSIONES

Se presenta una metodología para calcular el calor intercambiado a través de diferentes tipos de componentes opacas de envolventes edilicias en los regímenes estacionario y variable, en regiones geográficas argentinas bien diferenciadas extendiendo los cálculos de Muñoz et al. (2020). Los factores clave son la utilización de T_{sa} que da cuenta de los efectos de la irradiancia solar sobre los muros, las relaciones entre $\overline{T_{sa}}$ y $\overline{A_{T_{sa}}}$ con q_{ss} y q_{vi} , respectivamente, y la estimación de $\overline{T_{sa}}$ y $\overline{A_{T_{sa}}}$ con un número reducido de variables meteorológicas aplicando el modelo RLM. Así se calcularon q_{ss} y q_{vi} en vastas regiones del país a partir de los datos registrados por estaciones meteorológicas. Se encontró que $\overline{T_{sa}}$ se correlaciona principalmente con $\overline{T_e}$ y $\overline{I_{meas}}$, mientras que $\overline{A_{T_{sa}}}$ se correlaciona con $\overline{A_T}$ y $\overline{I_{meas}}$. Sin embargo, estas variables no son las únicas a tener en cuenta ya que T_{sa} y $A_{T_{sa}}$ también dependen de otros parámetros meteorológicos.

Comparando el comportamiento térmico estacionario y dinámico de cinco tipos de muros en diferentes meses del año y localidades, es posible determinar en cuales regiones es importante considerar las características térmicas estacionarias (i.e, U) y dinámicas (e.g., masa térmica, conductividad dinámica, tiempo de retraso, etc.), y en cuales puede prescindirse de ellas. Por lo tanto, la metodología presentada complementa las especificaciones sobre los tipos de construcción más adecuados para cada región establecidas por las normas IRAM 11603 y 11601 al considerar las propiedades dinámicas de los muros.

La elección de las localidades para aplicar el modelo RLM se basó en sus diferencias climáticas. Los coeficientes $Adj.R^2$ obtenidos son razonables, pero pueden mejorarse especialmente para enero (Tabla 4) considerando un mayor número de sitios de referencia. Esto también permitiría ampliar el número de variables meteorológicas a considerar; por ejemplo pueden incorporarse la precipitación, nubosidad, tiempo de permanencia de la luz solar, dirección del viento, entre otros. Resultados preliminares obtenidos usando estas variables (y también la latitud, longitud y altitud) no mostraron mejoras significativas en los $Adj.R^2$ para las ciudades consideradas. Todas estas variables parecen estar correlacionadas y ser dependientes una de otra pero no agregan información adicional relevante para caracterizar el flujo de calor que ingresa por la parte opaca de la envolvente edilicia. De todas formas, esta cuestión deberá confirmarse en otro estudio.

REFERENCIAS

- ASHRAE Standard 55 (2017) Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy
- Aste N., Angelotti A. y Buzzetti M. (2009). The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings. *Energy and buildings* 41, 11, 1181–1187.
- Belding H.S. y Hatch T.F. (1955). Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strains. *Heat./Pip./Air Cond.* 27, pp. 129–136.
- Di Perna C., Stazi F., Casalena A.U. y D’Orazio M. (2011). Influence of the internal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal heat loads. *Energy and Buildings* 43, 1, 200–206.
- Gaitani N., Lehmann C., Santamouris M., Mihalakakou G. y Patargias P. (2010). Using principal component and cluster analysis in the heating evaluation of the school building sector. *Applied*

Energy 87, 6, 2079–2086.

- Goia F., Tíme B. y Gustavsen A. (2015). Impact of opaque building envelope configuration on the heating and cooling energy need of a single family house in cold climates. *Energy Procedia* 78, 2626–2631.
- IRAM 11601 (2002) *Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario*. Buenos Aires, Argentina.
- IRAM 11603 (2012) *Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina*. Buenos Aires, Argentina.
- IRAM 11900 (2017). *Prestaciones energéticas en viviendas. Método de cálculo y etiquetado de eficiencia energética*. Buenos Aires, Argentina.
- Lam J.C., Wan K.K., Wong S.L. y Lam T.N. (2010). Principal component analysis and long-term building energy simulation correlation. *Energy Conversion and Management* 51, 1, 135–139.
- Mendenhall W. y Sincich T. (2016). *Statistics for Engineering and the Sciences*. 6^{ta} Ed., Pearson/Prentice Hall.
- Muñoz N., Marino B.M. y Thomas L.P. (2020). Efectos de la evolución de la temperatura sol–aire sobre el flujo de calor transmitido a través de la envolvente. *Energías Renovables y Medio Ambiente*. Aceptado.
- Pommer L., Fick J., Sundell J., Nilsson C., Sjöström M., Stenberg B. y Andersson B. (2004). Class separation of buildings with high and low prevalence of SBS by principal component analysis. *Indoor Air* 14, 1, 16–23.
- Rossi M. y Rocco V.M. (2014). External walls design: The role of periodic thermal transmittance and internal areal heat capacity. *Energy and Buildings* 68, 732–40. doi:10.1016/j.enbuild.2012.07.049.
- Verbeke S. y Audenaert A. (2018). Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82, 2300–2318.

CORRELATION BETWEEN THE ENVELOPE THERMAL BEHAVIOUR AND THE CLIMATIC CHARACTERISTICS IN THE CONSTRUCTION SITE

ABSTRACT

Correlations between the total heat flux exchanged through opaque building envelopes under steady-state and time-dependent regimes and the local climate characteristics were determined to optimise the construction energetic performance from the design stage. The thermal behaviour of five types of walls was evaluated from the Fourier series expansion of the equivalent sol–air temperature during January and June, the most energy demanding months for heating and cooling of buildings, in ten reference cities located in well-differentiated Argentinian regions. Thus, it is possible to determine the locations where the steady-state and dynamic thermal characteristics of walls must be considered. The procedure was extended to the whole Argentinean territory using the meteorological records in the construction site and the multivariate analysis. The key factors are the use of the sol–air temperature associated with the solar irradiance effects on the walls, the relationships between the mean values of the sol–air temperature and the amplitude of its daily variations and the entering constant and variable heat fluxes respectively, and the estimation of such mean values using a small number of meteorological variables. Results are satisfactory and in agreement with those obtained by applying the technical standards that use other methodologies.

KEYWORDS: Envelope. Thermal behaviour. Heat flux. Multivariate analysis. Climate.