



Revista  
Hábitat  
Sustentable

ISSN 0719-0700  
Vol. 11 N° 1  
Junio  
2021



UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO





**Revista  
Hábitat  
Sustentable**

ISSN 0719-0700

Vol. 11 N°. 1

junio

2021



**UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO**

**RECTOR:**

MAURICIO CATALDO MONSALVES

**DECANO FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO:**

ROBERTO EDUARDO BURDILES ALLENDE

**EDITORIA RESPONSABLE:**

Dra. CLAUDIA MUÑOZ SANGUINETTI / Departamento Ciencias de la Construcción, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile  
clmunoz@ubiobio.cl

**PRODUCTORA EDITORIAL:**

JOCELYN VIDAL RAMOS / Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile  
javidal@ubiobio.cl

**ASISTENTE EDITORIAL:**

Arq Mária Paz Cid Alarcón / Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile  
mpcid@ubiobio.cl

**CORRECIÓN DE ESTILO:**

Dra. OLGA OSTRIA REINOSO / Departamento Estudios Generales

**GESTIÓN INFORMÁTICA:**

KARINA LEIVA / Universidad del Bío-Bío, Chile

**DIRECTOR DE ARTE Y DIAGRAMACIÓN:**

IGNACIO A. SÁEZ ARANEDA

**COMITÉ PRODUCTIVO:**

Dra. M<sup>o</sup> BEATRIZ PIDERIT MORENO / Departamento de Teoría y Diseño de la Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío - Bío, Concepción, Chile

ALEJANDRA BANCALARI CORNEJO / Departamento de Teoría y Diseño de la Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío - Bío, Concepción, Chile

**CONSEJO EDITORIAL:**

Dra. MAUREEN TREBILCOCK KELLY / Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.

Dra. M<sup>o</sup> BEATRIZ PIDERIT MORENO / Departamento de Teoría y Diseño de la Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío - Bío, Concepción, Chile

Dr. RODRIGO GARCÍA ALVARADO / Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile

Dra. NINA HORMAZÁBAL / Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile

Dr. WALDO BUSTAMANTE / Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

Dr. ERNESTO KUCHEN / Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat, San Juan, Argentina

Dra. CRISTINA ENGEL DE ALVAREZ / Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

Dr. OLAVO ESCORCIA OYOLA / Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Dr. ALEXANDER GONZÁLEZ CASTAÑO / Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia

Dr. CARLOS RUBIO-BELLIDO / Universidad de Sevilla, Sevilla, España

Dra. MARÍA DEL PILAR MERCADER MOYANO / Universidad de Sevilla, Sevilla, España

Dr. VICENTE FLORES ALÉS / Universidad de Sevilla, Sevilla, España

Dr. FLAVIO CELIS D'AMICO / Universidad de Alcalá, Madrid, España

Dr. ERNESTO ECHEVERRÍA VALIENTE / Universidad de Alcalá, Madrid, España

**TRADUCCIONES:**

KEVIN WRIGHT

**FOTOGRAFÍA PORTADA:**

GONZALO GUTIÉRREZ ASTETE / Vivienda Los Mañíos

**DIRECCIÓN:**

Avda. Collao 1202  
CP: 4081112. Concepción, Chile  
TEL.(56-41)3111409

Revista **HS** indexada en SciELO, ERIHPLUS, Emerging Source Citation Index de Clarivate Analytics, Latindex Catálogo 2.0, Avery Index, DOAJ, Dialnet, Redib, EBSCO, Rebiun, JornalTOCs y ARLA.

**HS** se adhiere a la Declaración de San Francisco Sobre la Evaluación de la Investigación (DORA).

Los criterios expuestos en los artículos son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no reflejan necesariamente la opinión de la dirección de la revista.

Revista Hábitat Sustentable es editada por el Facultad de Arquitecturas Construcción y Diseño de la Universidad del Bío-Bío, es financiada por el Fondo de Publicaciones Periódicas de la Vicerrectoría Académica, la Dirección General de Investigación, Desarrollo e Innovación y la Dirección de Postgrado de la Universidad del Bío-Bío junto al Programa de Información Científica Concurso Fondos de Publicación de Revistas Científicas 2018 Proyecto Código: FP180007





- 05 **VIVIENDA LOS MAÑÍOS**  
Gonzalo Gutiérrez Astete
- 07 **EDITORIAL**  
Maureen Trebilcock Kelly
- 08 **FACHADAS VIDRIADAS: CÁLCULO DE TRANSMITANCIA TÉRMICA**  
Maureen de Gastines, Andrea Pattini
- 20 **MEJORAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN CALEFACCIÓN. POTENCIAL DE INTERVENCIÓN EN EDIFICIO ESCOLAR EXISTENTE DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN JUAN, ARGENTINA**  
María Guillermina Ré, María Pía Mazzocco, Celina Filippín
- 32 **TUHOUSE: PROTOTIPO DE VIVIENDA SOCIAL SOSTENIBLE DE ALTA DENSIDAD PARA EL TRÓPICO**  
Constanza Cobo Fray, Olga Lucia Montoya Flórez
- 44 **INDICADOR DE RENDIMIENTO LABORAL DEL USUARIO-TRABAJADOR DE OFICINA EN PERÍODO DE VERANO DE CLIMA TEMPLADO CÁLIDO**  
Yesica Alamino Naranjo, Alcion Alonso Frank
- 58 **MINGA: MODELO REPLICABLE DE RENOVACIÓN URBANA SOSTENIBLE, CASO BUENAVENTURA**  
Valeria Villamil Cárdenas, Iván Osuna-Motta
- 72 **APLICACIÓN DE LA “FOOTPRINT FAMILY” PARA LA EVALUACION AMBIENTAL DE EDIFICIOS PUBLICOS EN ESPAÑA. ESTUDIO DE CASO: CENTRO EDUCATIVO.**  
Cristina Rivero-Camacho, Antonio Ferreira-Sánchez



## VIVIENDA LOS MAÑÍOS

Inmersa en los bosques de la Décima Región de Chile, sector de Chamiza, perteneciente a la Comuna de Puerto Montt. Su sistema constructivo es realizado con fardos de paja de trigo, combinado con estructura de madera como soporte. El *diseño pasivo* de esta vivienda considera una eficiente envolvente térmica utilizando al fardo de paja de trigo en sus muros exteriores, y orientando la mayor superficie de vanos hacia el norte maximizando las ganancias solares e iluminación natural. Además este proyecto incorpora recintos propios del habitar de la zona sur de Chile, como ser el espacio de chiflonera y el flojero; asiento en torno a la cocina a leña. La vivienda resalta las materialidades y técnicas constructivas en madera propias de la zona sur de Chile.

Gonzalo Gutiérrez Astete  
Arquitecto Universidad del Bío-Bío  
Magíster en Eficiencia Energética y Hábitat Sustentable Universidad del Bío-Bío  
Docente asistente Universidad San Sebastián, Sede de la Patagonia, Chile  
[gonzalo.gutierrez@uss.cl](mailto:gonzalo.gutierrez@uss.cl)







## EDITORIAL

### ARQUITECTURA MÁS ALLÁ DE LA SUSTENTABILIDAD

Es un hecho que la pandemia Covid 19 ha impactado no solo nuestras vidas, sino también la disciplina de la arquitectura, que ha alzado la mirada hacia la salud y bienestar de las personas que habitan espacios arquitectónicos. La verdad es que el bienestar de los ocupantes ha sido materia de interés disciplinar desde ya hace varios años, pero se ha visto enfatizado aún más con los requerimientos de higienización y calidad ambiental de los espacios, derivados de la pandemia. Hoy, esperamos que la arquitectura sustentable no solo apunte a mitigar los impactos negativos que las edificaciones generan sobre el medio ambiente sino también entregue espacios saludables, confortables, centrados en los habitantes. De esta manera, la agenda de sustentabilidad en la arquitectura, usualmente orientada hacia aspectos ambientales como energía cero, eficiencia hídrica o economía circular, comienza a abarcar la dimensión social con mucha más fuerza. Quizás esta tendencia surge en parte como reacción a los edificios de alto desempeño que mantienen la lógica de la arquitectura internacional del siglo XX –un estilo arquitectónico para todos los climas– donde una envolvente con materiales altamente tecnologizados, sistemas de climatización e iluminación sofisticados y eficientes permiten eficientes desempeños ambientales en distintos contextos. Actualmente, en distintas partes del mundo, se aboga por una arquitectura más “humanizada”.

El bienestar en espacios arquitectónicos es un tema que ha sido investigado, publicado, y que forma parte de estándares y de sistemas de certificación de edificios, tales como WELL y Fitwell. Sin embargo, se trata de un constructo que aún no ha sido adecuadamente definido y, por lo tanto, resulta difícil determinar cómo diseñar, medir y proveer de bienestar a través de la arquitectura. Tradicionalmente, el foco ha estado puesto en aspectos físicos de la calidad del ambiente interior, es decir, temperatura, iluminación, ruidos y calidad del aire, que se traducen en indicadores y estándares medibles y verificables. Estas dimensiones del ambiente interior influyen en la percepción de

los ocupantes y en su confort para desempeñar las tareas cotidianas. No obstante, el bienestar y la salud exigen una mirada holística que responde a aspectos físicos, psicológicos y fisiológicos.

Más allá de la percepción momentánea de comodidad, el bienestar se relaciona con los efectos que el espacio arquitectónico genera sobre los seres humanos en el mediano y largo plazo. Un ejemplo de ello son justamente las secuelas de las cuarentenas, que han obligado a las personas a permanecer por tiempos prolongados en espacios interiores, a partir de lo cual ha aumentado la deficiencia de vitamina D y calcio, por falta de sol, entre otras patologías. El ciclo solar se conecta a través de la visión con el ciclo circadiano del cuerpo para coordinar los ritmos diarios y estacionales de casi todos los procesos de nuestros cuerpos. Los patrones de iluminación, con días luminosos y noches oscuras, además de las variaciones en el color de la luz entre el amanecer y el atardecer, se alinean con las hormonas para proveer de escenarios saludables. Pero el bienestar no solo implica la ausencia de enfermedad, sino que las maneras en que los espacios arquitectónicos agregan valor a la vida de las personas. Espacios conectados con la naturaleza capaces de nutrir la experiencia arquitectónica y generar impactos positivos sobre el medio ambiente, de bioremediación.

Es claro que el futuro de la disciplina nos plantea nuevos desafíos, tanto para la investigación como para la innovación y el diseño arquitectónico. La revista Hábitat Sustentable surge, en este escenario, como una instancia de reflexión y debate sobre estos temas, donde la perspectiva latinoamericana tiene ciertamente mucho que aportar, ya sea por una tradición de arquitectura con sentido de lugaridad, como por los desafíos derivados de las desigualdades sociales.

Maureen Trebilcock Kelly  
Profesora Titular, Departamento Diseño y Teoría de la Arquitectura  
Directora Doctorado en Arquitectura y Urbanismo, Universidad del Bío-Bío, Chile  
<http://orcid.org/0000-0002-1984-0259>  
[mtrebilc@ubiobio.cl](mailto:mtrebilc@ubiobio.cl)







Recibido 28/02/2021  
Aceptado 07/06/2021

# FACHADAS VIDRIADAS: CÁLCULO DE TRANSMITANCIA TÉRMICA

## GLAZED CURTAIN WALLS: THERMAL TRANSMITTANCE CALCULATION

MAUREEN DE GASTINES

Doctora en Ingeniería mención Civil-Ambiental  
Estudiante posdoctoral

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) -Consejo  
Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)  
Mendoza, Argentina

<https://orcid.org/0000-0002-0357-9375>  
mdegastines@mendoza-conicet.gob.ar

ANDREA PATTINI

Doctora Orientación en Luz y Visión

Investigadora principal y directora del INAHE

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) -Consejo  
Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)  
Mendoza, Argentina

<https://orcid.org/0000-0001-6305-1268>  
apattini@mendoza-conicet.gob.ar

### RESUMEN

La piel de vidrio es uno de los elementos dominantes de la arquitectura moderna y contemporánea. Este diseño de envoltente puede influir significativamente en la demanda de energía operativa de los edificios. En este trabajo, se analizan los sistemas de fachada de piel de vidrio disponibles en Argentina, con el objetivo de determinar los rangos de transmitancia térmica asociados, en función del diseño de perfiles, del tipo de vidriado y de las dimensiones de los paños vidriados. Inicialmente, se estudia mediante cálculo numérico bidimensional el impacto de varios parámetros de diseño de los perfiles sobre la transmitancia térmica, destacando la relevancia del modo de fijación del vidriado, para luego calcular la transmitancia térmica de las fachadas completas. Los resultados indican que el valor de transmitancia térmica de las fachadas de piel de vidrio depende principalmente de la transmitancia del vidriado empleado, y supera la misma en un 24%, en promedio.

### Palabras clave

fachadas, piel de vidrio, índices, sistemas constructivos.

### ABSTRACT

Glazing is one of the dominant features of modern and contemporary architecture. This envelope design may have a great impact on operational energy demand of buildings. In this work, glazed façade systems available in Argentina are analyzed, with the purpose of determining the associated thermal transmittance ranges, in terms of the profiles' design, the type of glazing and the size of glass panes. First, by using bidimensional numerical calculation, the impact of several profile design parameters on thermal transmittance is studied, highlighting the relevance of glazing fixing methods, to then calculate the thermal transmittance of the entire facade. The results indicate that the thermal transmittance value of glazed facades, mainly depends on the transmittance of the glass used, and exceeds this by 24% on average.

### Keywords

façades, glazing, indices, construction systems

## INTRODUCCIÓN

La forma de construir nuestro hábitat no puede estar enfocada únicamente a la búsqueda de funcionalidad y estética arquitectónicas. Debe contemplar, además, la sustentabilidad del espacio construido en pos de reducir a nivel global el consumo de energía final y las emisiones de gases de efecto invernadero. El impacto ambiental del sector edilicio ha ido creciendo en las últimas décadas (Cao, Dai y Liu, 2016), y revertir esta tendencia es un gran desafío que ya ha sido asumido por numerosos países. Los caminos para lograr este objetivo pueden clasificarse en tres categorías: las estrategias de diseño pasivo y conservación de la energía, las tecnologías de eficiencia energética en el funcionamiento del edificio, y la producción de energía a partir de energías renovables (D'Amanzo, Mercado y Karlen, 2020). Dentro de la primera categoría, se encuentra el diseño de la envolvente edilicia, que influye en la demanda de energía operativa.

Una de las características de la envolvente que más determina los consumos de energía para calefacción y enfriamiento de los edificios es la relación de superficie ventana-pared (Window-to-Wall Ratio –WWR– en inglés) (Lam, Ge y Fazio, 2016; de Gastines y Pattini, 2020). En ese sentido, Aste, Buzzetti, Del Pero y Leonforte (2018) analizaron los consumos de electricidad para calefacción, refrigeración e iluminación en una oficina ubicada en ciudades con diferentes climas (Atenas, Estocolmo y Milán) y observaron que, en la ausencia de elementos de sombreado, el WWR tiene un impacto notable en las demandas energéticas (hasta 60% de diferencia entre los casos con WWR de 20% y de 80%). Por lo tanto, las envolventes completamente vidriadas de los edificios con fachadas integrales representan un desafío para los diseñadores, que deben intentar controlar los flujos de energía térmica a través de estas envolventes. Para ello, el conocimiento de los indicadores energéticos de los sistemas de fachadas integrales es imprescindible. Pese al gran protagonismo de los vidriados, cuyas propiedades térmicas están bien documentadas, en estas envolventes, la retícula soporte de la fachada integral puede afectar de manera significativa el valor de transmitancia térmica (U) de la fachada (De Gastines y Pattini, 2019a). Esto se debe a la elevada conductividad del aluminio empleado para la fabricación de los perfiles, y a la baja compacidad que suelen tener los mismos (de Gastines y Pattini, 2019b), lo cual conlleva una mayor exposición a los coeficientes peliculares interiores y/o exteriores (convección y radiación). Además, a pesar de estar oculta atrás de los vidriados, la superficie proyectada de la retícula puede ser importante e impactar significativamente en la transmitancia térmica del sistema de fachada (Bae, Oh y Kim, 2015).

A nivel internacional, se ha buscado mejorar el desempeño energético de los sistemas de fachadas integrales mediante el uso de materiales aislantes, entre ellos, ruptura de puente térmico, triple vidriado hermético, vidriado termocrómico (Arnesano et al., 2021), poliéster reforzado con fibra de vidrio (Cordero, 2015), o bien, a través del uso de una doble envolvente, donde la fachada acristalada disimula otra piel

de baja transmitancia térmica (Bronwyn, 2018) o permite constituir una cámara ventilada (Saroglou, Meiry Theodosiou, 2020). La principal innovación en los sistemas de fachadas integrales es la integración de nódulos fotovoltaicos semi-transparentes en las partes de la fachada que reciben más radiación solar (Mocerino, 2020; Wu y Flemmer, 2020). Sin embargo, estas estrategias están asociadas a un alto costo inicial, que limita su generalización en países en vía de desarrollo.

Los índices energéticos de los sistemas de fachadas integrales en uso en Argentina no han sido caracterizados de manera detallada todavía. Los datos disponibles se limitan a las propiedades de los vidriados (IRAM 11601, 2002) y de los sistemas tradicionales de aventanamientos (de Gastines y Pattini, 2019b), así como al estudio de un diseño de fachada de piel de vidrio (de Gastines y Pattini, 2019b). No obstante, es posible que los valores de transmitancia térmica de los sistemas de fachadas integrales varíen considerablemente de acuerdo a las variantes de diseños existentes.

La piel de vidrio es un sistema de fachada integral que consiste en una retícula compuesta por perfiles verticales portantes y travesaños horizontales de aluminio, que una vez ensamblada en la obra, permite encastrar hojas de aluminio y vidrio. Es uno de los elementos dominantes de la arquitectura moderna y contemporánea (Viteri, 2020), utilizado generalmente para lograr un frente exterior totalmente vidriado, donde la estructura metálica es disimulada atrás de vidrios tonalizados y fijados con pegamento o mediante pequeños contravidrios. Se emplea de manera frecuente en edificios comerciales y de oficinas de mediana a gran envergadura, y en menor medida, en el sector residencial. Este sistema constructivo presenta numerosas ventajas para los edificios en varios pisos, entre las cuales se destacan la facilidad de armado y rapidez de montaje, la liviandad (especialmente relevante para las zonas sísmicas), la estanqueidad, así como un ambiente interior luminoso y confortable (Hamida y Alshibani, 2020; Yalaz, Tavit y Celik, 2018; Huang, Chen, Lu y Mosalam, 2017) siempre que esté garantizado el control de la radiación solar no deseada.

El propósito de este trabajo radica en analizar los sistemas de fachadas de piel de vidrio disponibles en Argentina y determinar los rangos de valores de transmitancia térmica asociados, en función del diseño de perfiles empleados, del tipo de vidriado y de las dimensiones de los paños vidriados.

## METODOLOGÍA

### ANÁLISIS DE LAS VARIANTES DE DISEÑOS DE PERFILES

La revisión de los catálogos de productos ofrecidos por seis empresas argentinas extrusoras de perfiles para fachadas integrales permitió definir un abanico representativo de los sistemas constructivos de fachadas piel de vidrio.



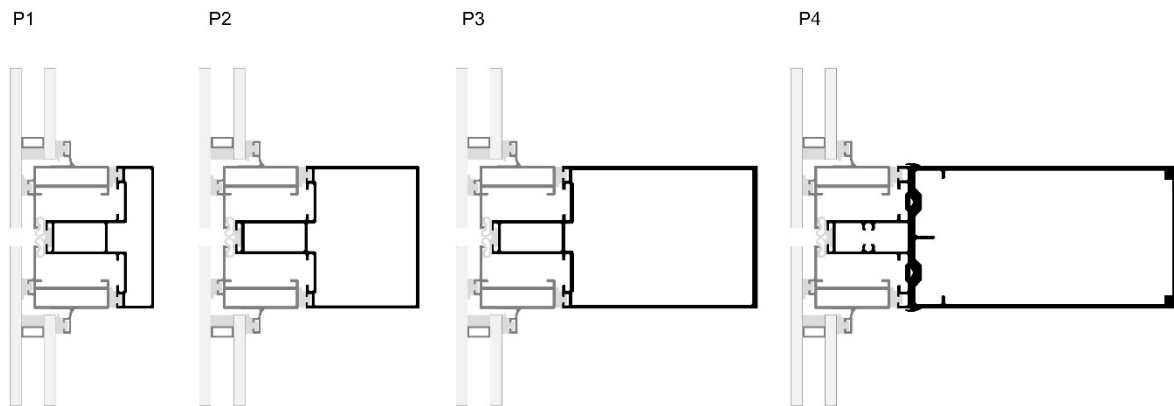


Figura 1. Variación del largo de columna (de izquierda a derecha: 57 mm, 97 mm, 140 mm, 186 mm). Fuente: Elaboración de las autoras.

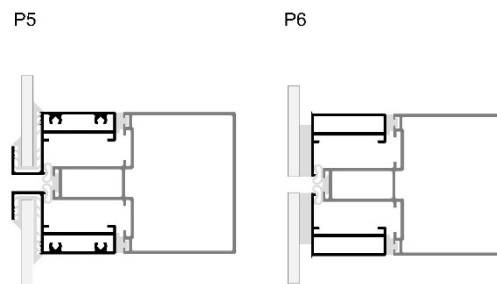


Figura 2. Comparación entre dos modos de fijación del vidriado: contenido (sección P5) y pegado (sección P6). Fuente: Elaboración de las autoras.

Existen diferentes parámetros a tomar en cuenta para elegir un sistema de piel de vidrio. En primer lugar, los perfiles se deben adaptar al ancho del vidriado seleccionado, que varía significativamente según se trate de un vidriado simple (SV) o doble vidriado hermético (DVH). También se ajustan a la apertura de los paños (paño fijo (PF) o móvil (PM)). Finalmente, los perfiles difieren dependiendo de que el vidriado esté contenido (ya sea encapsulado, o bien, fijado mediante contravidrios) o pegado (mediante silicona estructural o cinta VHB). También existe una variante de hoja para el caso de DVH escalonado (*offset*, en inglés). Esta variante permite instalar conjuntamente DVH y SV en ciertas partes de la fachada (por ejemplo, en frente de las losas en edificios de varios pisos), manteniendo un mismo filo exterior en toda la fachada.

Dada la gran variedad de opciones de perfilería, se destacaron parámetros que podrían influir de manera significativa en los valores de transmitancia térmica de los perfiles, y se estudió por separado la relevancia de cada uno de ellos, con el fin de seleccionar una muestra más reducida de perfiles para el posterior análisis de los sistemas de fachada completa. A continuación, se detallan los parámetros relevados.

### Parantes (cortes horizontales)

**Parámetro 1: Largo de columna.** El perfil de columna soporta las cargas de la fachada, por lo que este debe ser seleccionado en función de las dimensiones de los

paños vidriados y del peso de los vidriados, para lograr la resistencia mecánica necesaria. El relevamiento realizado permitió destacar que los largos de columna comunes a la mayoría de los fabricantes son de 57 mm, 97 mm y 140 mm. Existen perfiles más largos, cuyas dimensiones difieren según el fabricante, siendo el más extenso de 186 mm (ensamblaje de columna divisoria y columna suplementaria). Se considera que el largo de columna puede ser un factor que influya significativamente en el valor de transmitancia térmica de la retícula, dado que genera diferentes grados de compacidad interior de sus secciones verticales.

La Figura 1 grafica las cuatro secciones analizadas, en las que el largo del perfil de columna varía según las medidas anteriormente mencionadas.

**Parámetro 2: Vidrio contenido o pegado.** Si bien hay varios modos de fijación de vidriado, desde el punto de vista térmico se distinguen dos tipos de secciones. La primera, con vidrio contenido (i.e. encapsulado o sujetado mediante contravidrio), donde se genera un puente térmico entre el interior y el exterior por el perfil de hoja; y la segunda, con vidrio pegado, donde los perfiles metálicos están aislados del exterior mediante el vidriado, la silicona y la cavidad parcialmente ventilada en la junta entre paños vidriados.

La Figura 2 representa las dos secciones seleccionadas para comparar el impacto del tipo de fijación del vidriado en el valor de transmitancia térmica.

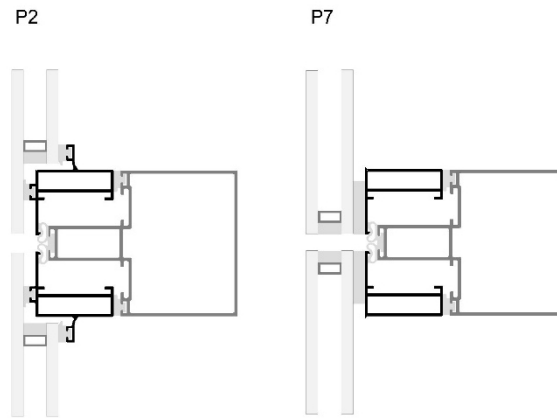


Figura 3. Comparación entre la configuración de parante con DVH escalonado (sección P2) y pegado (sección P7). Fuente: Elaboración de las autoras.

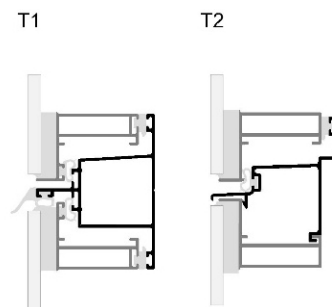


Figura 4. Variantes de diseño de perfil de travesaño: con cavidad (izquierda) y con bota aguas (derecha). Fuente: Elaboración de las autoras.

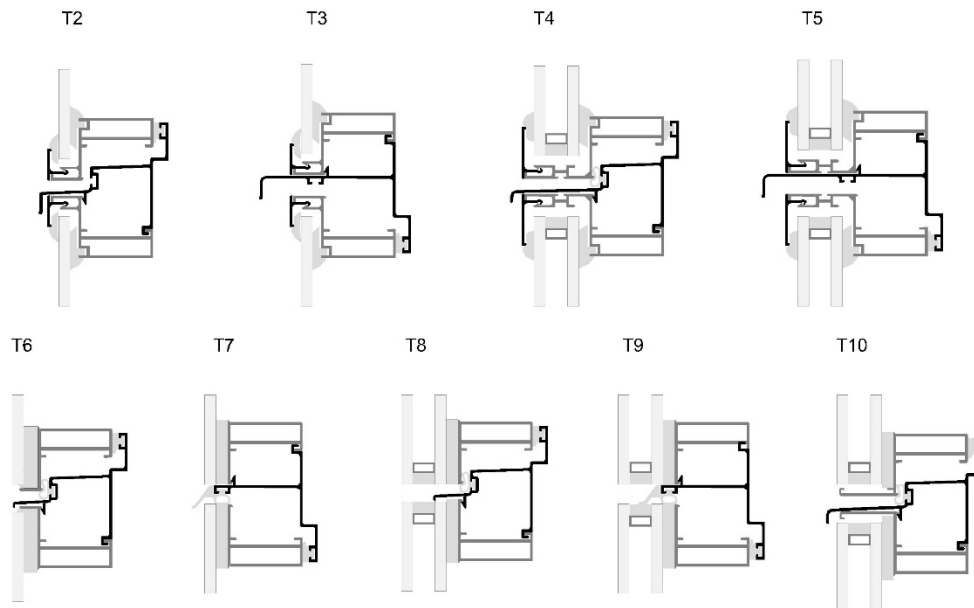


Figura 5. Variantes de diseño del espacio intersticial horizontal: configuraciones con vidrio contenido (arriba) y vidrio pegado (abajo). Opciones con SV o DVH, y cabezal para paño fijo (números pares) o para paño móvil (números impares). T10 es una variante de la sección T8 con bota aguas saliente. Fuente: Elaboración de las autoras.



Figura 6. Comparación de las configuraciones de DVH pegado (T8: variante PF y T9: variante PM) y escalonado (T11: variante PF y T12: variante PM). Fuente: Elaboración de las autoras.

**Parámetro 3: DVH escalonado.** La configuración del DVH escalonado incrementa el ancho proyectado del parante, además de reducir levemente la superficie de perfiles expuesta a las condiciones de borde interiores. Para conocer el impacto de este parámetro, se compara la sección P2 (con columna mediana y DVH escalonado) con una variante similar, pero con DVH pegado (P7) (Figura 3).

#### Travesaños (cortes verticales)

**Parámetro 4: Diseño de travesaño.** Se observan 2 tipos de perfiles de travesaño, uno común a dos de los catálogos analizados, con una cavidad, y otro común a los otros cuatro catálogos, llamado “bota aguas” (Figura 4). Al tener morfologías disímiles, en particular distintas cantidades y dimensiones de cavidades internas, podrían tener también diferentes valores de transmitancia térmica.

**Parámetro 5: Espacio intersticial horizontal.** Dentro de las variantes de perfiles de travesaño con bota aguas, se destacaron 9 opciones de diseños similares en cuanto a su perfil interior (mismo ancho proyectado y coeficiente de compacidad), que se diferencian entre ellos esencialmente por la extensión del bota aguas a nivel del espacio intersticial entre paños vidriados y por la presencia o ausencia de contravidrios. En función del tipo de vidriado (SV / DVH), del tipo de abertura (PF / PM) y del modo de fijación del vidriado (contenido / pegado), el bota aguas puede o no salir hacia el exterior de la fachada, generando o no un puente térmico. Asimismo, la variación en la extensión modifica el coeficiente de compacidad exterior del perfil, pudiendo afectar consecuentemente su valor de transmitancia térmica

**Parámetro 6: DVH escalonado.** La configuración del DVH escalonado incrementa el ancho proyectado del travesaño, además de reducir levemente la superficie de perfiles expuesta a las condiciones de borde interiores. Aquí, se compararon las secciones de travesaño (variantes PF y PM) con DVH pegado y con DVH escalonado, que pueden apreciarse en la Figura 6.

#### Ancho proyectado de la sección

Finalmente, se compara el ancho proyectado de los diferentes perfiles, el cual determinará el valor final de transmitancia térmica del sistema de fachada (dado que este depende del porcentaje de superficie de fachada ocupado por la retícula metálica).

#### SELECCIÓN DE CASOS DE ESTUDIO

##### Perfiles metálicos

Después de haber aislado los parámetros seleccionados para analizar el impacto de cada uno de ellos en los valores de transmitancia térmica e identificar los parámetros de mayor relevancia, se concentró el estudio en estos últimos.

Cabe aclarar que el trabajo expuesto no contempla el análisis de los perfiles de terminaciones inferiores, superiores y laterales, tampoco de esquinas y rótulas, pues se asume que dichos perfiles ocupan un porcentaje pequeño de la superficie de la fachada.

##### Vidriados

El vidriado generalmente utilizado en fachadas de piel de vidrio es un DVH de control solar pegado con silicona estructural, que permite limitar las ganancias solares evitando el sobrecalentamiento del edificio y, a su vez, oculta la retícula metálica, logrando una visual completamente vidriada.

Se propone estudiar las siguientes opciones de vidriados, que abarcan un amplio rango de valores de transmitancia térmica:

- V1: DVH reflectivo de control solar y baja emisividad (Eclipse Advantage Evergreen 6 mm / cámara de aire 12 mm / float incoloro 6 mm).
- V2: DVH de control solar y alta reflectividad (Cool Lite STB 120 6 mm / cámara de aire 12 mm / float incoloro 6 mm).
- V3: SV reflectivo pirolítico de control solar y baja emisividad (Eclipse Advantage Evergreen 6 mm).
- V4: SV de control solar y alta reflectividad (Cool Lite ST136 6 mm).

### Dimensiones de los paños

El sistema constructivo bajo análisis permite cierta libertad de dimensionamiento de los paños vidriados, siempre y cuando se respeten los límites de utilización estática, que son relaciones entre la distancia entre columna (ancho de los paños) y la distancia (altura) entre los puntos de soporte o anclaje a la estructura del edificio, calculados en función de la presión de viento y del perfil de columna empleado. Se recomienda, adicionalmente, que las dimensiones de los paños no excedan 1,25 m x 1,50 m (ancho por alto).

En la práctica y por lo general, se busca optimizar la utilización de los vidrios, que vienen en placas de 2,40 m x 3,60 m. También la incorporación de paños móviles implica divisiones horizontales que suelen ser un paño umbral fijo, un paño móvil intermedio y un paño dintel fijo.

En este estudio se comparan tres tamaños de paños vidriados. El más grande consta de paños de 1,20 m de ancho por 1,50 m de altura; el intermedio, de 1,20 m por 1,00 m; y el más pequeño, de 0,80 m por 1,00 m.

### PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

En esta siguiente etapa, se simularon las secciones elegidas utilizando los programas WINDOW 7.7 y THERM 7.7, desarrollados por el LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory). WINDOW permite calcular la transmitancia térmica de los vidriados ( $U_g$ ), mientras que las secciones de los perfiles de carpinterías se simulan en THERM. Este programa emplea el método de los elementos finitos para calcular los flujos de calor en el componente estudiado de acuerdo a las condiciones ambientales indicadas. De ese modo, arroja el valor de transmitancia del marco ( $U_f$ ) y del borde del vidriado ( $U_e$ ), que corresponde a una franja perimetral de 63.5 mm, en la que se manifiestan los efectos de borde entre el marco y el vidriado. La Figura 7 indica las diferentes partes del sistema de fachada integral (centro del vidriado, borde, perfil marco/hoja de parante o travesaño).

Se consideraron condiciones ambientales representativas de un día de invierno en Buenos Aires (de Gastines y Pattini, 2019b), detalladas en la Tabla 1. Los valores de conductividad considerados para los diferentes materiales que componen el sistema de fachada se muestran en la Tabla 2.

Los valores de  $U_g$  de los vidriados fueron calculados utilizando WINDOW. Luego, las secciones de parantes y travesaños fueron simuladas en THERM dos veces, insertando sucesivamente los vidriados V3 y V4 (secciones con SV) o V1 y V2 (secciones con DVH) para obtener los valores de  $U_f$  y  $U_e$  correspondientes. Una vez obtenidos los índices térmicos de las diferentes partes del sistema de fachada integral, se calculó el promedio ponderado por área de los mismos ( $U$ ), para las diferentes dimensiones de paños vidriados propuestas.

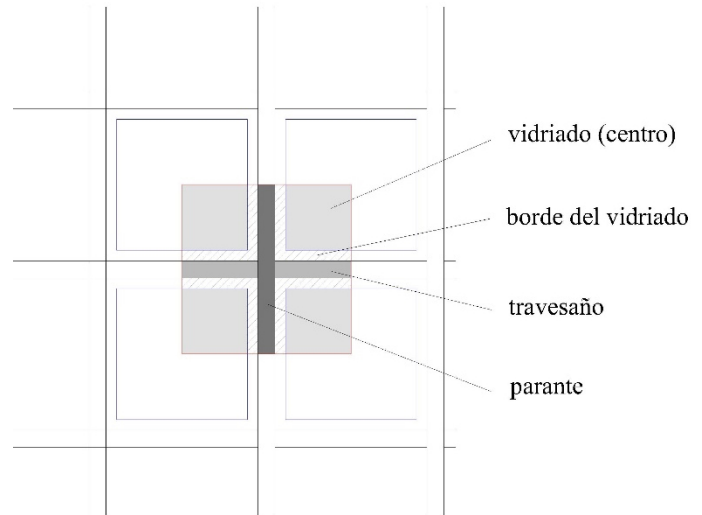


Figura 7. Módulo base del sistema de fachada integral, donde se identifican las diferentes partes que lo componen. Fuente: Elaboración de las autoras.

To	Tro	hco	Ti	Tri	hci
12.9°C	12.9°C	9.33 W/m <sup>2</sup> K	21°C	21°C	3.29 W/m <sup>2</sup> K

Tabla 1. Condiciones ambientales utilizadas para el cálculo de la transmitancia térmica, donde  $T_i$  y  $T_o$  son las temperaturas del aire, interior y exterior, respectivamente;  $T_{ri}$  y  $T_{ro}$  son las temperaturas medias radiantes, interior y exterior, respectivamente; y  $h_{ci}$  y  $h_{co}$  son los coeficientes convectivos, interior y exterior, respectivamente. Fuente: Elaboración de las autoras, 2019b

Material	Conductividad (W/mK)
Aluminio	199
Burlete EPDM	0,25
Silicona	0,35 (Carbary y Kimberlain, 2020)

Tabla 2. Valores de conductividad considerados en esta investigación. Fuente: Elaboración de las autoras.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### TRANSMITANCIA TÉRMICA DE LOS PERFILES

Los valores de transmitancia térmica  $U_f$  de las secciones simuladas se exponen en la Figura 8. A continuación, se analiza la relevancia de los diferentes parámetros anteriormente destacados.

**Parámetro 1: Largo de columna.** La variación del valor de transmitancia térmica en función del largo de columna se observa en la Figura 9 comparando los valores de  $U_f$  de las secciones P1, P2, P3 y P4. Se observa una diferencia significativa entre la transmitancia térmica de las primeras tres secciones (diferencia absoluta de 1,02 W/m<sup>2</sup>K entre P1



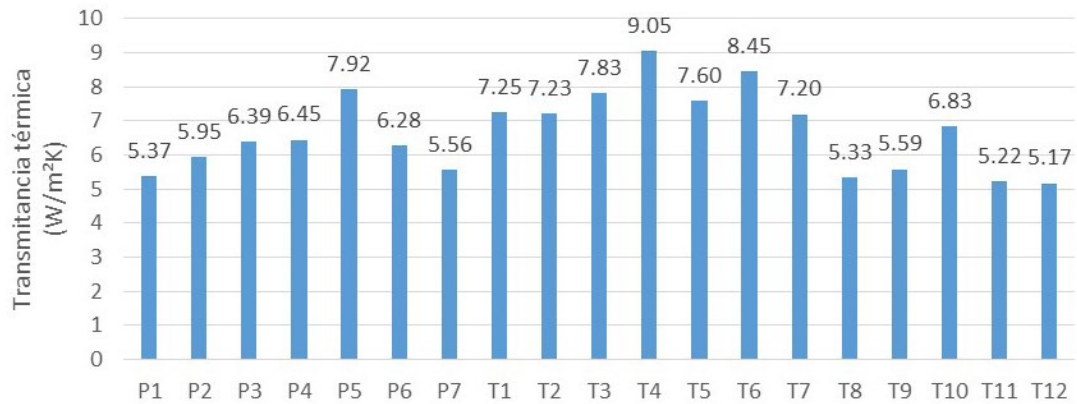


Figura 8. Valores de transmitancia térmica (en W/m²K) de las secciones analizadas. Fuente: Elaboración de las autoras.

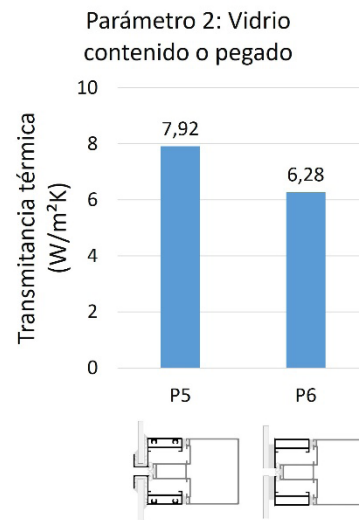
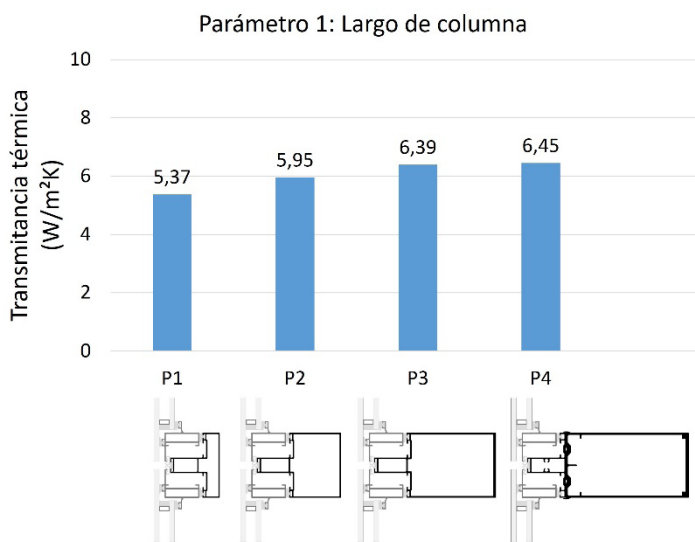


Figura 9. Efecto del largo de columna sobre el valor de transmitancia térmica. Fuente: Elaboración de las autoras.

Figura 10. Efecto del modo de fijación del vidriado sobre el valor de transmitancia térmica. Fuente: Elaboración de las autoras.

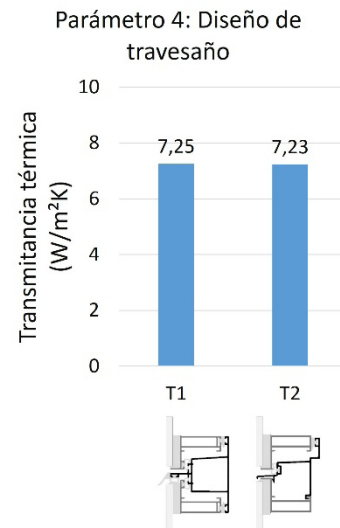
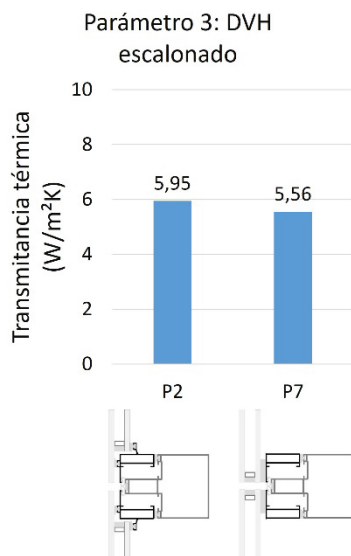


Figura 11. Efecto del DVH escalonado sobre el valor de transmitancia térmica del parante. Fuente: Elaboración de las autoras.

Figura 12. Efecto del diseño de travesaño sobre el valor de transmitancia térmica. Fuente: Elaboración de las autoras.

y P3), mientras que la cuarta (con columna reforzada) presenta un valor de  $U_f$  similar a la sección P3.

**Parámetro 2: Vidrio contenido o pegado.** Comparando los valores de  $U_f$  obtenidos mediante simulación de las secciones P5 y P6 (Figura 10), se evidencia una diferencia importante (1,64 W/m<sup>2</sup>K) entre la transmitancia térmica de las configuraciones de parante con vidriado contenido (sección P5) y pegado (sección P6). La variante con vidriado pegado presenta un mejor desempeño térmico, dado que evita el puente térmico asociado a los contravidrios o al perfil de hoja para vidrio encapsulado.

**Parámetro 3: DVH escalonado.** La comparación entre los valores de  $U_f$  de las secciones P2 y P7 (Figura 11) permite analizar la diferencia en cuanto al flujo térmico entre las configuraciones de DVH escalonado (P2) y DVH pegado (P7) en parantes. El DVH escalonado produce un leve aumento de las transferencias de calor (0,39 W/m<sup>2</sup>K).

**Parámetro 4: Diseño de travesaño.** Como se puede advertir en la Figura 12, las dos variantes de travesaño T1 y T2 (respectivamente, con cavidad y con bota aguas) tienen el mismo valor de transmitancia térmica (diferencia despreciable de 0,02 W/m<sup>2</sup>K). Por consiguiente, este parámetro no es relevante.

**Parámetro 5: Espacio intersticial horizontal.** La comparación de los valores de  $U_f$  de las secciones T2 a T10 (Figura 13) revela que el diseño del espacio intersticial horizontal entre paños tiene un gran impacto sobre la transmitancia térmica del travesaño (diferencia máxima de 3,72 W/m<sup>2</sup>K).

Los valores mínimos se obtienen en las configuraciones con DVH pegado T8 y T9 (5,33 y 5,59 W/m<sup>2</sup>K, respectivamente), donde el DVH y la cavidad intersticial actúan como ruptura de puente térmico entre el perfil metálico y el exterior de la fachada. La variante T10 con DVH pegado, pero con bota aguas saliente, obtiene un valor de  $U_f$  más elevado (6,83 W/m<sup>2</sup>K) debido al puente térmico que este genera.

Luego, se encuentran las secciones T6 y T7 (7,23 y 7,20 W/m<sup>2</sup>K, respectivamente) que son idénticas a las secciones T8 y T9, pero con simple vidriado pegado (fijo y móvil). Al ser más angosto el vidriado, los perfiles de bota aguas sobresalen al exterior de la fachada y generan un puente térmico, por lo cual los valores de transmitancia térmica aumentan significativamente en relación a las secciones T8 y T9.

Las secciones de travesaños con vidriado contenido (T2 a T5) obtienen valores de transmitancia térmica más elevados que las secciones con vidrio pegado, al igual que en los parantes. Entre las secciones con paño fijo T2 y T4 (7,83 y 7,60 W/m<sup>2</sup>K respectivamente) y las secciones con paño móvil T3 y T5 (9,05 y 8,45 W/m<sup>2</sup>K respectivamente), son las últimas las que registran valores de transmitancia térmica más elevados. En una configuración de fachada con umbral y dintel fijos y paño intermedio móvil, se utilizan simultáneamente las dos variantes de travesaño, por ende, se pueden promediar los

valores de  $U_f$  obtenidos, de lo cual resulta un valor de 8,03 W/m<sup>2</sup>K para el travesaño con DVH contenido, y de 8,44 W/m<sup>2</sup>K para el travesaño con simple vidrio contenido.

**Parámetro 6: DVH escalonado.** En la Figura 14, se comparan las secciones T11 y T12 (travesaños con DVH escalonado, cabezal de paño fijo y de paño móvil, respectivamente) con las secciones T8 y T9 (idénticas, pero con DVH pegado). Sus valores de transmitancia térmica difieren de 0,11 W/m<sup>2</sup>K (T8 – T11) y 0,42 W/m<sup>2</sup>K (T9 – T12). Esta diferencia es poco relevante, al igual que para las secciones de parantes.

**Ancho proyectado de la sección.** La Figura 15 indica los anchos proyectados de todas las secciones simuladas, diferenciadas por el modo de fijación del vidriado. Se observa una correlación entre ambas variables: el ancho es más elevado para la configuración escalonada, intermedio para los vidrios contenidos, y más reducido para los sistemas con vidrios pegados. De esta forma, quedan evidenciadas las diferencias entre estas tres categorías, las que además presentan desempeños térmicos dispares, tanto en las secciones de parantes como de travesaños (parámetros 2 y 5).

## TRANSMITANCIA TÉRMICA DE LA FACHADA

El análisis de las variantes de diseños de perfiles y su impacto en los valores de transmitancia térmica expuesto en el apartado anterior permitió determinar cuáles parámetros son relevantes para establecer rangos de transmitancia térmica de los sistemas de fachada de piel de vidrio.

En cuanto al largo de columna en secciones de parantes, los valores se mantienen en un rango cercano ( $\pm 0,6$  W/m<sup>2</sup>K) al valor de la configuración con columna mediana (P2), por lo cual se utiliza esta sección de perfilería para lo que sigue. Sumado a ello, las dos variantes de diseños de travesaño existentes (parámetro 4) obtuvieron los mismos valores de transmitancia térmica, por lo cual se descartó la variante T1.

Se destacó que las secciones (tanto de travesaños como de parantes) con vidriado contenido obtienen valores de transmitancia térmica más elevados que las secciones con vidrio pegado. Dentro de esas categorías, influye si el vidriado es simple o doble (SV / DVH) y el modo de apertura del paño vidriado (PF / PM). En respuesta a esta observación, por un lado, se simula una sección adicional de parante con DVH contenido (P8). Y, por otro lado, para simplificar el análisis, se promedian los valores de transmitancia térmica de las variantes con PF y PM, considerando que, en una configuración de fachada con umbral y dintel fijos y paño intermedio móvil, se usan simultáneamente las dos variantes de travesaño.

Si bien el DVH escalonado produce solo un leve aumento de las transferencias de calor (entre 0,11 y 0,42 W/m<sup>2</sup>K) con respecto al DVH pegado, a ese fenómeno se suma el aumento del ancho proyectado del parante en un 30%, todo lo cual contribuye a elevar el valor de transmitancia térmica de la fachada completa. Por lo tanto, este aspecto se analiza como categoría separada.

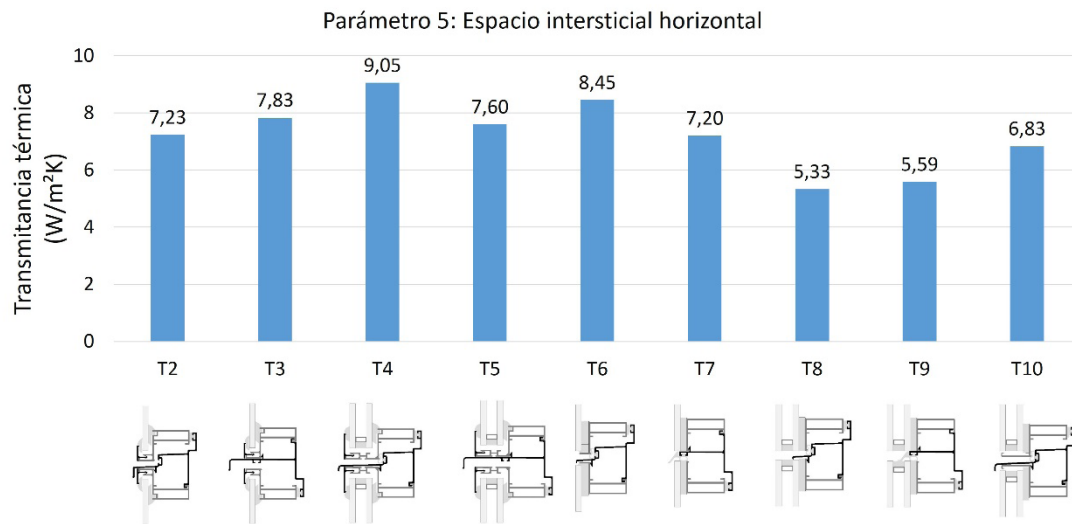


Figura 13. Efecto del espacio intersticial horizontal sobre el valor de transmitancia térmica. Fuente: Elaboración de las autoras.

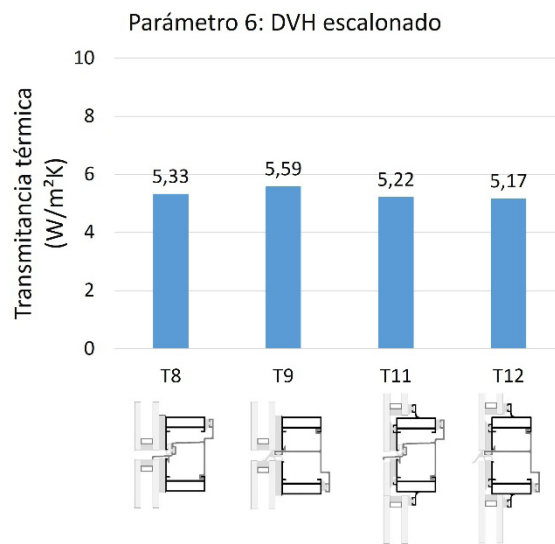


Figura 14. Efecto del DVH escalonado sobre el valor de transmitancia térmica del travesaño. Fuente: Elaboración de las autoras.

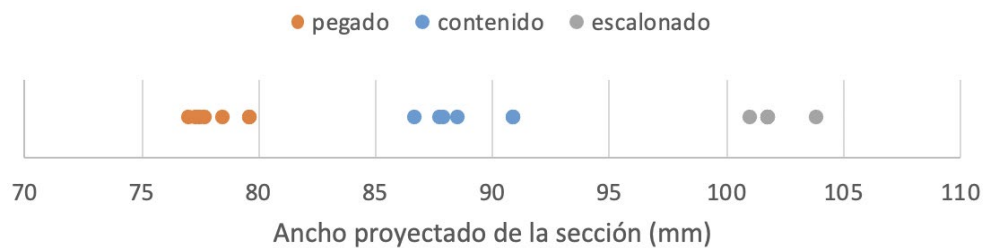


Figura 15. Dispersión de los valores de ancho proyectado de las secciones analizadas, diferenciadas según el modo de fijación del vidriado (pegado, contenido y escalonado). Fuente: Elaboración de las autoras.

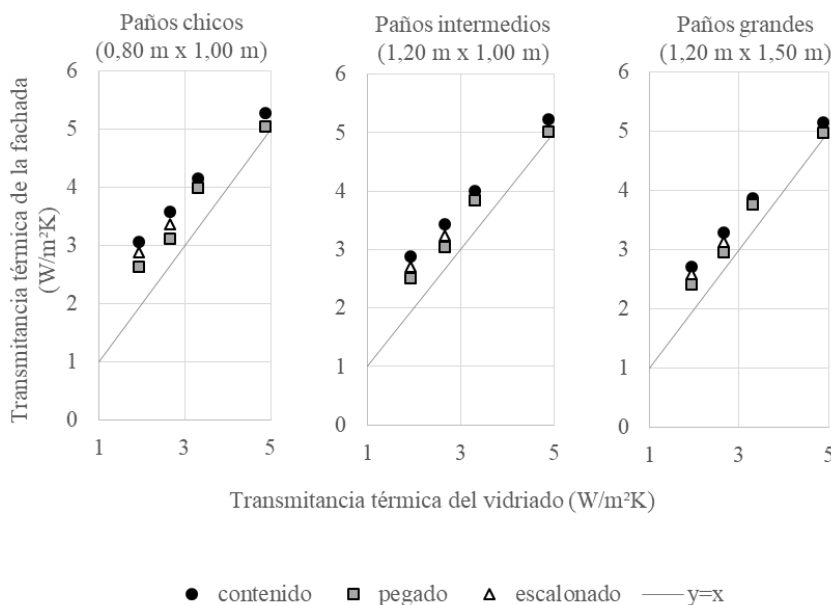


Figura 16. Representación de los valores de transmitancia térmica de los sistemas de fachadas, diferenciados por el modo de fijación del vidrioado (pegado, contenido y escalonado) y dimensiones de paños vidrioados. Fuente: Elaboración de las autoras.

La Figura 16 presenta los resultados de las simulaciones efectuadas, divididos en tres gráficos (uno para cada dimensionamiento de fachada), donde se expresaron los valores de transmitancia térmica de las fachadas con vidrioado contenido, pegado y escalonado, en función del vidrioado empleado. Se graficó, además, la función "identidad" para evidenciar el impacto de la retícula metálica sobre el valor  $U$  total de la fachada. En promedio, el valor de  $U$  supera en un 24% el valor de  $U_g$ .

Aun así, se observa que la transmitancia térmica de los vidrioados es el factor de mayor importancia a considerar para alcanzar determinados rangos de valores de transmitancia térmica para la fachada completa.

El dimensionamiento de los paños vidrioados tiene un impacto variable, siendo la diferencia máxima obtenida del 13%, que corresponde al vidrioado V1 contenido, configuración de mayor contraste de transmitancias térmicas ( $U_g$  más baja y  $U_f$  más elevada). En promedio, se calcula una diferencia del 7% entre las dimensiones extremas estudiadas.

El modo de fijación de los vidrioados tiene un impacto significativo en el caso de las fachadas con DVH (diferencias de 11% a 16% entre las configuraciones con vidrio contenido y pegado). Las variantes con DVH escalonado presentan valores de transmitancia térmica intermedios.

## CONCLUSIONES

El análisis de las variantes de diseños de perfiles para fachadas de piel de vidrio permitió aislar varios parámetros y luego estudiar el impacto de cada uno de ellos en los valores de transmitancia térmica ( $U_f$ ) de las secciones de perfilaría.

Los parámetros de mayor relevancia identificados son el largo de columna y el modo de fijación del vidrioado (contenido o pegado) en secciones de parantes, y el diseño del espacio intersticial horizontal en secciones de travesaños, donde intervienen el tipo de vidrioado (SV o DVH) y su modo de fijación, así como el tipo de abertura (PF o PM).

En cambio, el diseño del travesaño (Figura 4) no es relevante, y la configuración con DVH escalonado no modifica significativamente el valor de  $U_f$  comparado con el DVH común. Sin embargo, se destaca dicha configuración por presentar un ancho de sección superior a las variantes con DVH pegado o contenido, de manera tal que produce una diferencia en la transmitancia térmica del sistema de fachada completa.

A partir de la información recabada en este estudio preliminar, se seleccionó una muestra más reducida de perfiles para llevar a cabo el análisis de los sistemas de fachada completa. Los resultados indican que los valores de transmitancia térmica de las fachadas de piel de vidrio disponibles en Argentina varían de modo significativo (desde 2,42 hasta 5,28  $W/m^2K$ ) dependiendo principalmente de la transmitancia térmica del vidrioado, pero también del modo de fijación del mismo (contenido, pegado o escalonado), así como de las dimensiones de los paños vidrioados.

Los resultados confirman la importancia de disponer de datos de transmitancia térmica de los sistemas de fachadas integrales, ya que utilizar como estimación el valor de transmitancia térmica de los vidrioados conduce a subestimar los flujos térmicos que ocurrirán a través de la fachada (24% más elevados en promedio).

Los aportes de este trabajo brindan una herramienta valiosa a los diseñadores y constructores de edificios, para que puedan tomar decisiones no solo dirigidas por criterios económicos y constructivos, sino también desde la óptica de la sustentabilidad.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ing. Marcos Castagnolo (Mendoglass) y a la Arq. Andrea Santoro (MDT) por sus contribuciones. Fuentes de financiamiento: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, Argentina – Proyecto PICT 2016-1487.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aste, N., Buzzetti, M., Del Pero, C., Leonforte, F. (2018). Glazing's techno-economic performance: A comparison of window features in office buildings in different climates. *Energy Build.* 159, 123–135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.088>

Arnesano, M., Pandarese, G., Martarelli, M., Naspi, F., Gurunatha, K. L., Sol, C., ... y Revel, G. M. (2021). Optimization of the thermochromic glazing design for curtain wall buildings based on experimental measurements and dynamic simulation. *Solar Energy*, 216, 14-25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.013>

Bae, M. J., Oh, J. H. y Kim, S. S. (2015). The effects of the frame ratio and glass on the thermal performance of a curtain wall system. *Energy Procedia*, 78, 2488-2493. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.234>

Bronwyn, B. (2018). Energy and Design Criticism: Is It Time for a New Measure of Beauty? *Architectural Design*, 88(1), 116-121. DOI: <https://doi.org/10.1002/ad.2266>

Cao, X., Dai, X. y Liu, J. (2016). Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy and buildings*, 128, 198-213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089>

Carbary, L. D. y Kimberlain, J. H. (2020). Structural silicone glazing: optimizing future designs based on historical performances. *Intelligent Buildings International*, 12(3), 169-179. DOI: <https://doi.org/10.1080/17508975.2018.1544881>

Cordero, B. (2020). Thermal performance of novel frame-integrated unitised curtain wall. *Journal of Construction*, 14(1), 23-31. Recuperado de [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0718-915X2018000100112&lng=es&nrm=iso](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0718-915X2018000100112&lng=es&nrm=iso)

D'Amanzo, M., Mercado, M. V. y Karlen, C. G. (2020). 10 preguntas de los edificios energía cero: revisión del estado del arte. *Hábitat Sustentable*, 10(2), 24-41. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.02.02>

De Gastines, M. y Pattini, A. (2019a). Modelización de un sistema de fachada integral en herramienta de simulación energética de edificios. En Villalba, A. y Alchapar, N. (Eds.), *VI Congreso Latinoamericano de Simulación de Edificios - IBPSA LATAM 2019* (pp. 330–339). Recuperado de <http://ibpsa.com.ar/wp-content/uploads/2019/12/actas-IBPSA-LATAM-2019.pdf>

De Gastines, M. y Pattini, A.E. (2019b). Propiedades energéticas de tecnologías de ventanas en Argentina. *Hábitat Sustentable*, 9(1), 46–57. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2019.09.01.04>

De Gastines, M. y Pattini, A.E. (2020). Window energy efficiency in Argentina - Determining factors and energy savings strategies. *Journal of Cleaner Production*, 247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119104>

Hamida, H. y Alshibani, A. (2020). A multi-criteria decision-making model for selecting curtain wall systems in office buildings. *Journal of Engineering, Design and Technology*. DOI: <https://doi.org/10.1108/JEDT-04-2020-0154>

Huang, B., Chen, S., Lu, W. y Mosalam, K. M. (2017). Seismic demand and experimental evaluation of the nonstructural building curtain wall: A review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 100, 16-33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.05.025>

Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2002. IRAM 11601. *Aislamiento térmico de edificios. Método de cálculo-Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario.*

Lam, T. C., Ge, H. y Fazio, P. (2016). Energy positive curtain wall configurations for a cold climate using the Analysis of Variance (ANOVA) approach. *Building simulation*, 9(3), 297-310. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-016-0275-6>

Mocerino, C. (2020). High Performance and Intelligence of Glass Technologies in Architecture. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 14(4). DOI: <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2020.04.003>

Saroglou, T., Meir, I. A. y Theodosiou, T. (2020). Improving the Energy Efficiency of a Mediterranean High-Rise Envelope. *CTBUH Journal*, (2). Recuperado de <https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/4301-improving-the-energy-efficiency-of-a-mediterranean-high-rise-envelope.pdf>

Viteri, S. L. (2020). *Piel de vidrio en oficinas en altura, hacia una arquitectura Eco-Tech.* Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de [http://oa.upm.es/57981/1/TFG\\_20\\_Larumbe\\_Viteri\\_Sof%C3%ADa.pdf](http://oa.upm.es/57981/1/TFG_20_Larumbe_Viteri_Sof%C3%ADa.pdf)

Wu, Y. y Flemmer, C. (2020). Glass Curtain Wall Technology and Sustainability in Commercial Buildings in Auckland, New Zealand. *International Journal of Built Environment and Sustainability*, 7(2), 57-65. DOI: <https://doi.org/10.11113/ijbes.v7.n2.495>

Yalaz, E. T., Tavil, A. U. y Celik, O. C. (2018). Lifetime performance evaluation of stick and panel curtain wall systems by full-scale testing. *Construction and Building Materials*, 170, 254-271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.061>







Recibido 26/02/2021  
Aceptado 10/06/2021

# MEJORAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN CALEFACCIÓN. POTENCIAL DE INTERVENCIÓN EN EDIFICIO ESCOLAR EXISTENTE DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN JUAN, ARGENTINA

ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENTS IN HEATING. POTENTIAL FOR INTERVENTION IN AN EXISTING SCHOOL BUILDING IN THE METROPOLITAN AREA OF SAN JUAN, ARGENTINA.

MARÍA GUILLERMINA RÉ

Magister en en Arquitectura en Zonas Áridas y Sísmicas  
Becaria Doctoral CONICET, Docente, Investigadora en Instituto Provincial de Planeamiento y Hábitat, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño Universidad Nacional de San Juan  
San Juan, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0002-3109-7138>  
[guillerminare@gmail.com](mailto:guillerminare@gmail.com)

MARÍA PÍA MAZZOCCO

Arquitecta  
Profesional independiente  
Córdoba, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0002-3403-1353>  
[piamazzocco@gmail.com](mailto:piamazzocco@gmail.com)

CELINA FILIPPÍN

Doctora en Ciencias  
Investigadora Principal  
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)  
La Pampa, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0002-0521-6180>  
[cfilippin@cpenet.com.ar](mailto:cfilippin@cpenet.com.ar)

## RESUMEN

El cambio climático, el constante crecimiento del consumo energético y los altos niveles de emisiones que registra el sector energético, requieren de la implementación de soluciones concretas. La rehabilitación de edificios ofrece una oportunidad significativa para contribuir en este aspecto. El objetivo del presente trabajo es analizar el potencial de intervención en un edificio escolar perteneciente al Programa Nacional 700 Escuelas. Las mejoras en eficiencia energética se evalúan a través de simulación dinámica y se calculan indicadores respecto al consumo anual de energía para calefacción. Los valores para el edificio de referencia son de 74,5 kWh/m<sup>2</sup> año y de 158 kWh/alumno. Con las propuestas de rehabilitación se podrían alcanzar ahorros energéticos de entre 39,7% y 60%. La alternativa R-Media se presenta como la más conveniente al lograr beneficios energéticos del 47%, con menores costos de inversión. Los indicadores de eficiencia energética para dicho conjunto de mejoras son de 39,2 kWh/m<sup>2</sup> año y de 83,1 kWh/alumno. Los resultados alcanzados pueden servir de referencia para la rehabilitación de 71 edificios escolares erigidos en la provincia de San Juan entre los años 2004 y 2015, los cuales responden a una tipología constructiva con similitudes de materialización de la envolvente y configuración funcional.

## Palabras clave

escuelas, rehabilitación energética, eficiencia energía, simulación.

## ABSTRACT

Climate change, the constant growth of energy consumption, and the high levels of emissions recorded by the energy sector, require the implementation of concrete solutions. Building rehabilitation offers a significant opportunity to contribute in this regard. The purpose of this work is to analyze the potential for intervention in a school building from the "Programa Nacional 700 Escuela" (National 700 Schools Program). The improvements in energy efficiency are evaluated through a dynamic simulation and indicators are calculated regarding the annual energy consumption for heating. The values for the reference building are 74.5 kWh/m<sup>2</sup> year and 158 kWh/student. With the rehabilitation proposals, energy savings could be achieved of between 39.7% and 60%. The R-Mean alternative appears as the most convenient one as it achieves energy benefits of 47%, with lower investment costs. The energy efficiency indicators for said set of improvements are 39.2 kWh/m<sup>2</sup> year and 83.1 kWh/student. The results achieved can serve as reference for the rehabilitation of 71 school buildings built in the province of San Juan between 2004 and 2015, which belong to a construction typology with a similarity of materials of their envelope and functional configuration.

## Keywords

schools, energy rehabilitation, energy efficiency, simulation



## INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción y la operación de edificios registran la mayor participación en el uso de energía y emisiones de dióxido de carbono asociadas. Durante 2017, representaron el 36% del consumo de energía final, con una producción de CO<sub>2</sub> del 39% (IEA, 2018). Actualmente, existe un interés creciente de los países en sus políticas de Estado, por mejorar el desempeño del sector edilicio. En Argentina, la Norma IRAM 11900 (2017) constituye un avance en materia de regulaciones, aunque se encuentra limitada al uso residencial.

La rehabilitación energética de edificios se puede lograr a través de la aplicación de estrategias bioclimáticas de diseño, mejoras de las propiedades térmicas de la envolvente, reemplazo de equipos por unos eficientes, y uso de sistemas pasivos o híbridos de acondicionamiento que involucren energías renovables (Esteves, 2017). Asimismo, las mejoras de cerramientos verticales y horizontales, con la incorporación de materiales aislantes, representan una inversión en la calidad de la infraestructura (Andersen, Discoli, Viegas y Martini, 2017; Camporeale, Mercader y Czajkowski, 2017; A. Esteves, M. Esteves, Mercado, Barea y Gelardi, 2018, Kuchen y Kozak, 2020).

El potencial de intervención sobre la envolvente de edificios escolares genera un doble beneficio: mejorar la eficiencia energética y optimizar los niveles de confort térmico. Las escuelas deben garantizar estándares de calidad ambiental interior para que alumnos y docentes puedan desarrollar correctamente los procesos de enseñanza-aprendizaje (San Juan, 2014, Barbosa, De Freitas y Almeida, 2020).

La eficiencia energética en los edificios se mide mediante unidades de consumo por área (kWh/m<sup>2</sup> año). Este indicador permite establecer comparaciones a nivel nacional e internacional. Sin embargo, para edificios escolares tiene debilidades, como la exclusión del uso. Las escuelas están conformadas, como se sabe, por espacios de diversas características. El consumo de energía debe ser definido también con la consideración de la ocupación de los espacios (kWh/alumno). Al adoptar una combinación de ambos indicadores de eficiencia energética se obtiene una imagen más integral (Sekki, Andelin, Airaksinen y Saari, 2016). En particular, un estudio en Brasil (Geraldí y Ghisi, 2020) determinó que el indicador de la intensidad del uso de energía en función del número de estudiantes es más confiable y adecuado para representar el *stock* de edificios escolares.

La evaluación del comportamiento energético de edificios existentes y propuestas de rehabilitación se puede abordar con distintos enfoques complementarios entre sí (Wang, Yan, y Xiao, 2012). En ese sentido, la simulación dinámica es una herramienta favorable para el análisis del funcionamiento de edificios en su etapa post

construcción ya que brinda la posibilidad de identificar los distintos parámetros que afectan el consumo de energía y cuantificar su incidencia en los valores totales (Veloso y Souza, 2019).

Dado este contexto, el objetivo principal del presente trabajo es evaluar energéticamente a través de simulación dinámica el potencial de intervención en un edificio escolar de construcción tradicional, localizado en el Área Metropolitana de San Juan (AMSJ). Los objetivos específicos buscan: primero, generar el modelo termofísico del edificio a partir de la calibración con valores de consumo de energía medidos; segundo, estudiar distintas propuestas tecnológicas y de área colectora de energía solar para disminuir el consumo de energía manteniendo la situación de confort; y, tercero, calcular Indicadores de Eficiencia Energética (IEE).

## METODOLOGÍA

Se trabaja sobre la base de una investigación aplicada, avanzando a través del estudio de caso. Gran parte de la infraestructura escolar existente, se presenta como una oportunidad de revertir el problema ambiental del uso de la energía, si se la considera como redes en lugar de entidades independientes (Boutet, Hernández, Jacobo, 2020). Para el presente estudio se selecciona un edificio escolar representativo por su configuración funcional y tecnología constructiva (Ré, 2017): el Colegio Provincial de Rivadavia (CPR), que pertenece al Programa Nacional 700 Escuelas (PN700E), vigente entre 2004 y 2008, y extendido a través de los programas Más Escuelas, hasta el año 2015. En la provincia de San Juan existen 71 escuelas públicas erigidas en el marco de dichos programas, las cuales podrían ser rehabilitadas energéticamente.

El análisis se aplica a la estación fría, por ser el período crítico de climatización de un edificio escolar, dada su mayor frecuencia de uso. En función del diagnóstico, se elaboran distintas propuestas de mejoras de la eficiencia energética. La evaluación de cada una de ellas se realiza mediante simulación dinámica utilizando el software Ecotect (Autodesk, 2011).

Al edificio existente en sus condiciones originales de envolvente, equipamiento y comportamiento se lo llama "edificio de referencia". Esta expresión es empleada a nivel internacional en investigaciones de *stock* y evaluaciones de propuestas de rehabilitación energética (Attia, Shadmanfar y Ricci, 2020; Geraldí y Ghisi, 2020).

## CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA Y LOCALIZACIÓN

La ciudad de San Juan se ubica a 640 msnm y sus coordenadas geográficas son: 31°32'13" latitud sur y 68°31'30" longitud oeste. Pertenece a la zona

Datos climáticos		Unidad	Invierno	Verano
Temperatura	Media	°C	10,61	25,56
	Máxima media		18,5	33,1
	Mínima media		2,7	18
	Máxima de diseño		-	41,4
	Mínima de diseño		5,6	-
Humedad relativa		%	58	46,7
Precipitación	Media	mm	13	60,2



Tabla 1. Datos climáticos de la ciudad de San Juan. Mapas de localización geográfica y de Zona Bioambiental III-a. Fuente: Elaboración de las autoras en base a datos de la Norma IRAM 11603 (2012). Mapa: Wikipedia (2020).

Variable	Un.	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic
T° media	°C	26,49	26,46	21,59	19,53	15,37	13,16	9,82	12,75	13,88	21,28	23,92	28,09
T° máxima	°C	31,34	31,71	26,25	24,62	20,57	18,31	14,75	18,88	19,35	26,64	29,65	33,23
T° mínima	°C	21,36	21,16	16,89	14,33	10,41	7,83	5,09	6,76	8,51	15,60	17,91	22,47
Humedad relativa	%	45	37	46	46	47	38	44	32	37	34	32	36
Radiación solar	W/m2	311	320	248	206	153	125	126	166	200	281	324	355
Presión atmosférica	kPa	93,73	93,60	93,90	93,94	93,98	94,12	94,27	94,26	94,22	93,81	93,64	93,47
Velocidad del viento	m/s	2,85	2,96	2,99	2,00	2,10	1,94	2,14	2,39	2,99	3,06	3,26	3,32
Punto de rocío	°C	12,60	10,18	8,54	6,93	3,40	-1,67	-2,69	-4,78	-1,42	3,14	4,48	10,55
T° Bulbo húmedo	°C	26,37	25,79	20,66	18,56	14,21	11,02	7,82	10,66	12,07	19,69	22,31	27,36

Tabla 2. Variables climáticas; promedios mensuales año 2013. Fuente: Elaboración de las autoras en base a datos de Pontoriero (2017).

bioambiental III-a, templada calidad, según la clasificación de la Norma IRAM 11603 (2012) para la República Argentina (Tabla 1). La subzona "a" presenta amplitudes térmicas, diarias y estacionarias, iguales o mayores a los 14°C.

Para simular el comportamiento energético del edificio escolar, se elaboró un archivo climático propio del año en estudio, el cual permite un mayor acercamiento a la realidad. La información fue procesada y transcripta al programa Elements (Rocky Mountain Institute [RMI], 2020). Los datos climáticos de la ciudad de San Juan fueron obtenidos con una estación meteorológica ubicada en el Instituto de Energía Eléctrica (Pontoriero, 2017). En la Tabla 2 se puede observar la información introducida al programa.

## CASO DE ESTUDIO

El Colegio Provincial de Rivadavia es una institución de gestión estatal de nivel secundario. La escuela se desarrolla en planta baja, posee una superficie cubierta de 1169,4 m<sup>2</sup> y una superficie calefaccionada de 604,38 m<sup>2</sup>. Las circulaciones son semi-cubiertas, a través de galerías. La tecnología constructiva es de muros de mampostería de ladrillo macizo cocido, con traba de 30cm o 22cm, y terminación exterior de revoque. El cerramiento horizontal superior es de losa de hormigón armado, plana o inclinada

con terminación de baldosa cerámica (sector aulas). La carpintería es corrediza, de marco de chapa de acero y vidrio simple. Las ventanas presentan parasoles en las orientaciones norte y oeste (Figura 1).

En la etapa de diagnóstico se analiza el rango de sombras de 9:00 a 17:00 h, cada 30 minutos, para el día 21 de junio, con el fin de estudiar el potencial de ganancia solar que presenta edificio (Figura 2). Las aulas (todas con orientación norte-sur), poseen ventilación cruzada e iluminación natural. Sin embargo, los parasoles al norte restringen el ingreso solar en invierno al permanecer relativamente cerrados la mayoría del tiempo.

La evaluación térmico-energética de edificios escolares difiere significativamente de otros usos y amerita otros aspectos a considerar, como:

- Ocupación: 285 alumnos distribuidos turno mañana y tarde.
- Densidad de ocupación bruta máxima por aula y por turno: 2.29 m<sup>2</sup>/alumno; valor que corresponde a 24 estudiantes por aula de 55 m<sup>2</sup>.
- Tasa de ventilación por aula, según ANSI/ASHRAE Standard 62.1 (2019): 551 m<sup>3</sup>/h.aula o 23 m<sup>3</sup>/h.alumno.
- Tiempo de uso del edificio: 8 h de lunes a viernes; 6 h los sábados.

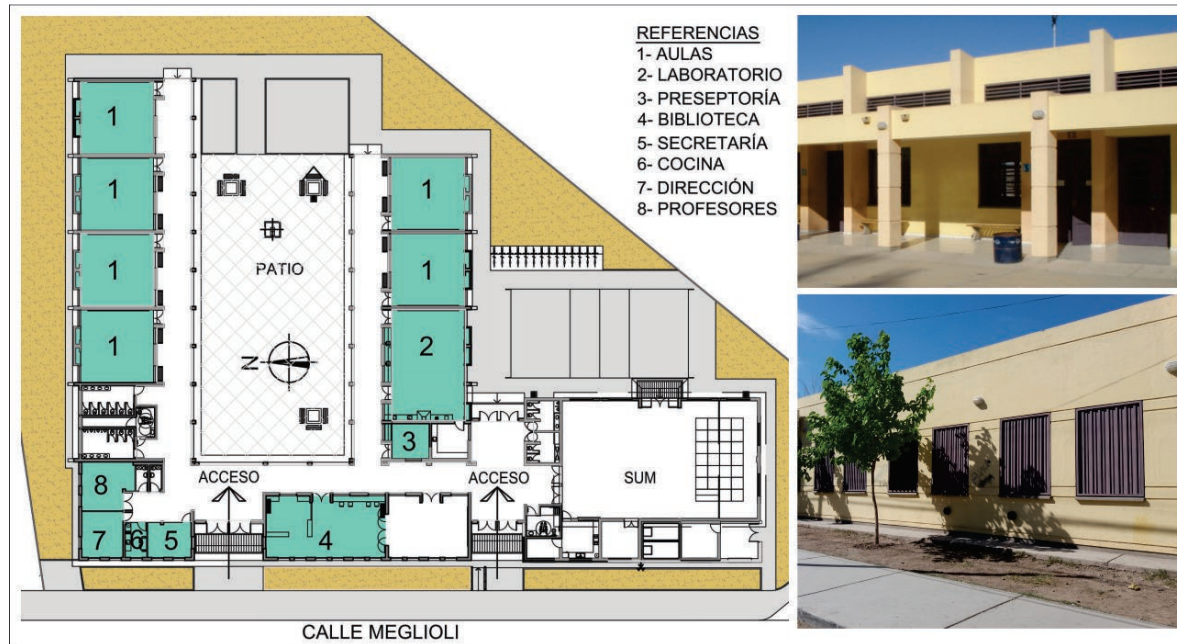


Figura 1. Planta del CPR, con identificación de espacios con calefacción mecánica (en color verde). Fotografías de galería y del frente del edificio con vista de los parasoles. Fuente: Elaboración de las autoras.

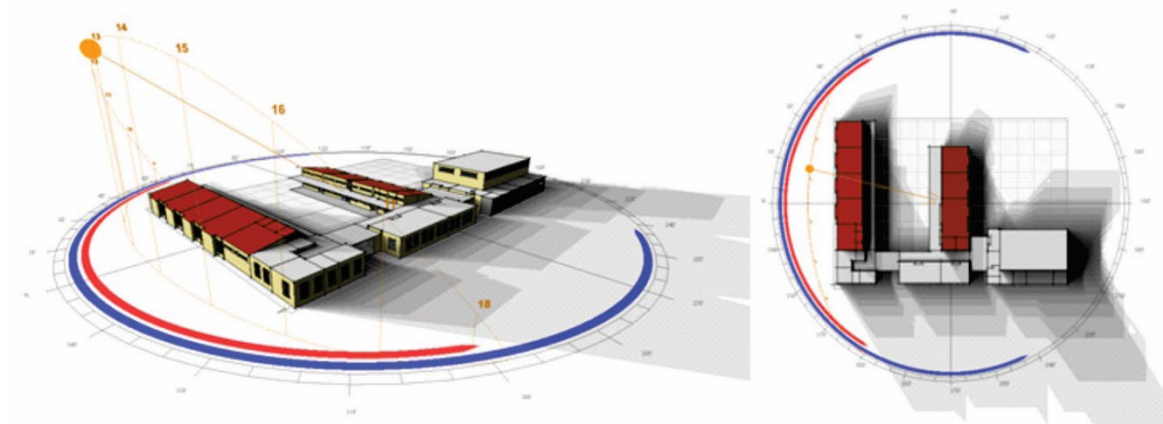


Figura 2. Volumetría y planta del edificio. Análisis de sombras para el 21 de junio. Fuente: Elaboración de las autoras con Ecotect.

## EVALUACIÓN DINÁMICA

Se evalúa el edificio de referencia y las distintas propuestas de rehabilitación a través de simulación dinámica con Ecotect<sup>1</sup>. El software posibilita el análisis integral y en simultáneo de situaciones de asoleamiento, ganancias internas, configuración geométrica y tecnológica de los elementos constructivos. Ecotect permite estudiar el potencial de intervención de soluciones constructivas mediante modificaciones de la condición existente e individualizar diferentes zonas del edificio para conocer su

desempeño energético. Distintos autores que emplean el programa en la actualidad concluyen que son razonables los resultados obtenidos respecto a los datos medidos y simulados (Trisnawan, 2018; Khan, Asif y Mohammed, 2017; Harish y Kumar, 2016).

Para darle confiabilidad y validez a los resultados de la simulación, se lleva a cabo la calibración del modelo computacional a partir de datos empíricos (Godoy-Muñoz, 2015). Se utilizan los registros de consumo energético de

<sup>1</sup> ECOTECT utiliza un cálculo simplificado basado en el Método de Admitancias del Chartered Institute of Building Services Engineers (CIBSE Admittance Method). Aplica la admitancia de los elementos constructivos y los factores de retraso y atenuación térmica de materiales para definir la respuesta en régimen transitorio.

Consumo de energía para calefacción							
Bimestre	1	2	3	4	5	6	Anual
Consumo de gas natural							kWh
Cocina/Horno	292	667	697	712	622	508	3498
Calefacción (estufas TB)	11	3630	19491	13714	7719	–	44565
Total gas	303	4297	20188	14426	8341	508	48063
Consumo electricidad							
Estufa a cuarzo	–	68	141	95	–	–	304
Caloventilador	–	185	378	251	–	–	814
Calefacción eléctrica	–	253	519	346	–	–	1118
Otros usos	7412	10026	7007	7597	6280	6266	44588
Total electricidad	7412	10279	7526	7943	6280	6266	45706
Total calefacción	11	3883	20010	14060	7719	–	45683

Tabla 3. Consumo de gas natural y electricidad del edificio. Discriminación del consumo para calefacción por fuente de energía. Fuente: Elaboración de las autoras.

electricidad y gas natural del establecimiento escolar correspondientes a la auditoría energética del año 2013 (Ré, Blasco Lucas y Filippin, 2016).

El sistema de acondicionamiento adoptado para la simulación es "heating only" (sólo calefacción) en los ambientes con estufas y "full air conditioning" (aire acondicionado completo) para el espacio que cuenta con equipo de Aire Acondicionado (AA) split.

### CONSUMOS ENERGÉTICOS

El análisis energético se centra en la fase de funcionamiento del edificio (energía operativa). Los datos de consumo se obtienen de las facturas de servicio y de la auditoría energética. Los registros de gas natural, en m<sup>3</sup>, se convierten a kilovatios hora (kWh). Se utiliza un factor de conversión de 9,767 kWh/m<sup>3</sup>, que surge de considerar el Poder Calorífico Inferior del gas natural (8400 kcal/m<sup>3</sup>) y una equivalencia de 1 kW a 859,8 kcal/h (Selectra, 2020).

El equipamiento eléctrico para climatización que posee la escuela es: 2 caloventiladores (1500 W), 1 estufa a cuarzo (1200 W) y 1 AA (2150 W) en el sector de administración. En las aulas hay ventiladores de pared (90 W). Los artefactos a gas natural para calefacción son 10 estufas a gas de tiro balanceado de 5700 kcal/h y 4 de 3800 kcal/h.

El consumo de gas para calefacción corresponde a 44.565 kWh/año. La electricidad utilizada para calefaccionar ambientes se calcula en 1.118 kWh, de acuerdo a las potencias y horas de uso de los artefactos (ENRE, 2020). La Tabla 3 muestra cada uno de los consumos por bimestre, según información de las boletas de servicio.

### PROPUESTAS DE REHABILITACIÓN

A partir de lo observado, se elaboran propuestas de rehabilitación energética del edificio escolar como medidas de optimización del comportamiento térmico-energético. Éstas involucran: aumento del área de ganancia solar directa (GSD) en las aulas de la crujía norte; aumento de la resistencia térmica de la envolvente; y mejoras de eficiencia en el sistema de acondicionamiento mecánico.

El aumento de área colectora se aplica a las aulas de la crujía norte debido a su potencial de intervención. Los valores alcanzados representan un 13% del área efectiva de vidrio respecto al área útil del aula. Las ventanas pasan de 5,15 m<sup>2</sup> (edificio de referencia) a 7,04 m<sup>2</sup> (caso rehabilitado). Además, se decide eliminar los parasoles en esta orientación, para que no reduzcan las ganancias solares en invierno.

Las propiedades térmicas de los cerramientos verticales y horizontales se calculan siguiendo los procedimientos de las Normas IRAM 11601 (2002). Los elementos mejorados verifican los valores de transmitancia térmica sugeridos en la Norma IRAM 11605 (2002) en los niveles de confort *A-recomendado* y *B-medio*. Para la rehabilitación de muros se emplea un Sistema de Aislamiento Térmico Exterior (SATE). La carpintería existente se reemplaza por puertas y ventanas que permitan aumentar el área efectiva de vidrio, mejorar las propiedades térmicas y disminuir las infiltraciones de aire. La sustitución está prevista en todos los espacios calefaccionados del edificio. En el nivel A se usan marcos de aluminio con ruptor de puente térmico (RPT) y doble vidrio hermético (DVH 6-12-6 mm). En el nivel B, se opta por marco simple con DVH.

Las mejoras constructivas se agrupan en diferentes propuestas de intervención, las cuales reciben los



Componente tecnológico	Propiedades	Edificio referencia	R-Simple B	R-Simple A	R-Media	R-Óptima
Carpintería		Chapa	Aluminio	Aluminio + RPT	Aluminio	Aluminio + RPT
	Material	V. Simple (6 mm)	DVH (6-12-6 mm)	DVH (6-12-6 mm)	DVH (6-12-6 mm)	DVH (6-12-6 mm)
	U [W/m2.K]	5,66	3,89	2,82	3,89	2,82
Muro 1	Material	Ladrillón + revoque	Ladrillón + revoque	Ladrillón + revoque	EPS 50 mm + revoque	EPS 100 mm + revoque
	Espesor [cm]	30	30	30	35	40
	U [W/m2.K]	2,04	2,04	2,04	0,49	0,28
Muro 2	Material	Ladrillón + revoque	Ladrillón + revoque	Ladrillón + revoque	EPS 50 mm + revoque	EPS 100 mm + revoque
	Espesor [cm]	22	22	22	27	32
	U [W/m2.K]	2,47	2,47	2,47	0,51	0,28
Losa inclinada	Material	Losa H° A°+ mezcla + baldosas	EPS 100 mm + chapa galvanizada	EPS 150 mm + chapa galvanizada	EPS 100 mm + chapa galvanizada	EPS 150 mm + chapa galvanizada
	Espesor [cm]	30 cm	40,2 cm	45,2 cm	40,2 cm	45,2 cm
	U [W/m2.K]	1,35	0,26	0,18	0,26	0,18
Losa plana	Material	Losa H° A°+ mezcla + membrana	EPS 100 mm + mezcla + membrana	EPS 150 mm + mezcla + membrana	EPS 100 mm + mezcla + membrana	EPS 150 mm + mezcla + membrana
	Espesor [cm]	26 cm	39 cm	44 cm	39 cm	44 cm
	U [W/m2.K]	1,43	0,26	0,18	0,26	0,18
<b>U Global [W/m2.K]</b>		<b>2,26</b>	<b>1,54</b>	<b>1,35</b>	<b>0,98</b>	<b>0,71</b>

Tabla 4: Componentes tecnológicos. Materiales, propiedades térmicas. Edificio de referencia y propuestas de rehabilitación. Fuente: Elaboración de las autoras.

siguientes nombres: Rehabilitación Simple (R-Simple) A y B, Rehabilitación Media (R-Media), y Rehabilitación Óptima (R-Óptima). En la Tabla 4 se detalla la conformación de cada conjunto, con sus respectivas transmitancias térmicas (U). Para las renovaciones de aire, se considera una tasa de 2,6; valor establecido para garantizar condiciones de higiene y salubridad (ANSI/ASHRAE, 2019).

Así también, se analizan los costos de inversión y del Período de Amortización (PA), aspectos que contribuyen en la toma de decisiones. Dicha estimación podría presentar variaciones significativas a futuro debido a los altos niveles de inflación que ha evidenciado el país en la última década e, igualmente, ante posibles cambios en la política de gobierno respecto al subsidio de la energía, situación que se da en la actualidad.

La tercera estrategia es la mejora de la eficiencia del sistema de calefacción. Se propone el reemplazo de los

equipos individuales (estufas tiro balanceado) que poseen una eficiencia del 59%, según Norma IRAM 11900 (2017), por un sistema central de calefacción cuya eficiencia estimada alcanza el 65%.

El potencial de ahorro se analiza según dos Indicadores de Eficiencia Energética: kWh/m<sup>2</sup> año y kWh/alumno, para el total del edificio calefaccionado (604,38 m<sup>2</sup>), como para las 4 aulas que integran la crujía norte (220 m<sup>2</sup>). El número de alumnos es de 285 y 192, respectivamente.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3 expone la calibración del modelo computacional del caso de referencia a partir de los registros energéticos. Se compara el consumo real de energía destinada a la calefacción con los valores calculados en la simulación. El gráfico de dispersión arroja

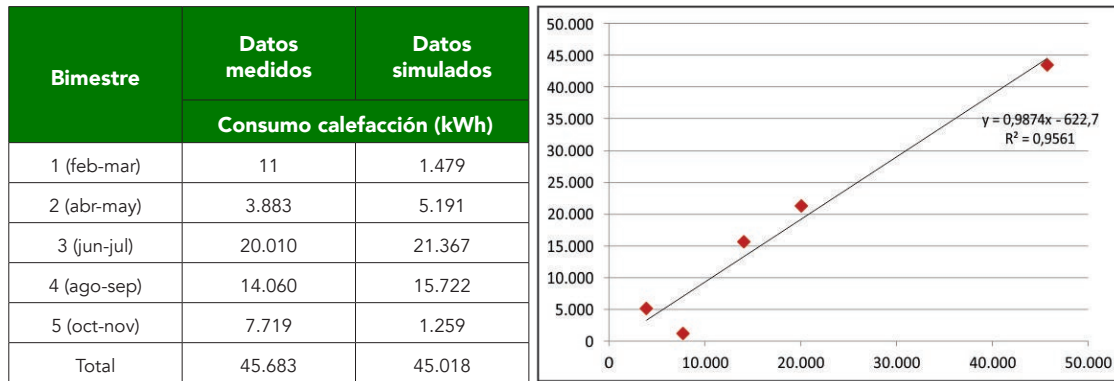


Figura 3: Consumo de energía destinada a calefacción. Datos medidos 2013 vs. simulados. Fuente: Elaboración de las autoras.

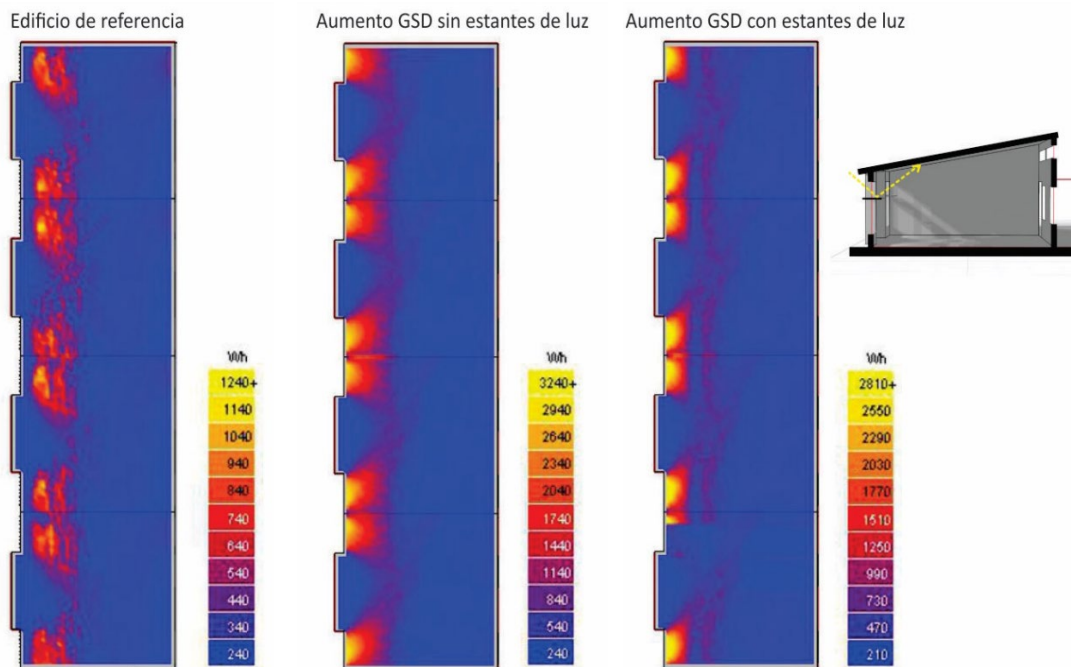


Figura 4. Incidencia de la radiación diaria promedio en aulas de crujía norte. Edificio de referencia y R-Óptima. Fuente: Elaboración de las autoras con Ecotect.

una relación  $R^2 = 0.956$ , estadísticamente significativa ( $P \leq 0.05$ ). Se considera que el modelo obtenido puede ser usado para estudiar el comportamiento de las distintas propuestas tecnológicas.

### MEJORAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

En las aulas orientadas al norte, se analiza la radiación diaria promedio en invierno sobre un plano de trabajo ubicado a 80 cm del suelo (Figura 4). En la imagen de la izquierda, se aprecian las ventanas del edificio de referencia con los parasoles abiertos. Al centro, la Rehabilitación Óptima con aumento de superficie de ganancia solar directa y eliminación de parasoles. A fin de mitigar el deslumbramiento, se colocan estantes de luz fijos, que generen una distribución uniforme en el

espacio áulico (Figura 4, derecha); y para evitar las ganancias de calor indeseadas se genera un alero con la cubierta inclinada, que proporcione sombra en los meses cálidos.

A través de la simulación, se evalúa el posible sobrecalentamiento en verano. Se realiza, entonces, el cálculo del consumo de energía para refrigeración de las 4 aulas a intervenir, con una eficiencia del sistema de 3.6 según Norma IRAM (2017). Los resultados muestran un consumo de 3.871 kWh/año para el edificio de referencia durante la época estival (de octubre a marzo). Los casos rehabilitados consumirían 3.338 kWh/año R-Óptima y 3.360 kWh/año R-Óptima + GSD, confirmando que no se eleva el requerimiento de acondicionamiento mecánico.

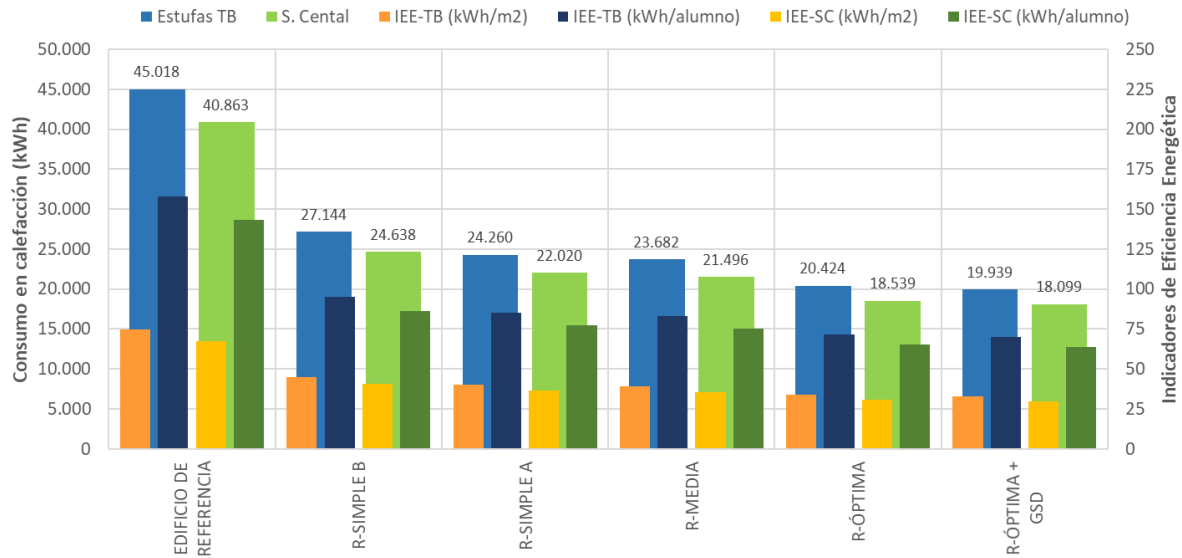


Figura 5. Consumo de energía destinada a calefacción para el edificio de referencia y propuestas de rehabilitación. Fuente: Elaboración de las autoras.

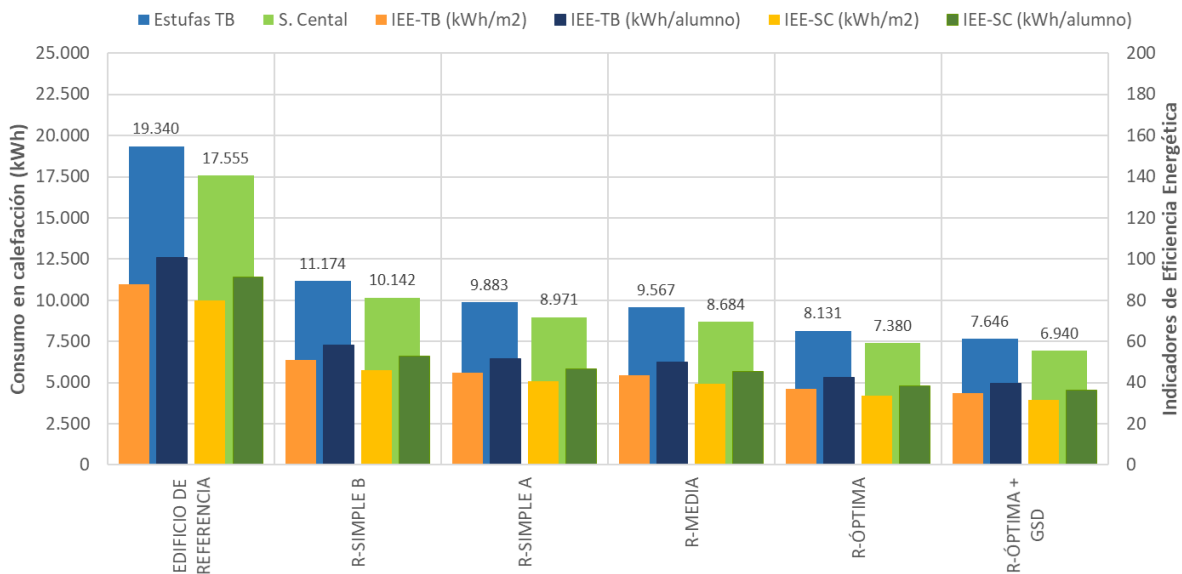


Figura 6. Consumo de energía destinada a calefacción del sector de aulas crujía norte. Fuente: Elaboración de las autoras.

El consumo de energía destinada a calefacción para el edificio de referencia y para las distintas rehabilitaciones se puede observar en la Figura 5. Los IEE para cada caso se ubican en la misma gráfica. En azul se representan los consumos simulados con las estufas existentes de Tiro Balanceado (TB) y en verde con Sistema Central (SC) de calefacción. El edificio de referencia disminuye sus consumos de 45.018 kWh/año a 40.863 kWh/año con el cambio de equipos, representando un ahorro del 9%.

Con el aumento de la resistencia térmica de la envolvente, los consumos energéticos descienden desde 27144 kWh/año (R-Simple B-TB) hasta 18.539 kWh/año (R-Óptima-

SC). Los IEE-TB para estos casos son de 44,9 kWh/m<sup>2</sup> y 95,2 kWh/alumno, y IEE-SC de 30,7 kWh/m<sup>2</sup> y 65,0 kWh/alumno. El modelo R-Óptima con aumento de Ganancia Solar Directa (GSD), y sistema de calefacción central muestra un comportamiento energético de 18.099 kWh/año con una disminución del consumo del 60%. En esta propuesta, los IEE descienden de 74,5 kWh/m<sup>2</sup> y 158 kWh/alumno (edificio de referencia) a 29,9 kWh/m<sup>2</sup> y 63,5 kWh/alumno.

El potencial de intervención de las cuatro aulas al norte se puede observar en la Figura 6. Esta zona podría reducir sus consumos de 19.340 kWh/año a 6.940 kWh/



Variante analizada	IEE-TB	IEE-TB	Consumo	Costo por año	Valor/sup.	Total Rehab.	Total Rehab.	Amortización
Caso	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/alumno	kWh/año	\$	U\$/m <sup>2</sup>	U\$	\$	Años
Edificio ref.	74,5	158,0	45.018	52429				
R-Simple B	44,9	95,2	27.144	31613	108	65.296	6.298.848	55
R-Simple A	40,1	85,1	24.260	28254	153	92.301	8.923.369	67
R-Media	39,2	83,1	23.682	27581	127	76.953	7.406.979	54
R-Óptima	33,8	71,7	20.424	23787	182	109.787	10.614.726	67
R-Óptima+GSD	33,0	70,0	19.939	23222	191	115.364	11.132.611	69

Tabla 5. Comparación de IEE, costos energéticos y valor de la inversión para las propuestas de rehabilitación de la envolvente. Referencias del valor dólar 1U\$ = \$96,5, al 26/05/2021, Banco Nación Argentina. Fuente: Elaboración de las autoras.

Programa Nacional 700 Escuelas en el AMSJ	IEE- superficie	IEE- densidad
Unidades de análisis	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/alumno
Escuela Técnica Obrero Argentino	32,2	81,6
Escuela Provincial Educación Técnica N°5	33,6	101,0
Colegio Provincial de Rivadavia	75,6	160,3
Colegio Secundario Jorge Luis Borges	24,9	61,6
Colegio Superior N°1 Rawson	28,2	35,5

Tabla 6. IEE de Escuelas pertenecientes al PN700E del Área Metropolitana de San Juan. Fuente: Elaboración de las autoras.

año si se aplicaran las tres estrategias propuestas. Los IEE van desde 87,9 kWh/m<sup>2</sup> y 100,7 kWh/alumno (IEE-TB Edificio de Referencia) a 31,5 kWh/m<sup>2</sup> y 36,1 kWh/alumno (IEE-SC R-Óptima + GSD). Los Indicadores de Eficiencia Energética por alumno para el sector aulas poseen valores significativamente menores que aquellos resultantes para la totalidad del edificio. Ellos representan la intensidad de uso diferenciada que caracterizan a los edificios de tipología escolar.

A continuación, las propuestas de mejoras se analizan desde el aspecto económico. La consideración de los costos de la inversión por unidad de superficie (U\$/m<sup>2</sup>) y el Período de Amortización ayudan a la toma de decisiones. La comparación de los IEE con el PA permite identificar que las mejoras R-Simple B y R-Media son las más convenientes al permitir disminuir el consumo energético con una inversión moderada (Tabla 5). La R-Óptima + GSD alcanza el mayor ahorro energético, pero presenta valores elevados de construcción (191 U\$/m<sup>2</sup>), condicionados por el costo de los componentes tecnológicos. Las ventanas de aluminio con RPT, duplican el valor de aquellas que no lo poseen. La alternativa R-Media disminuye la demanda de energía en un 47%, con costos de inversión de 127 U\$/m<sup>2</sup>. Los indicadores de consumo energético en calefacción para dicho conjunto de mejoras son de 39,2 kWh/m<sup>2</sup> año y de 83,1 kWh/alumno.

Se advierte que el PA es elevado en el número de años debido a los bajos costos de la energía a nivel nacional. Tanto el gas natural como la energía eléctrica se encuentran subsidiados. Además, su valor no acompañó el significativo incremento de la inflación anual registrado en los últimos años. Sin embargo, las mejoras de eficiencia energética propuestas en este trabajo se justifican desde una visión ambiental y social, enmarcadas en las políticas de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, y mejoras del confort térmico interior durante la vida útil del edificio. Se considera que, en tipologías escolares, donde se desarrolla la formación y educación de las futuras generaciones, las adecuadas condiciones del espacio áulico y la disminución de la demanda energética superan la visión de negocio respecto al recupero de la inversión.

## PÉRDIDAS Y GANANCIAS DE CALOR

Con el software de simulación también se analizan las pérdidas de energía a través de los cerramientos opacos y de las aberturas, para un día típico del mes de julio. Se comparan, así, los datos de pérdidas de calor por convección y por infiltración de aire entre el Edificio Referencia y la R-Óptima. El estudio revela que las mejoras propuestas logran una disminución del 29,2% y 37,6%, respectivamente.

En cuanto a las ganancias térmicas, se identifica que el aumento del área colectora en el sector de aulas al norte representa una contribución del 6%. Las cargas internas (personas, iluminación, equipamiento) muestran un aporte de calor entre 56% y 61% en las propuestas de rehabilitación.

## INDICADORES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Los IEE del caso CPR se comparan con el comportamiento energético que evidencian otros edificios escolares del PN700E localizados en el Área Metropolitana de San Juan. Los datos de la Tabla 6 expresan los indicadores de consumo energético por unidad de superficie y por alumno, calculados en base a registros reales obtenidos de las boletas de servicios. Se puede observar que la escuela analizada exhibe los mayores valores, lo cual justifica su necesidad de rehabilitación.

Los resultados alcanzados con el presente estudio podrían ser trasladados para mejorar el comportamiento energético y las condiciones de confort térmico interior de otras infraestructuras escolares pertenecientes a los programas nacionales implementados en la provincia desde 2004 a 2015.

## CONCLUSIÓN

El desarrollo del trabajo expuesto permitió analizar el potencial de intervención de distintas propuestas de rehabilitación. Concretamente, la R-Óptima + GSD incorpora mejoras en la transmitancia térmica de la envolvente ( $U$  Global de  $0,71 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), ganancia solar directa en las aulas orientadas al norte y eficiencia del sistema de calefacción. Este conjunto verifica el Nivel A definido por la Norma IRAM 11.605 (2002) y disminuye los consumos energéticos en un 60% respecto al edificio de referencia. La R-Media, con valores  $U$  Global de  $0,98 \text{ W/m}^2\text{K}$ , alcanza el Nivel B de la Norma y evidencia ahorros energéticos potenciales del 47% con estufas TB. Dicha propuesta se posiciona como la alternativa más conveniente tras comparar los consumos energéticos potenciales, los costos de la inversión y el período de amortización.

Los indicadores de eficiencia energética calculados para el edificio rehabilitado, otorgan un rango de consumo energético anual para calefacción desde  $44,9 \text{ kWh/m}^2\text{año}$  a  $33 \text{ kWh/m}^2\text{año}$  y de  $95,2 \text{ kWh/alumno}$  a  $70 \text{ kWh/alumno}$ . Los valores para el edificio de referencia son de  $74,5 \text{ kWh/m}^2\text{año}$  y de  $158 \text{ kWh/alumno}$ , en el modelo de simulación.

Los datos permiten reconocer la importancia de considerar las ganancias por radiación y las internas en espacios densamente ocupados como son las aulas de los edificios escolares, para una mejor aproximación al

valor de la carga auxiliar de calefacción anual, en cálculos analíticos y de régimen estacionario.

Frente a la nueva realidad instalada por la pandemia COVID-19 y ante posibles epidemias que involucren a la climatización respecto a la transmisión de enfermedades, ASHRAE (2020) recomienda, en el caso de las escuelas, aumentar la ventilación de las aulas con un adecuado suministro de aire exterior que facilite diluir los contaminantes. Esta situación insta al sector científico a tener que perfeccionar las consideraciones sobre el consumo de energía.

A su vez, en vista de las nuevas exigencias de salubridad en edificios escolares, se manifiesta la necesidad de revisar y actualizar los Criterios y Normativa Básica de Arquitectura Escolar (Ministerio de Educación, 1998). Entre los diferentes aspectos que ameritan ser examinados, se insiste en los valores recomendados para las renovaciones de aire y ventilación de ambientes, ya que éstos afectan directamente la salud de las personas.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Nacional de San Juan y al IRPHa-CONICET, por la contribución en el financiamiento de la investigación en el marco del proyecto CICITCA 2020 (Código A0948). El desarrollo del trabajo forma parte de la Tesis Doctoral de la autora María Guillermina Ré, del Doctorado en Arquitectura de la Universidad de Mendoza.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andersen, M., Discoli, C.A., Viegas, G.M. y Martini, I. (2017). Monitoreo energético y estrategias de retrofit para viviendas sociales en clima frío. *Hábitat Sustentable*, 7(2), 50-63. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2017.07.02.05>
- ANSI/ASHRAE (2019). *Standard 62.1-2019. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. ASHRAE and the American National Standards Institute.
- ASHRAE (2020). *Reopening of schools and universities*. Recuperado de <https://www.ashrae.org/technical-resources/reopening-of-schools-and-universities>
- Attia, S., Shadmanfar N. y Ricci, F. (2020). Developing two benchmark models for nearly zero energy schools. *Applied Energy* 263, art. 114614. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114614
- Autodesk (2011). *Ecotect Analysis. Sustainable Building Design Software*. Recuperado de [www.autodesk.com/ecotect-analysis](http://www.autodesk.com/ecotect-analysis).
- Barbosa, F.C., De Freitas, V.P. y Almeida, M. (2020). School building experimental characterization in Mediterranean climate regarding comfort, indoor air quality and energy consumption. *Energy & Buildings*, 212. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.109782

- Boutet, M.L., Hernández, A. y Jacobo, G. (2020). Methodology of quantitative analysis and diagnosis of higro-thermal and lighting monitoring for school buildings in a hot-humid mid-latitude climate. *Renewable Energy*, 145, 2463-2476. DOI: 10.1016/j.renene.2019.08.009
- Caporeale P.E, Mercader Moyano, M. P. y Czajkowski, J. D. (2017). Multi-objective optimisation model: A housing block retrofit in Seville. *Energy & Buildings*, 153, 476–484. 10.1016/j.enbuild.2017.08.023
- ENRE (2020). Ente Nacional Regulador de la Electricidad. Ministerio de Desarrollo Productivo. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/enre/uso-eficiente-y-seguro/consumo-basico-electrodomesticos>.
- Esteves, A. (2017). *Arquitectura bioclimática y sustentable: Teoría y práctica de la conservación de la energía. Sistemas solares pasivos y enfriamiento natural de edificios*. Mendoza: FAUD, UM; INHAE, CCT-CONICET.
- Esteves, A., Esteves, M.J., Mercado, M.V., Barea, G. y Gelardi, G. (2018). Building Shape that Promotes Sustainable Architecture. Evaluation of the Indicative Factors and Its Relation with the Construction Costs. *Architecture Research*, 8(4), 111-122. DOI:10.5923/j.arch.20180804.01
- Geraldi, M. S. y Ghisi, E. (2020). Mapping the energy usage in Brazilian public schools. *Energy & Buildings*, 224, 1-17. DOI=10.1016/J.ENBUILD.2020.110209
- Godoy-Muñoz, A. (2015). *Validación y calibración de la simulación energética de edificios La importancia del análisis de sensibilidad e incertidumbre*. Tesis de Doctorado en Sostenibilidad, Universidad Politécnica de Catalunya.
- Harish, V. S. K. V. y Kumar, A. (2016). A Review on Modeling and Simulation of Building Energy Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1272–1292. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.040
- IEA (2018). *Informe Global. Hacia un sector de edificios y de la construcción eficiente, resiliente y con cero emisiones. Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC)*. Coordinado por el Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas. Recuperado de [www.iea.org](http://www.iea.org).
- IRAM (2002). 11605. *Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en Edificios*. Revisión 2002. Instituto Argentino de Normalización.
- IRAM (2002). 11601. *Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo*. Instituto Argentino de Normalización.
- IRAM (2012). 11603. *Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina*. Instituto Argentino de Normalización.
- IRAM (2017). 11900. *Prestaciones energéticas en viviendas. Método de cálculo*. 2° Edición. Instituto Argentino de Normalización.
- Khan, H.S., Asif, M. y Mohammed, M.A. (2017). Case Study of a Nearly Zero Energy Building in Italian Climatic Conditions. *Infrastructures*, 2(4), 19. DOI: 10.3390/infrastructures2040019
- Kuchen, E. y Kozak, D. (2020) Transición energética argentina. El nuevo estándar de eficiencia energética en la evaluación de la vivienda social. Caso de estudio: Vivienda de Barrio Papa Francisco. *Hábitat Sustentable*, 10(1), 44 -55. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.01.04> HS
- Ministerio de Educación (1998). *Criterios y Normativa Básica de Arquitectura Escolar. Dirección de Infraestructura*. Gobierno de la Nación. Argentina.
- Pontoriero, D. (2017). *Banco de datos meteorológicos, 2006 a 2015*. Instituto de Energía Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan.
- Ré, M.G. (2017). Arquitectura escolar. Análisis del Programa Nacional 700 Escuelas en la Provincia de San Juan. *Actas del XXI Congreso ARQUISUR*. Eje 1. Trabajo N°30. En: [https://www.researchgate.net/publication/320300087\\_ARQUITECTURA\\_ESCOLAR\\_ANALISIS\\_DEL\\_PROGRAMA\\_NACIONAL\\_700\\_ESCUELAS\\_EN\\_LA\\_PROVINCIA\\_DE\\_SAN\\_JUAN](https://www.researchgate.net/publication/320300087_ARQUITECTURA_ESCOLAR_ANALISIS_DEL_PROGRAMA_NACIONAL_700_ESCUELAS_EN_LA_PROVINCIA_DE_SAN_JUAN)
- Ré, M.G., Blasco Lucas, I. y Filippín, C. (2016). Evaluación higrotérmica y energética de un edificio escolar perteneciente al Programa Nacional 700 Escuelas, en el Área Metropolitana de San Juan, Argentina. *Hábitat Sustentable*, 6(2), 40-51.
- Rocky Mountain Institute [RMI] (2020). Recuperado de <https://rmi.org/>
- San Juan, G. (2014). *Aprendizaje en las escuelas del siglo XXI. Nota 5. Auditoría ambiental y condiciones de confort en establecimientos escolares*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Sekki, T., Andelin, M., Airaksinen, M. y Saari, A. (2016). Consideration of energy consumption, energy costs, and space occupancy in Finnish daycare centres and school buildings. *Energy & Buildings* 129, 199–206. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.08.015
- Selectra (2020). Factor de conversión del gas natural, de m<sup>3</sup> a kWh. Recuperado de <https://preciogas.com/faq/factor-conversion-gas-natural-kwh>.
- Trisnawan, D. (2018). Ecotect design simulation on existing building to enhance its energy efficiency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 105. DOI:10.1088/1755-1315/105/1/012117
- Veloso, A.C.O. y Souza, R.V.G. (2019). *Peso do sistema de ar condicionado no consumo de energia elétrica em edificacao de escritorios: estudo de caso em Belo Horizonte – Brasil*. International Building Performance Simulation Association. IBPSA.
- Wang, S., Yan, C. y Xiao, F. (2012). Quantitative energy performance assessment methods for existing buildings. *Energy & Buildings*, 55, 873–888.
- Wikipedia (2020). Mapa de Argentina con localización de la provincia de San Juan. Recuperado de [https://es.wikipedia.org/wiki/Provincia\\_de\\_San\\_Juan\\_\(Argentina\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Provincia_de_San_Juan_(Argentina)).





Recibido 10/05/2021  
Aceptado 23/06/2021

# TUHOUSE: PROTOTIPO DE VIVIENDA SOCIAL SOSTENIBLE DE ALTA DENSIDAD PARA EL TRÓPICO

## TUHOUSE: SUSTAINABLE, HIGH-DENSITY SOCIAL HOUSING PROTOTYPE FOR THE TROPICS

CONSTANZA COBO FRAY  
Magister en hábitat residencial  
Docente de tiempo Completo  
Universidad de San Buenaventura  
Cali, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0003-3883-4230>  
[ccobo@usbcali.edu.co](mailto:ccobo@usbcali.edu.co)

OLGA LUCIA MONTOYA FLÓREZ  
Doctora en Arquitectura y Urbanismo  
Docente de tiempo Completo  
Universidad de San Buenaventura  
Cali, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0003-2814-0382>  
[olmontoy@usbcali.edu.co](mailto:olmontoy@usbcali.edu.co)

### RESUMEN

La presente contribución expone los resultados de la investigación desarrollada en el marco del concurso internacional Solar Decathlon LAC 2019, la cual tuvo por objetivo el diseño y construcción de un prototipo de vivienda económica TUHOUSE (Technically Unique House Using Solar Energy), a escala 1:1, capaz de incorporar estrategias sostenibles y bioclimáticas acordes con la región tropical. Para esto se llevó a cabo una metodología de taller de diseño, basada en el trabajo interdisciplinario entre distintas áreas de la Arquitectura y la Ingeniería, pertenecientes a diversos programas de las Universidades de San Buenaventura y Autónoma de Occidente (Cali, Colombia). El principal aporte metodológico fue lograr aquel trabajo interdisciplinario desde las etapas iniciales, lo cual se suma a que estudiantes y profesores participaran en la construcción del prototipo para finalmente verificar su comportamiento con las pruebas del concurso. Entre resultados de la experiencia, se destaca la propuesta urbana con alta habitabilidad y densidad, y la comprobación de estrategias pasivas de diseño enfocadas en la envolvente del prototipo, que pueden ser replicadas en condiciones similares, pero también la importancia del interrogante sobre la validez del modelo de confort térmico propuesto para regiones tropicales.

### Palabras clave

vivienda social, prototipo, sostenibilidad, bioclimática, trópico

### ABSTRACT

This work presents the results of research made within the framework of the Solar Decathlon LAC 2019 international competition, which aimed at designing and building a prototype of a TUHOUSE (Technically Unique House Using Solar Energy) affordable dwelling, at a 1:1 scale, a house that is capable of incorporating sustainable and bioclimatic strategies for the tropical region. The methodology consisted of a design workshop with interdisciplinary work from the different architecture and engineering areas in programs at the Universities of San Buenaventura and Autonoma de Occidente (Cali, Colombia). The main contribution of the methodology was to achieve interdisciplinary work from the initial stages, alongside students and teachers participating in the construction of the prototype, before finally checking its performance using the contest's tests. Among the results that stand out from of this experience, are an urban proposal with high habitability and density, the testing of passive design strategies focused on a prototype envelope that can be replicated in similar conditions, but also the importance of the question about the validity of the thermal comfort model proposed for tropical regions.

### Keywords

social housing, prototype, sustainability, bioclimatic, tropics



## INTRODUCCIÓN

El prototipo TUHOUSE es producto de una reflexión académica sobre el papel que cumple la vivienda social en la constitución del hábitat residencial y en su compromiso con el mejoramiento del medio ambiente y de diferentes ámbitos de la calidad de vida. TUHOUSE propone un modelo de vivienda social replicable, flexible y adaptable a diferentes contextos y a diferentes poblaciones. El concepto de sostenibilidad y las estrategias bioclimáticas se relacionan directamente con las decisiones urbano-arquitectónicas, en la medida en que la propuesta incorpora criterios de sostenibilidad, implementando agricultura urbana y sistemas de compostaje en los espacios comunes, favoreciendo así la conformación de comunidad y contribuyendo a generar seguridad alimenticia e ingresos adicionales para las familias.

Las edificaciones se proponen en un sistema estructural y constructivo de grandes piezas de prefabricados en Concreto con Agregados Reciclados (CAR), lo que busca sustituir la explotación de materias primas no renovables y disminuir el impacto de los Residuos de Construcción y Demolición en el paisaje (Bedoya y Dzul, 2015). En Colombia se usan una variedad de materiales para la construcción de vivienda social en serie, de los cuales el 99% se basa en mampostería de alta densidad como el concreto (Giraldo, Czajkowski y Gómez, 2020).

Entendiendo la vivienda social como el bien máspreciado de los habitantes, esta debe solucionar las necesidades de índole sociocultural: dar cobijo (considerando distintos modos de vida y costumbres), poder transformarse para acoger los diferentes tipos de familias y su crecimiento, y ser durable (la vivienda es para toda la vida, es la herencia de la familia). Pero también debe contemplar necesidades de índole económica: valorización de la vivienda, rentabilidad y generación de ingresos extras, entre otras.

Además de los compromisos propios de la disciplina, hoy en día la Arquitectura también tiene compromisos con el cuidado del medio ambiente, la conservación del planeta, la eficiencia energética y el confort. Sin embargo, algunas viviendas de interés social en Cali exhiben un paisajismo pobre y carecen de estrategias bioclimáticas, alcanzando temperaturas hasta de 49°C en su interior (Gamboa, Rosillo, Herrera, López y Iglesias, 2011) y, desde luego, un alto desconfort para sus habitantes. Como bien señala Montoya (2014), en general los proyectos presentan baja exploración tipológica y condiciones deficientes en cuanto a su orientación solar, a sus elementos de protección en los espacios comunes, así como a sus fachadas y cubiertas. Desafortunadamente, en la mayoría de proyectos actuales, se evidencia una baja implementación de estrategias bioclimáticas y sostenibles, como correcta orientación, sombreado en fachada, ventilación natural, las cuales quedan reservadas para un menor número de

viviendas correspondientes a otros sectores económicos más favorecidos de la población.

Además, el sector residencial consume alrededor del 20% del total de la energía en el país (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2019) y de ese consumo -dependiendo de la condición económica-, entre el 40% y el 60% se destina a climatizar el ambiente a través del aire acondicionado, la refrigeración y el uso de ventiladores (UPME, 2018).

El prototipo TUHOUSE fue construido por estudiantes y docentes, en escala 1:1, en el marco del concurso Solar Decathlon para América Latina y el Caribe (LAC) 2019, y recoge el aprendizaje realizado por el equipo en la versión anterior (año 2015) con el prototipo MIHOUSE. En dicho prototipo se inicia la exploración arquitectónica y bioclimática del concreto como material de la envolvente (Cobo, Villalobos y Montoya, 2019), y se dan los primeros ensayos en el aprovechamiento y reutilización de las aguas, el manejo de residuos a través de compostera casera y la incorporación de la energía solar a través de paneles solares dispuestos en la cubierta (López y Holguín, 2020). Lo anterior permite presentar al público en general (no científico) alternativas posibles de ser incorporadas, extendiendo el rol de la academia por fuera de los límites de la Universidad. En ese sentido, cabe agregar que el proyecto generó alianzas no solo entre universidades, sino con el sector público y el empresarial.

Es pertinente entonces en esta revisión, remitirse al modelo de confort térmico denominado adaptivo y propuesto por la norma internacional ASHRAE en su última versión (ASHRAE/ANSI, 2017) para edificios ventilados naturalmente. Este modelo liderado por autores como Auliciems (1975) y Nicol, Humphreys y Roaf (2012) y que se basa en el promedio de temperatura ambiente de un lugar, surge como crítica a los rangos establecidos en condiciones controladas, propios del modelo analítico promovido por ASHRAE (ASHRAE, 2005) y retomados para Colombia en la NTC 5316 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y certificación -ICONTEC, 2004). El modelo analítico resulta de investigaciones realizadas en laboratorio en contextos con las cuatro estaciones climáticas (Fanger, 1972; Fanger y Toftum, 2002), por lo que es necesaria su revisión en otros contextos, como los tropicales (Herrera y Rosillo, 2019), tal y como lo evidencian estudios recientes en colegios en el trópico (Zapata et al., 2018)

A continuación, se presentan los aspectos sostenibles y bioclimáticos de la propuesta, como también un análisis de los parámetros exigidos por el concurso (temperatura entre 22°C a 25°C y humedad relativa entre 40% a 60%) para alcanzar el confort térmico, los cuales poco corresponden con la habitabilidad de los espacios ventilados naturalmente durante todo el año.

Parámetro	Valores establecidos
Temperatura ambiente interior (Ta)	22°C a 25°C
Humedad relativa (%)	40% a 60%

Tabla 1. Parámetros térmicos propuestos por el Concurso Solar Decathlon LAC 2019. Fuente: Solar Decathlon (2019).

## METODOLOGÍA

La propuesta urbano-arquitectónica en cuestión surge en el taller de proyectos de cuarto año del Programa de Arquitectura, la cual toma como marco referencial el concurso internacional Solar Decathlon LAC 2019, entidad que promueve la investigación universitaria en temas de vivienda social sostenible, poniendo énfasis en utilización de energías renovables, confort y protección del medio ambiente. El proyecto realizado para el concurso se llamó TUHOUSE y para su desarrollo, de dos años y medio, se conformó un equipo multidisciplinar de estudiantes (50) y profesores (10) pertenecientes a dos universidades de la región (Universidad San Buenaventura-Cali y Universidad Autónoma de Occidente) con conocimientos complementarios en áreas de arquitectura bioclimática, hábitat, agricultura urbana, medio ambiente, sostenibilidad, energías renovables. Ello permitió no solo abarcar todos los temas solicitados por el concurso, sino abordarlos de manera innovadora a través de una mirada interdisciplinaria (Baumber, Kligyte, Bijl-Brouwer, Van Der y Pratt, 2020; Herrera, Rey, Hernández y Roa, 2020).

Las etapas principales de trabajo fueron: a) fundamentos urbanos y arquitectónicos acordes con el lugar y la población; b) simulación térmico-energética; c) costos; d) prefabricación y construcción de un prototipo de vivienda a escala 1:1; y, e) monitoreo y verificación del funcionamiento de las estrategias.

Metodológicamente, para la fase de diseño, la propuesta se desarrolló en un taller-laboratorio de investigación aplicada que integra lo proyectual, lo sostenible y lo bioclimático, alternando los procesos de diseño con la verificación a partir de simulaciones en softwares (como Formit y Design Builder) y observaciones en el laboratorio de bioclimática (heliódón y mesa de humo). Una vez que el prototipo fue construido en una fase posterior, se realizaron una serie de mediciones en sitio. Esta metodología, propia del proceso bioclimático (San Juan *et al.*, 2013) que incorpora análisis bioclimático, dimensionamiento inicial y final y mediciones para contrastar hipótesis, resulta ser muy enriquecedora en el proceso de aprendizaje de los estudiantes, ya que pasa del diseño convencional al diseño energéticamente optimizado (Montoya, 2020) y trasciende el aprendizaje en el aula al originar la posibilidad de confrontar los conocimientos recibidos con el hecho real y de verificar los resultados.

Después de que se elaboró el prototipo en el lugar determinado por el concurso, denominado Villa Solar, se realizaron mediciones interiores continuas de temperatura ambiente (°C), humedad relativa (%), calidad de aire (CO<sub>2</sub>), iluminancia (lux) y generación de energía con equipos especializados dispuestos por el mismo concurso. Además, se hicieron mediciones puntuales sobre elementos característicos de la envolvente, al exterior y al interior, con termómetro infrarrojo marca Nubee. El consumo de energía (kWh) se midió a través de tareas específicas en el prototipo, que implicaran el uso de aparatos y electrodomésticos. Los parámetros acústicos, como el nivel de presión sonora (dB) y el tiempo de reverberación, se midieron en un día específico por parte de los organizadores con equipos especializados. En cuanto a confort térmico se refiere, se requería alcanzar los valores indicados en la Tabla 1.

Para el análisis de confort térmico, se comparó el rango propuesto por la competencia con el rango propuesto por el modelo adaptativo (ASHRAE/ANSI, 2017), indicado en la Ecuación 1, así:

$$T_{acep} = 0.31 * T(pma (out)) \pm 17.8 \pm T_{lim} \quad (1)$$

Donde:

T<sub>acep</sub> = Temperatura aceptable

T(pma(out)) = Promedio de temperatura exterior

T<sub>lim</sub> = Límites de Temperatura, los cuales pueden ser de  $\pm 3.5$  para una aceptabilidad del 90%. (Nicol *et al.*, 2012).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### LA PROPUESTA URBANA

La propuesta urbana está basada en un diseño sustentable de un conjunto de viviendas sociales en altura, de 5 y 8 pisos, y una densidad de 120 viviendas/hectárea. El conjunto se desarrolla a partir de un sistema urbano de agrupaciones de edificios de viviendas que conforman espacios urbanos públicos y privados, capaz de adaptarse a distintos contextos sociales y climáticos propios de cada lugar. En algunos casos, el espacio común por excelencia es el recinto y en otros, la calle; ambos propicios para fortalecer el encuentro, la identidad y la convivencia. En palabras de Samper: "Lo fundamental no son los diseños propiamente dichos de las viviendas, sino la búsqueda de nuevos patrones urbanos. Trabajar en la búsqueda de nuevos patrones urbanos lleva implícito encontrar nuevas tipologías de viviendas" (2003, p. 20).



Superficie	Expuesta al sol	Bajo sombra
Concreto	49.2°C	28.3°C
Piso adoquín exterior	39.4°C	29.1°C
Tierra con vegetación	35.4°C	27.0°C

Tabla 2. Reducción en temperaturas proyecto TUHOUSE. Fuente: Elaborado por los autores.

La disposición cuidadosa de los edificios (orientación, distanciamiento y altura) logra conformar espacios sombreados que, acompañados de vegetación y arborización nativa, permiten la disminución significativa de la incidencia solar, generando un microclima adecuado. Los vientos juegan un papel crucial a la hora de disipar el calor producido por los materiales y por los mismos elementos del proyecto. La sucesión de espacios amplios (recintos) y espacios estrechos (calles y accesos) produce el llamado “efecto Venturi” que, junto a la presencia de fachadas verdes en los lugares estrechos, logra un enfriamiento pasivo de los vientos que ingresan a las agrupaciones. Todas son estrategias para el clima cálido de la ciudad de Cali recomendadas por autores emblemáticos (Olgay, 1963) (Figura 1). Según las mediciones tomadas *in situ*, estas estrategias logran disminuir las temperaturas hasta en 10 grados (Tabla 2).

El conjunto de vivienda cuenta, además, con un equipamiento cultural, educativo y productivo; un sistema de movilidad en bicicleta conectado a la red de ciclo-rutas de la ciudad; y un sistema de huertas urbanas productivas y árboles frutales, que generan ingresos adicionales a los habitantes del conjunto y propician calidad ambiental. En el entendido de que la calidad de vida no se limita exclusivamente a la habitabilidad al interior de la vivienda, se busca minimizar posibles impactos negativos y promover el uso sostenible de espacios comunes (Cobo et al., 2019) (Figura 2).

### LA PROPUESTA ARQUITECTÓNICA Y SOSTENIBLE

Esta propuesta considera que la vivienda social debe cumplir con 4 condiciones básicas para ser habitable y sustentable: la vivienda debe ser progresiva y productiva (Samper, 2002), además de replicable y flexible. Principios fundamentales que permiten el libre desempeño de los modos de habitar de las diferentes familias. Los espacios de la vivienda deben posibilitar adecuarse a las necesidades cambiantes de la familia, tal y como lo propone el equipo AURA (Universidad de Sevilla, España y Universidad Santiago de Cali, Colombia), el cual implementa sistemas modulares progresivos y espacios flexibles determinados por el mobiliario (Herrera, Pineda, Roa, Cordero y López, 2017). Y no como ocurre con las ofertas actuales en donde las familias se deben adecuar a la vivienda. A fin de alcanzar esta cualidad, las viviendas deben ser

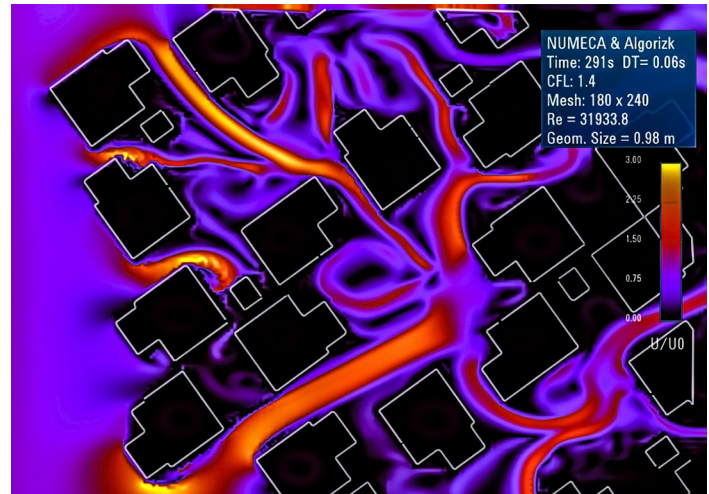


Figura 1. Comportamiento de los vientos. Wind Tunnel. Fuente: Elaborado por los autores.



Figura 2. Imagen del espacio público del conjunto. Fuente: Elaborado por los autores

planteadas desde el principio para ser susceptibles a las ampliaciones y remodelaciones que la familia considere necesarias y para que, incluso, puedan convertirse en una fuente de ingresos, en viviendas productivas. Se trata de principios que se pusieron a prueba desde la pasada versión del concurso Solar Decathlon, en el año 2015, y que demostraron su factibilidad urbana y arquitectónica como sistema (Cobo et al., 2019).

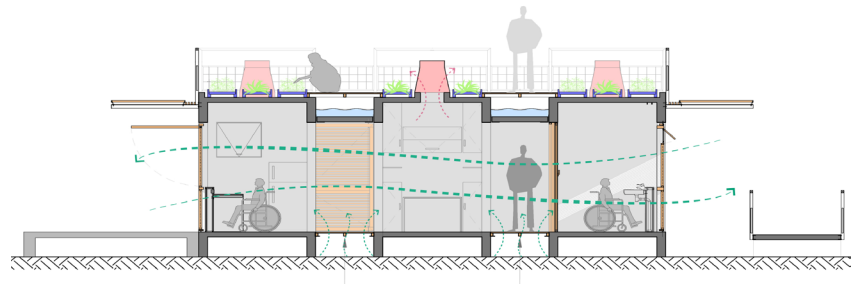
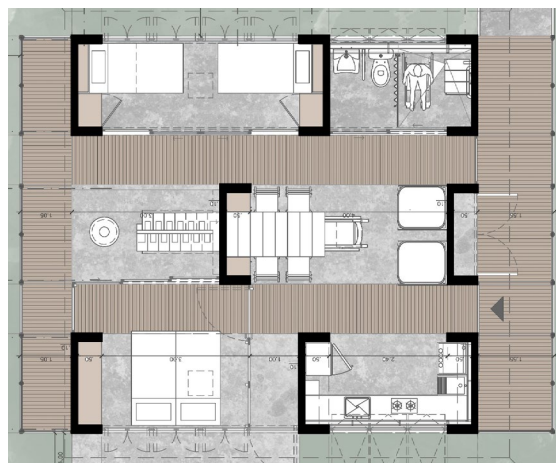
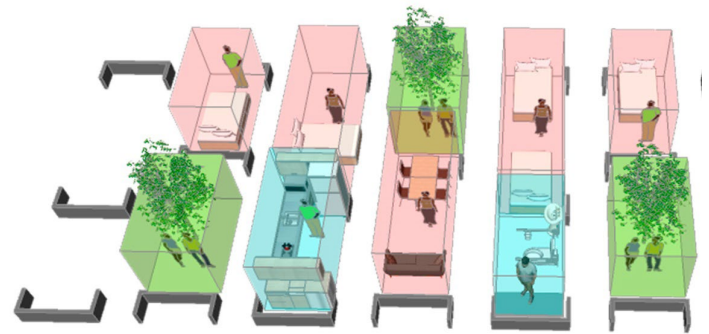
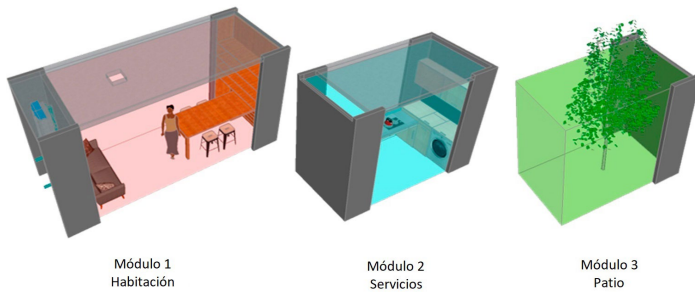


Figura 5. Planta. Fuente: Elaborado por los autores.

Figura 6. Corte. Fuente: Elaborado por los autores.

El proceso proyectual también debe ser sustentable: optimizar procesos de diseño para luego optimizar procesos constructivos y de utilización de recursos. Es por esto que la unidad de vivienda propuesta se concibe como un “lego”, conformado por dos módulos base, en los cuales se define el espacio-forma-estructura en un mismo elemento (Figura 3).

En el módulo de mayor tamaño se disponen las habitaciones (dormitorio, comedor, salón, estudio) y en el módulo pequeño, los servicios (cocina, baño, patio). La manera en que estas unidades se ordenan en relación a un sistema de circulación y alrededor de un patio permite conformar variedad de unidades de vivienda, flexibles y progresivas, tanto en su uso como en su construcción, para acoger a diferentes tipos de familias (Figura 4). Esta disposición permite igualmente aprovechar las condiciones ambientales que proporcionan los patios de las casas tradicionales de la región, como sombra, ventilación, humedad y enfriamiento por evaporación (Figura 5), de manera similar a otros prototipos del Solar, como Patio 2.12, el cual retoma la casa tradicional andaluza e incorpora estrategias pasivas que respondan, entre otros factores, al verano caluroso, de forma similar al caso presentado (Terrados, Baco y Moreno, 2015).

Junto con proporcionar cobijo, la vivienda planteada genera alimentos (en su techo y fachadas), confort y energía. La propuesta reutiliza aguas grises y recolecta aguas lluvias; utiliza materiales y tecnología adecuados para el sostenimiento del medio ambiente; es coherente y eficaz en diferentes contextos y afronta los problemas de densidad urbana (Figura 6).

Adicionalmente, se trata de un proyecto autosustentable y eficiente, donde cada elemento que lo compone cumple varias funciones. Las fachadas este-oeste y la cubierta (las más afectadas por la incidencia del sol) se recubren por una envolvente verde que cumple tres funciones principales: aislar la estructura de concreto de la incidencia solar -que constituye una de las principales recomendaciones para el clima tropical (Evans y Schiller, 1994; Konya, 1980)-, producir alimentos y purificar el aire, contribuyendo a la disminución de la contaminación del medio ambiente. El diseño incluye un espacio de transición bioclimático entre el interior y el exterior (Figuras 7 y 8 y Tabla 3), que se asemeja al espacio del zaguán de las casas tradicionales de la región (Herrera et al., 2017).



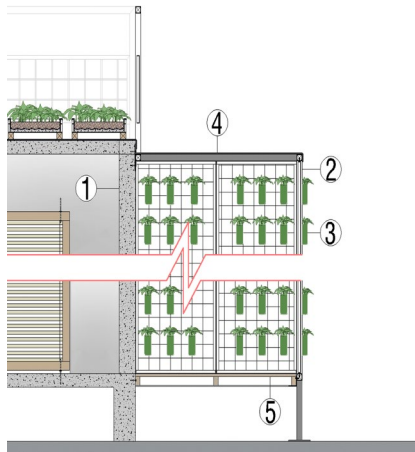


Figura 7. Corte por fachada. Fuente: Elaborado por los autores.



Figura 8. Espacio de acceso, envolvente verde. Fuente: Elaborado por los autores.

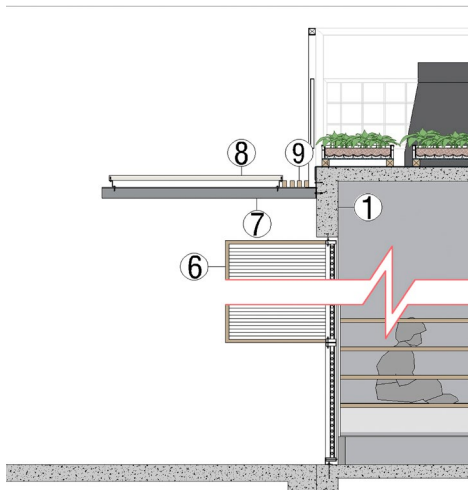


Figura 9. Corte por fachada. Fuente: Elaborado por los autores.



Figura 10. Fachada sur. Fuente: Elaborado por los autores.

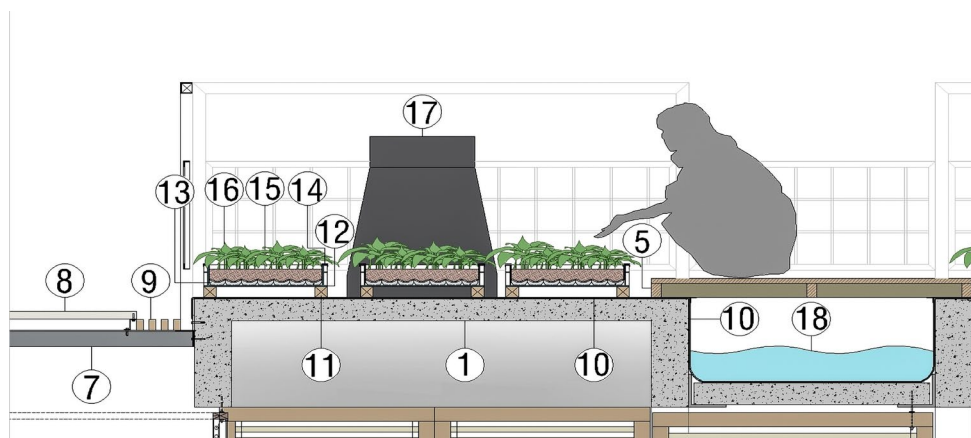


Figura 11. Detalle de cubierta de vivienda propuesta. Fuente: Elaborado por los autores.

Ubicación	No.	Materiales especificación	Espesor (mm)	Conductividad térmica (W/m.k)
Muro	1	Concreto reforzado 3000 Psi	10	0.97
Jaula fachada	2	Malla metálica electro-soldada	5	58
		Bambú	60	0.28
Fachada verde	3	Botellas plásticas PET recicladas	2	0.24**
		Tierra	60	0.8*
		Plantas aromáticas	-	-
Ubicación	No.	Materiales especificación	Espesor (mm)	Conductividad térmica (W/m.k)
Cubierta de Jaula	4	Polisombra negra 35% (LXA) Anti-UV (Polietileno)	1	0.35
Piso en estibas	5	Madera	25.5	0.15
Ventanas Fachada	6	Listón madera	25.5	0.15
		Palos de bambú	60	0.28
Alero	7	Estructura metálica soporte de paneles solares	38.1	0.28
	8	Panel solar	70	1.05
	9	Cuartones de madera en pino radiata	50.8	0.28
Cubierta	10	Membrana impermeabilizante TPO SINTOFOIL SL (EELAB certificado) (etileno-propileno)	1.2	0.24
	11	Escalerillas en madera pino radiata	50.8	0.28
	12	Canastas plásticas recicladas	25.4	0.50
	13	Base de botellas PET personales	2	0.24
	14	Geotextil NT 1600S (polipropileno)	1.5	0.24
	15	Tierra húmeda	150	0.8*
	16	Plantas	-	-
	17	Chimenea solar en lámina metálica (aluminio)	5	204
	18	Canal de agua en concreto	10	0.97

Tabla 3. Conductividad térmica de los materiales utilizados en la construcción del prototipo TUHOUSE. Fuente: IRAM 11601 (2002); Van der Vegt y Govaert (2005).

Las fachadas sur-norte están abiertas para aprovechar la circulación cruzada de los vientos -otra estrategia sugerida para el clima tropical (Olgay, 1963)- y están protegidas por grandes aleros que, además de producir sombra y proteger de la lluvia, soportan los paneles solares que proveen energía solar a la vivienda (Figuras 9 y 10 y Tabla 3).

A la quinta fachada se le debe prestar especial atención, sobre todo en el contexto de Cali, por sus condiciones climáticas cálidas, pero también por las condiciones sociales (Sánchez, 2019). Se diseñó aquí una huerta en cubierta que es aprovechada para recolectar aguas lluvias en dos grandes canales ubicados bajo las estibas de madera removibles y que sirven para la circulación (Figura 11). Esta técnica permite, asimismo, airear la cubierta a través de una cámara ventilada (Tabla 3), como estrategia bioclimática enfocada en la superficie horizontal, la cual

recibe al menos el 50% de la radiación solar en latitudes tropicales (Olgay, 1963).

A partir de los criterios anteriores, se refuerza la hipótesis sostenida por Becker, Goldberger, y Paciuk (2007), quienes plantean que los aspectos de diseño con mayor impacto en la climatización son la orientación y las áreas de aberturas en las fachadas, y la resistencia térmica de los muros y del techo.

### MEDICIONES PARÁMETROS AMBIENTALES Y ENERGÉTICOS

Las mediciones de temperatura ambiente ( $T_a$ ) al exterior arrojan valores de 24.5°C promedio, con máximas que alcanzan 32.4°C y mínimas de 18.2°C. Mientras que la humedad relativa exterior promedio resulta de 74.5%, con valores máximos de 94% y mínimos de 45%. Estos valores resultan consistentes con las condiciones climáticas locales,

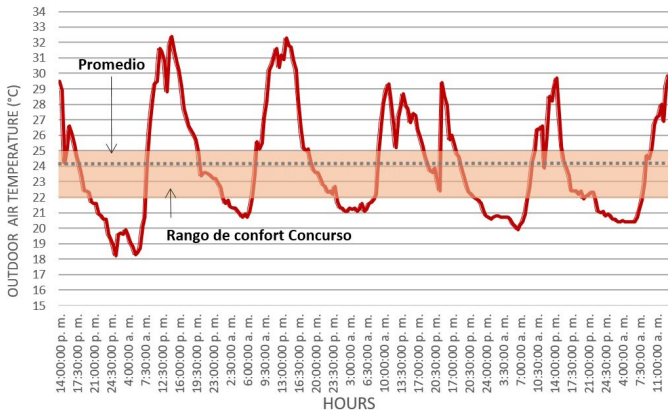


Figura 12. Temperatura exterior. Fuente: Elaborado por los autores.

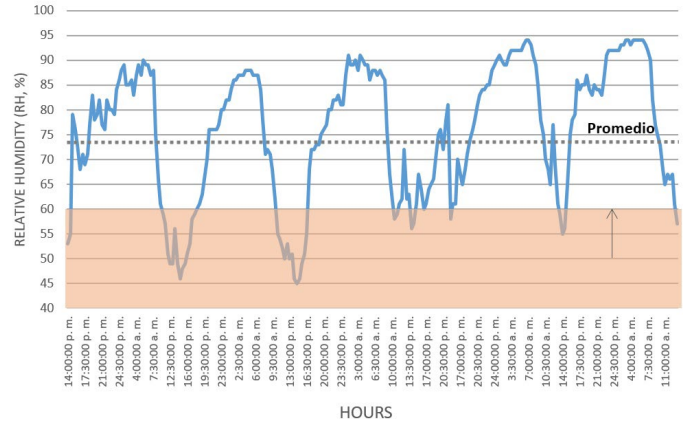


Figura 13. Humedad relativa exterior. Fuente: Elaborado por los autores.

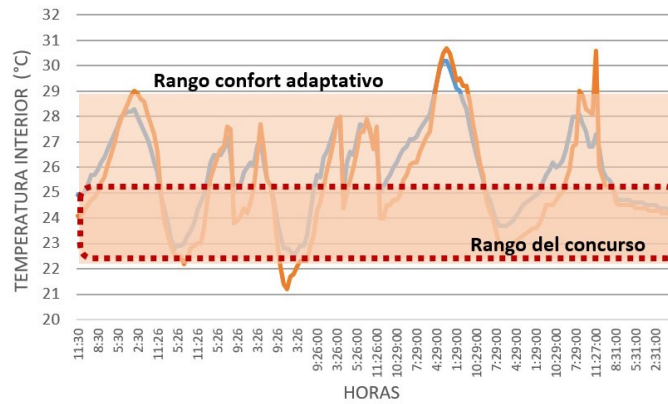


Figura 14. Temperatura al interior del prototipo. Fuente: Elaborado por los autores.

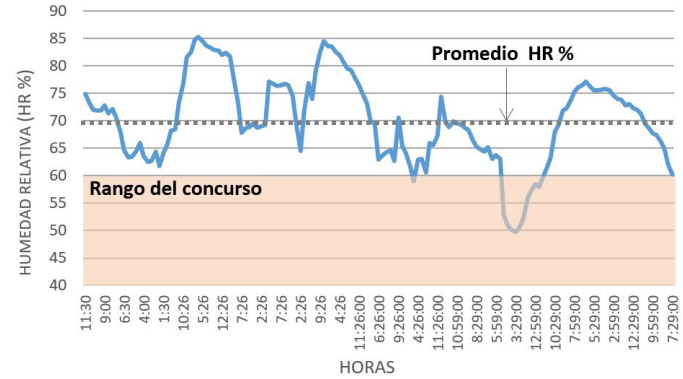


Figura 15. Humedad relativa al interior del prototipo. Fuente: Elaborado por los autores.

las cuales presentan mínimas variaciones durante el año, propias de contextos tropicales y ecuatoriales como el de este estudio.

En las Figuras 12 y 13 se presentan los registros tomados durante los 7 días de competencia. En estas mismas gráficas es posible observar los valores de confort higro-térmico indicados por el concurso, y lo alejados que pueden resultar de las condiciones locales, propias de regiones tropicales.

En cuanto al comportamiento de los espacios al interior del prototipo, se puede observar en la Figura 14 que, a pesar de conservar una temperatura interior promedio de 25°C, son solo las horas de la mañana y la madrugada las que logran estar en el rango de confort propuesto por el concurso. Por otro lado, si el análisis de confort se realiza a partir del rango propuesto por el modelo adaptativo, el cual resulta entre 21.8°C y 28.8°C (véase Ecuación 1), propio de contextos tropicales y de edificios con ventilación natural, vemos que la mayoría de los días y las temperaturas quedan dentro del rango.

En cuanto a la humedad relativa, los valores estuvieron alejados del rango del concurso y cercanos a los registrados al exterior, lo cual corresponde a edificios ventilados naturalmente. Como se presenta en la Figura 15, el promedio de 70 %HR al interior del prototipo estuvo cercano al promedio exterior registrado durante los mismos días (75 %HR).

Enfocando el análisis de las mediciones durante un día típico de la competencia, es posible observar (Figura 16) que, según el rango propuesto por el concurso, el prototipo se encuentra en confort solo en la noche y al inicio de la mañana. Mientras que, bajo el modelo adaptativo, solo entre las horas de la tarde (1:30 a 4:30), con temperaturas cercanas a 29°C, este se escapa del rango confort. Lo anterior tiene implicaciones energéticas importantes, dado que frente a una mayor exigencia de confort -como es el caso del análisis de acuerdo al rango indicado por el concurso- retomada de la norma internacional (diseñada para otros contextos con estaciones climáticas marcadas), se puede asumir un diseño térmico que implique un mayor consumo energético derivado de la necesidad de refrigerar las condiciones internas de la vivienda.



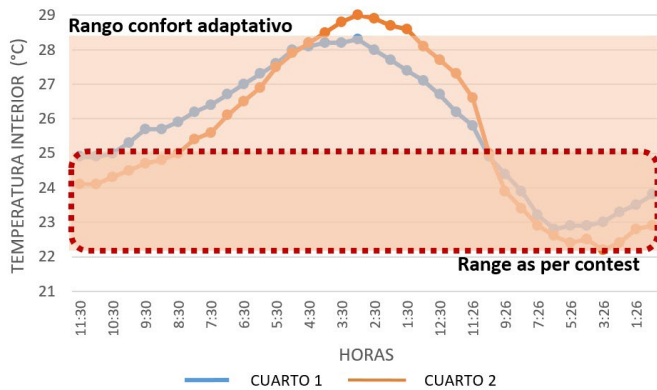


Figura 16. Temperatura día típico al interior del prototipo TUHOUSE.  
Fuente: Elaborado por los autores.

De igual forma, se implementan paneles fotovoltaicos que captan energía solar para transformarla en energía eléctrica, generando viviendas autosuficientes en el consumo eléctrico, con el fin de reducir las emisiones de dióxido de carbono por medio del sistema fotovoltaico que produce anualmente 3578 kWh. Mediante el uso eficiente de la energía eléctrica se reduce el consumo en el proyecto casi un 40%, que es igual a 1166 kWh ahorrados en el año.

El consumo energético diario promedio del prototipo se mantuvo durante los ocho días de la competencia en 58 kWh, respondiendo al objetivo del concurso de mantenerlo por debajo de 70 kWh. Esto se logró gracias a electrodomésticos de alta eficiencia y a bombillas LED para la iluminación nocturna. En cuanto al balance energético, ideal en valor 0kWh, resultó aquí en -3.4 kWh, como diferencia entre la energía exportada a la red (35.98 kWh) y la importada (39.39 kWh), lo que permitió alcanzar el tercer lugar en esta prueba (Macías, 2020).

En términos de sustentabilidad, se plantea el re-uso de aguas grises (previo tratamiento) y el aprovechamiento de aguas lluvias para actividades que no requieran agua potable y que representan un elevado porcentaje en el consumo diario del hogar, tales como el uso de sanitarios y el riego de zonas verdes y jardines. Las aguas grises de la ducha y del lavamanos se recogen, en un dispositivo llamado "ecoguardián" para reusarlas en labores de aseo. También se implementa un sistema de recolección interceptor y tanque de almacenamiento de aguas lluvias. Todo esto con el propósito de disminuir el consumo de agua potable de un 16% a un 40% y la cantidad de vertimiento al alcantarillado. Las anteriores estrategias buscan aminorar los costos del servicio de agua potable y alcantarillado.

El proyecto reduce la generación de residuos hasta su disposición final, realizando una correcta separación de los residuos en la fuente y disponiendo los residuos orgánicos en una unidad de compostaje. A partir de esas dos medidas, se aprovechó alrededor del 80% de

lo generado. Paralelamente, se proponen estrategias para el manejo adecuado de los residuos sólidos generados en cada una de las fases: construcción, operación y demolición.

Como un aporte a la sostenibilidad, el prototipo de vivienda se construye con un sistema de grandes piezas prefabricadas de concreto elaborado con diversos componentes considerados residuos industriales, como cenizas de alto horno o provenientes de la quema del bagazo de caña de la industria de la región, insumos que permiten además la mejora de resistencias en las mezclas utilizadas. Una vez cumplida su vida útil, este concreto no sólo puede convertirse en material de reciclaje para la fabricación de elementos no estructurales, como adoquines para pisos, eventualmente las piezas completas pueden ser reutilizadas en otro tipo de construcción, lográndose, desde este punto de vista, una alta sostenibilidad.

## CONCLUSIÓN

El proceso de diseño bioclimático implementado en el curso transversal e interinstitucional permitió poner a prueba las decisiones de diseño tomadas a través de mediciones y simulaciones, para finalmente aplicar el conocimiento adquirido en la construcción del prototipo en la Villa Solar. Lo anterior fue posible gracias a concursos como el Solar Decathlon, el cual fomenta una dinámica de aprendizaje teórico-práctico, imprescindible para las Facultades de Arquitectura.

En este marco, se verificó el comportamiento exitoso de estrategias arquitectónicas al momento de proporcionar confort: sombreado de las superficies en concreto expuestas a la radiación, constitución de masa térmica especialmente en la cubierta a través de la huerta, envolvente verde, ventilación cruzada, fachada permeable para la ventilación y renovación constante de aire. Estrategias que, ciertamente, fueron exploradas para otros prototipos del concurso a través de interesantes variaciones y aplicaciones.

A través del prototipo expuesto se demostró el buen desempeño térmico del concreto; evidencia relevante si se tiene en cuenta que es el principal material con el que se construye la vivienda social en la actualidad –a través de estrategias como el sombreado y la doble fachada, para lograr una situación de confort en términos del modelo de confort adaptativo.

Como se demostró, los rangos exigidos por el concurso no corresponden a la situación climática tropical de Cali. Esta constatación lleva a la necesidad de revisar dichos rangos para unas próximas versiones de la competencia en entornos tropicales. Los rangos propuestos promueven una mayor exigencia térmica y, por tanto, la presencia de prototipos con acondicionamiento mecánico para alcanzar dichos valores, lo cual es poco común en la vivienda social en ciudades de América Latina.

Por último, cabe mencionar que, para la competencia y los tiempos de ejecución, el prototipo no se pudo construir en CAR. Sin embargo, es un reto de implementación en el futuro. Por otro lado, es importante destacar que resultaron exitosas las medidas orientadas al aprovechamiento de residuos derivados del plástico de un solo uso, gracias a las cuales se generaron insumos para elementos de la envolvente, la siembra y otros componentes arquitectónicos, los que se explorarán a mayor profundidad una vez que el prototipo se convierta en Laboratorio de Vivienda, a cargo de las dos universidades involucradas en esta iniciativa.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a las Universidades de San Buenaventura, Cali y Autónoma de Occidente, como también al concurso Solar Decathlon, los cuales hicieron posible este proyecto. Se expresa especial reconocimiento a todo el equipo TUHOUSE conformado por estudiantes y docentes de las dos instituciones universitarias.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE/ANSI (2017). *Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Pub. L. No. 55-2017, ASHRAE.

ASHRAE (2005). Thermal Comfort. En *ASHRAE Handbook—Fundamentals*.

Auliciems, A. (1975). Warmth and comfort in the subtropical winter: A study in Brisbane schools. *Journal of Hygiene*, 74(3), 339-343. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022172400046854>

Baumber, A., Kligyte, G., Bijl-Brouwer, M. Van Der y Pratt, S. (2020). Learning together: a transdisciplinary approach to student-staff partnerships in higher education. *Higher Education Research & Development*, 39(3), 395-410.

Becker, R., Goldberger, I. y Paciuk, M. (2007). Improving energy performance of school buildings while ensuring indoor air quality ventilation. *Building and Environment*, 42(9), 3261-3276. DOI:10.1016/j.buildenv.2006.08.016

Bedoya, C. y Dzul, L. (2015). El concreto con agregados reciclados como proyecto de sostenibilidad urbana. *Revista Ingeniería de Construcción*, 30(2), 99-108. DOI: <https://doi.org/10.4067/s0718-50732015000200002>

Cobo, C., Villalobos, M. y Montoya, O. L. (2019). *Sustainable architecture and engineering MIHOUSE project*. Santiago de Cali: Editorial Bonaventuriana & Universidad Autónoma de Occidente.

Evans, J. M. y Schiller, S. D. (1994). *Diseño bioambiental y arquitectura solar*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.

Fanger, P. O. (1972). *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*. New York: McGraw-Hill.

Fanger, P. O. y Toftum, J. (2002). Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. *Energy and Buildings*, 34(6), 533-536. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00003-8)

Gamboa, J. D., Rosillo, M. E., Herrera, C. A., López, O. y Iglesias, V. (2011). *Confort Ambiental en vivienda de interés social en Cali*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.

Giraldo, W., Czajkowski, J. D. y Gómez, A. F. (2020). Confort térmico en vivienda social multifamiliar de clima cálido en Colombia. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 23(1).

Herrera, C. A. y Rosillo, M. (2019). *Confort y eficiencia energética en el diseño de edificaciones: un enfoque práctico*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.

Herrera, R., Pineda, P., Roa, J., Cordero, S. y López, Á. (2017). Proyecto Aura: vivienda social sostenible. En *3er Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones Eco-Eficientes* (pp. 686-697). Recuperado de <https://idus.us.es/handle/11441/59216>. Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Arquitectura.

Herrera, R., Rey, J., Hernández, M. y Roa, J. (2020). Student competitions as a learning method with a sustainable focus in higher education: The University of Seville «Aura Projects» in the «Solar Decathlon 2019». *Sustainability (Switzerland)*, 12(4). DOI: <https://doi.org/10.3390/su12041634>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación -ICONTEC (2004). *Norma Técnica Colombiana NTC 5316. Thermal environmental conditions for human occupancy*.

IRAM 11601 (2004). *Aislamiento Térmico para edificios*. Argentina. Recuperado de <http://materias.fi.uba.ar/6731/Tablas/Tabla6.pdf>

Konya, A. (1980). *Design primer for hot climates*. London: The Architectural Press Ltda.

López, Y. U. y Holguín, J. E. (Eds.). (2020). *Water and Energy Engineering for Sustainable Buildings Mihouse Project*. Santiago de Cali: Editorial Universidad Autónoma de Occidente.

Macías, H. (2020). *Reporte final, grupo de energías equipo TUHOUSE*. Santiago de Cali.

Montoya, O. L. (2014). *Habitabilidad en los conjuntos multifamiliares de interés social construidos en Cali entre 1990 y 2010*. Santiago de Cali: Editorial Bonaventuriana

Montoya, O. L. (2020). *La arquitectura del aula para el trópico. Principios de diseño pasivo para edificaciones eficientes*. Tesis de doctorado. Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

Nicol, F., Humphreys, M. y Roaf, S. (2012). *Adaptive thermal comfort: principles and practice*. Londres: Routledge.

Olgay, V. (1963). *Clima y Arquitectura en Colombia*. Barcelona: Gustavo Gili.

Samper, G. (2002). *Recinto urbano: la humanización de la ciudad*. Bogotá: Fondo Editorial Escala.

Samper, G. (2003). *La evolución de la vivienda*. Bogotá: Colección Somos Sur.



San Juan, G., Rosenfeld, E., Santinelli, G., Discoll, C., Viegas, G., Brea, B., ... Rojas, D. (2013). *Diseño bioclimático como aporte al proyecto arquitectónico*. La Plata: Universidad de La Plata.

Sanchez, J. A. (2019). *De la cubierta urbana al prototipo. Proceso evolutivo para el concurso Solar Decathlon Latinoamérica y el Caribe 2019*. Sevilla. Recuperado de <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/89634/Q%20AO%20Tfg%20ETSA%20253.pdf?sequence=1>

SOLAR DECATHLON (2019). *Final rules*. Solar Decathlon para América Latina y el Caribe. Colombia.

Terrados, F., Baco, L. y Moreno, D. (2015). Patio 2.12: Vivienda prefabricada, sostenible, autosuficiente y energéticamente eficiente. Participación en la competición Solar Decathlon Europe 2012. *Informes de la Construcción*, 67(538), 1-11.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA -UPME (2018). *Boletín estadístico de minas y energía*. Recuperado de [http://www1.upme.gov.co/PromocionSector/SeccionesInteres/Documents/Boletines/Boletin\\_Estadistico\\_2018.pdf](http://www1.upme.gov.co/PromocionSector/SeccionesInteres/Documents/Boletines/Boletin_Estadistico_2018.pdf)

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA -UPME (2019). *Plan energético nacional 2020-2050*. Recuperado de [https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN\\_documento\\_para\\_consulta.pdf#search=consumo energia sector residencial](https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consulta.pdf#search=consumo%20energia%20sector%20residencial)

Van der Vegt, A. y Govaert, L. E. (2005). *Polymeren, van keten tot kunststof*. Amsterdam: VSSD.

Zapata, C. M., Viegas, G. M., San Juan, G. A., Ramos, H., Coronado, J. A., Ochoa, J., ..., y Montoya, O. L. (2018). *Comodidad ambiental en aulas escolares. Incidencia en la salud docente y en el rendimiento cognitivo de los estudiantes en colegios públicos de Bogotá, Medellín y Cali*. Santiago de Cali: Editorial Bonaventuriana, Ediciones Unisalle, Universidad Nacional de la Plata. Recuperado de <http://www.editorialbonaventuriana.usb.edu.co/libros/2018/comodidad-ambiental-aulas/index.html>





Recibido 25/02/2021  
Aceptado 24/06/2021

# INDICADOR DE RENDIMIENTO LABORAL DEL USUARIO-TRABAJADOR DE OFICINA EN PERÍODO DE VERANO DE CLIMA TEMPLADO CÁLIDO

OFFICE USER WORK PERFORMANCE INDICATOR IN WARM  
TEMPERATE SUMMER PERIOD

YESICA ALAMINO NARANJO  
Doctora en Arquitectura  
Investigadora adjunta, Instituto Regional de Planeamiento y  
Hábitat, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño  
Universidad Nacional de San Juan  
San Juan, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0002-2325-2206>  
[alaminoyesica@gmail.com](mailto:alaminoyesica@gmail.com)

ALCION ALONSO FRANK  
Doctora en Arquitectura  
Profesora Adjunta -Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat -  
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño  
Universidad Nacional de San Juan  
San Juan, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0002-9227-3449>  
[arqalcionfrank@gmail.com](mailto:arqalcionfrank@gmail.com)

## RESUMEN

El objetivo del trabajo que aquí se presenta fue desarrollar una herramienta metodológica que evaluara el rendimiento laboral de los espacios de oficina durante el período de verano. La herramienta propuesta se tradujo en un indicador de rendimiento laboral óptimo denominado IRLO, que combina variables ambientales de influencia térmica, calidad del aire, visual y acústica. Para su desarrollo, se practicaron mediciones integradas y, paralelamente, encuestas a los usuarios-trabajadores de un edificio de oficinas de la Ciudad de San Juan-Argentina. Los resultados develan los rangos de preferencia de cada variable, reconociendo que en las oficinas de tipología abierta acontece una mayor capacidad adaptativa ambiental que en las de tipología cerrada. Se concluye que el indicador destaca por sentar una base para identificar rendimientos laborales conforme a variables ambientales que deben, en adelante, ser consideradas en fase de diseño.

## Palabras clave

calidad ambiental, edificio de oficinas, tipología

## ABSTRACT

The purpose of this work was to develop a methodological tool to evaluate office space work performance during the summer period. The proposed tool is an optimal work performance indicator called IRLO, which combines environmental variables on thermal, air quality, visual and acoustic influence. Integrated measurements were run for its development alongside surveys to users-workers of an office building in the city of San Juan - Argentina. The results reveal the preference ranges of each variable, recognizing that in open plan offices, there is a greater environmental adaptive capacity than in closed plan offices. It is concluded, that the indicator stands out by providing a basis to identify work performance considering environmental variables that should, in the future, be considered in the design phase.

## Keywords

environmental quality, office building, typology

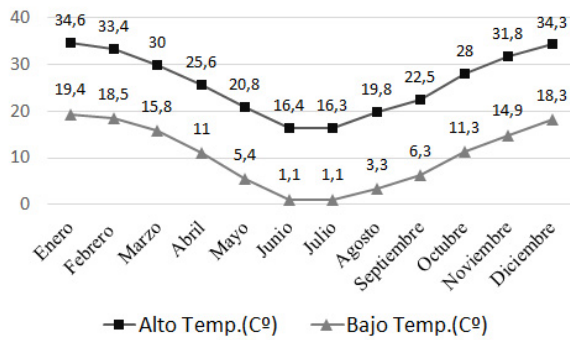


Figura 1. Temperaturas medias máximas y mínimas anuales (Cº)-San Juan, Argentina. Fuente: Elaboración de las autoras en base a datos obtenidos Weather Atlas.

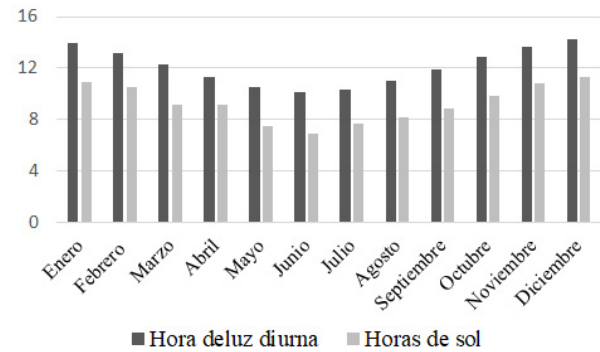


Figura 2. Horas de luz diurna /Horas de sol (anual)-San Juan, Argentina. Fuente: Elaboración de las autoras en base a datos obtenidos Weather Atlas.obtenidos Weather Atlas.

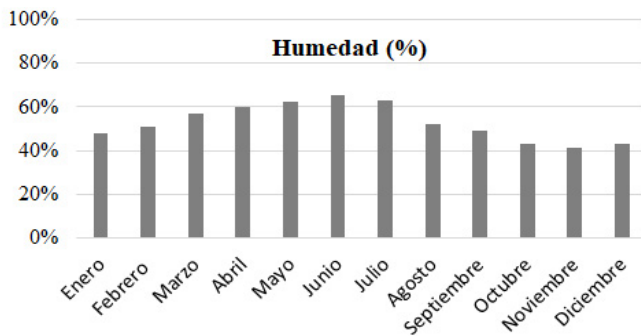


Figura 3. Porcentaje (%) de humedad anual-San Juan, Argentina. Fuente: Elaboración de las autoras en base a datos obtenidos Weather Atlas.

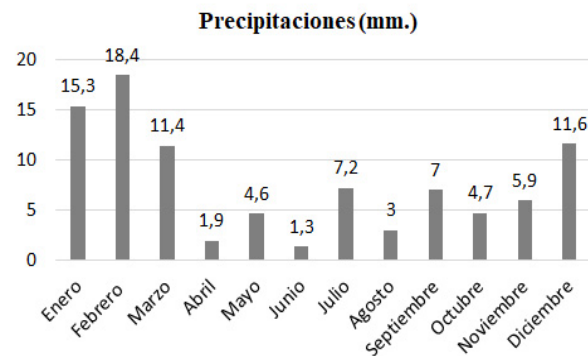


Figura 4. Precipitación media anual(mm)-San Juan, Argentina. Fuente: Elaboración de las autoras en base a datos obtenidos Weather Atlas.

## INTRODUCCIÓN

En el mundo, un quinto de la población habita espacios de trabajo más de 48 horas semanales (Organización Internacional del Trabajo [OIT], 2020). Tales espacios son diversos, dependiendo del tipo de actividad que se desarrolle. En Argentina, el 60% de ellos corresponde al sector oficina (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INDEC], 2010). Estos recintos laborales son concebidos en términos de elementos contenedores de las funciones que desempeñan los usuarios-trabajadores (UT), desestimando la importancia de la calidad ambiental interior (CAI) (Marín Galeano, 2013), que es prioritaria puesto que la configuración espacial modifica los factores ambientales y, consecuentemente, incide en la sensación de confort y rendimiento laboral (RL) del UT (Nag, 2019).

Desde el ámbito científico han surgido avances en la temática que indican las variables ambientales interiores que ejercen mayor influencia sobre la salud y rendimiento (WEI *et al.*, 2020) y que, al mismo tiempo permiten comprender problemas referidos al diseño espacial. Entre ellas destaca la temperatura (Wargocki y Wyon, 2017; Lamb y Kwok, 2016; Maula, Hongisto, Koskela y Haapakangas, 2016), la concentración de CO<sub>2</sub> (Candanedo y Feldheim,

2016; Shriram, Ramamurthy y Ramakrishnan, 2019), el nivel lumínico (Liu, Lin, Huang y Chen, 2017, Yang y Moon, 2019; H. Wu, Y. Wu, Sun y Liu, 2020) y el nivel sonoro interior (Liebl y Jahncke, 2017; Kari, Makkonen y Frank, 2017). Asimismo, existen investigaciones que abordan estas variables de forma holística, buscando encontrar relaciones entre ellas, además de identificar las que ejercen mayor efecto sobre el bienestar de las personas (Haegerstrand y Knutsson, 2019; Lou y Ou, 2019; Shin, Jeong y Park, 2018, Wei *et al.*, 2020). Sin embargo, se desconocen estudios que se aboquen al RL en oficina y a cómo este se ve afectado de forma holística por las mencionadas variables, particularmente, en un clima templado cálido. Por este motivo, es necesario profundizar el conocimiento centrado en estas latitudes, más aún en un período crítico, como es el verano.

La presente investigación tiene como objetivo conocer la relación entre la CAI en oficinas y el RL de los UT, a efectos de determinar rangos de RL óptimo y proceder a su valoración numérica, para lo cual se diseña un Indicador de Rendimiento Laboral Óptimo (IRLO). En este sentido, cabe subrayar que, de la espacialidad arquitectónica, se reconocen dos tipologías claramente definidas como abierta (OA) y cerrada (OC). Las mismas son estudiadas de manera independiente en busca de encontrar posibles similitudes y diferencias.

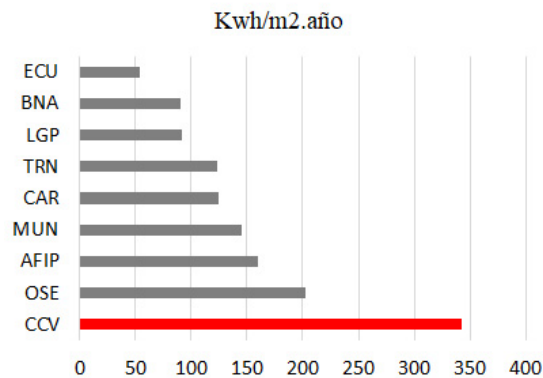


Figura 5. Consumo de energía eléctrica por metro cuadrado de edificios de oficinas emplazados en la ciudad de San Juan, Argentina. Fuente: Ente Provincial Regulador de Energía.

## METODOLOGÍA

La investigación arranca a partir de una aproximación experimental, mediante un trabajo de campo en oficinas en una región de clima templado cálido. Se realizan mediciones integradas sobre variables ambientales, indagando sobre la valoración del RL auto reportado, a través de encuestas de elaboración propia.

De los resultados, se obtienen rangos de mayor y menor influencia sobre el RL por cada variable ambiental analizada, donde los mismos son valorados cuantitativamente y expresados gráficamente. Por último, cada uno de los rangos de variabilidad del rendimiento conduce a la construcción del IRLO, objeto del presente estudio.

## CARACTERIZACIÓN DEL SITIO

La ciudad de San Juan (Argentina) se ubica a 630 metros sobre el nivel del mar, latitud 31,6° Sur y longitud 68,5° Oeste. El clima, según normativa IRAM 1163 (1996), corresponde a uno templado-cálido con grandes variaciones de temperatura (Figura 1), transparencia atmosférica (Figura 2) y baja humedad (Figura 3). El régimen de lluvias es continental, con una frecuencia media baja (Figura 4). Según la clasificación de Köppen (Minetti, Carletto y Sierra, 1986), es de tipo desértico frío (BWk), donde los inviernos son muy fríos y los veranos templados o cálidos. Presenta viento frecuente moderado del sector sudeste y viento característico zonda de tipo seco-cálido, calificado como evento severo del oeste por sus ráfagas intensas (Puliafito, Allende, Mulena, Cremades y Lakkis, 2015). Este último se presenta con mayor frecuencia en agosto y septiembre (Perucca y Martos, 2012).

## OBJETO DE ESTUDIO

La selección del caso de estudio se fundamenta en el análisis del impacto ambiental derivado de su nivel de consumo en la ciudad de San Juan. Por ello, se analizan los consumos energéticos de la población de edificios y su relación por metro cuadrado de superficie útil (climatizada), destinada a espacios de trabajo (oficinas), considerando aquellos que superan los 3 (tres) pisos.

El edificio Centro Cívico (CCV) (Figuras 6 y 7) presenta el mayor consumo de energía eléctrica, con valores superiores a los 340 kWh/m<sup>2</sup> año, motivo por el cual fue seleccionado como caso de estudio. A modo de síntesis, la Tabla 1 expone sus características más relevantes.

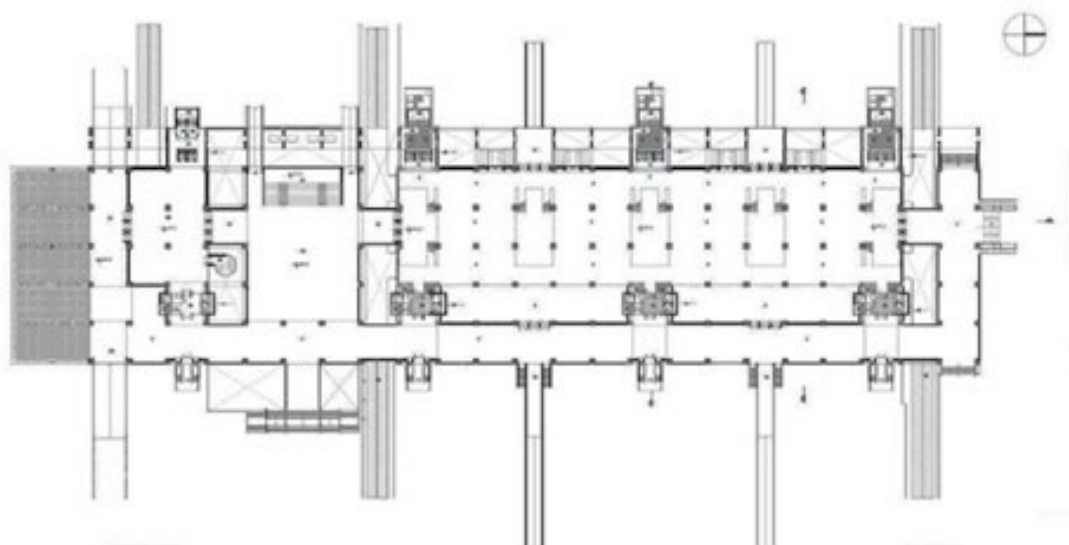


Figura 6. Edificio Centro Cívico-Planta Baja. Fuente: Dirección de Planeamiento y Desarrollo Urbano.





Figura 7. Fachada este Edificio Centro Cívico. Fuente: Elaboración de las autoras.

Superficie total	80.873m <sup>2</sup>
Orientación	Este-Oeste
Superficie de oficina [%]	59%
Sistema de climatización frío / calor	HVAC (Heating-Ventilation-Air-Conditioning)
Consumo [kWh/m <sup>2</sup> .año]	342
Tipo de estructura	Hormigón Armado
Mampostería de cierre	Liviana-Placa mdf
Superficie vidriada por oficina abierta	0%
Superficie vidriada por oficina cerrada	50%
Sistema de iluminación	Circuitos diferenciados por piso (sistema led)

Tabla 1. Caracterización del edificio Centro Cívico Fuente: Elaboración de las autoras.

Caracterización	Oficina cerrada (OC)	Oficina abierta (OA)
Presencia de ventanas	Si	no
Posibilidad de apertura	Si	no
Control de iluminación natural	Si	no
Altura de panel-cerramiento	3,60 m. (100%)	0.80 m - 2.10 m. (25 %)
Factor de ocupación promedio	5,10 m <sup>2</sup> /persona	4,50 m <sup>2</sup> /persona
Capacidad de personas	2 a 6 personas	3 a 11 personas
Actividad	Trabajo interno	Trabajo interno-Atención al público

Tabla 2. Caracterización tipológica de oficinas. Fuente: Elaboración de las autoras.

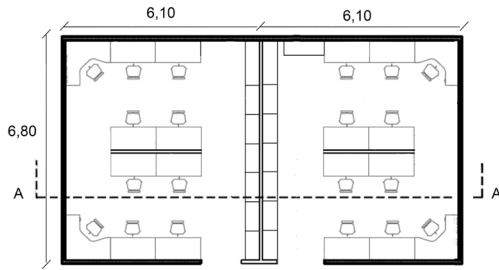


Figura 8. Planta tipo de dos oficinas de tipología arquitectónica abierta (OA). Medidas en metros. Fuente: Elaboración de las autoras.

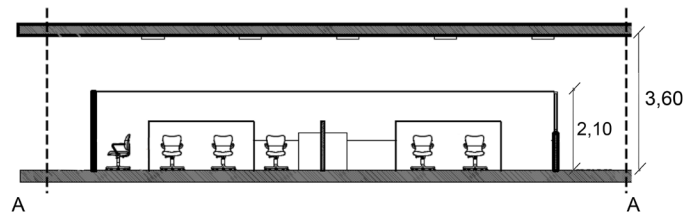


Figura 9. Corte tipo de dos oficinas de tipología arquitectónica abierta (OA). Medidas en metros. Fuente: Elaboración de las autoras.

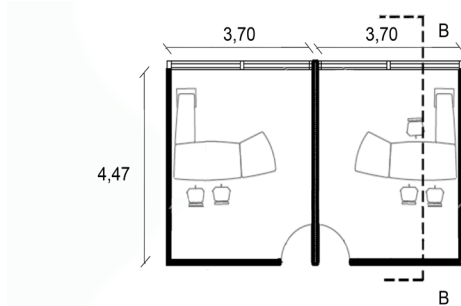


Figura 10. Planta tipo de dos oficinas de tipología arquitectónica cerrada (OC). Medidas en metros. Fuente: Elaboración de las autoras.

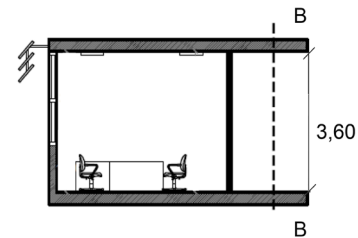


Figura 11. Corte tipo de oficina de tipología arquitectónica cerrada (OC). Medidas en metros. Fuente: Elaboración de las autoras.

## CLASIFICACIÓN DE ESPACIOS DE OFICINA

La variabilidad de la CAI exige distinguir elementos y agruparlos según sus características. Es por tal motivo que en este trabajo los espacios de oficina se distinguen como OA (Figuras 8 y 9) y OC (Figuras 10 y 11). Ambas presentan diferencias destacables que llevan a pensar *a priori* en ventajas de las OC sobre las OA (Pan *et al.*, 2018). La Tabla 2 exhibe las características que permiten establecer los principales contrastes.

## SISTEMÁTICA DE MEDICIÓN

Para el levantamiento de datos se usa la sistemática del tipo "Spot" (focalizada), basada en las técnicas de De Dear (2004) y Kuchen y Fisch (2009) y adaptada al relevamiento de las cuatro variables ambientales. En ese marco, se diseña una unidad móvil de medición (UMM) (Figura 12) que permite examinar 164 espacios, con 636 encuestados durante el período verano.

La UMM se compone de sensores (Figura 13) capaces de identificar los siguientes factores:

- Confort térmico: sensor HOBO modelo U12-006. Permite medir temperatura (C°) del aire en un rango de -40 a +100°C, con precisión de ±0,5 °C a 20°C, en condiciones de humedad de 5 a 95 % H.r sin condensar. Para la medición necesita un tiempo de estabilización entre 4 a 5 minutos (en aire estático).






Figura 12. Unidad móvil de medición. Fuente: Elaboración de las autoras.

- Confort térmico: Termómetro Infrarrojo láser Ajavision modelo WH380. Permite medir temperatura radiante media (C°) en un rango de -50°C +380°C. Posee precisión de ±3°C.

- Calidad del aire: sensor TELAIRE modelo 7001. Permite medir niveles de CO<sub>2</sub>(ppm) en un rango de 0 a 2500ppm en tiempo real. Posee sensibilidad: ±1ppm y precisión: ±50ppm de la lectura.



Figura 13. Sensores confort/rendimiento. Fuente: Elaboración de las autoras.

Género <input type="radio"/> F <input type="radio"/> M	Edad: _____	¿Se fuma en su oficina? <input type="radio"/> si <input type="radio"/> no	Horas al día que trabaja _____
---	-------------	--	--------------------------------

**Preguntas acerca del ambiente interior de su oficina**

1. ¿Cómo percibe la temperatura en este momento? (En una escala de 7 puntos marcar la opción correspondiente)
 

<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
mucho frío	frío	algo de frío	confortable	algo de calor	calor	mucho calor
2. ¿Siente que su rendimiento se ve afectado negativamente por la temperatura interior en este momento?  si  no
3. De ser así: ¿En qué grado afecta negativamente a su rendimiento la temperatura en este momento?
 

<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nada (0%)	Bajo (25%)	Medio (50%)	Alto (75%)	Muy alto (100%)
4. ¿Cómo percibe la calidad del aire en este momento? (En una escala de 7 puntos marcar la opción correspondiente)
 

<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
muy mala	mala	algo mala	regular	algo buena	buena	muy buena
5. ¿Siente que su rendimiento se ve afectado negativamente por la calidad del aire en este momento?  si  no
6. De ser así: ¿En qué grado afecta negativamente a su rendimiento la calidad del aire en este momento?
 

<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nada (0%)	Bajo (25%)	Medio (50%)	Alto (75%)	Muy alto (100%)
7. ¿Cómo percibe el nivel de ruido en este momento?
 

<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nada ruidoso	Casi nada ruido.	Poco ruidoso	Medio	Algo ruidoso	Ruidoso	Muy ruidoso
8. ¿Siente que su rendimiento se ve afectado negativamente por el nivel de ruido en su oficina en este momento?  si  no
9. De ser así: ¿En qué grado afecta negativamente a su rendimiento el nivel de ruido en este momento?
 

<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nada (0%)	Bajo (25%)	Medio (50%)	Alto (75%)	Muy alto (100%)
10. ¿Cómo percibe la iluminación en este momento? (En una escala de 7 puntos marcar la opción correspondiente)
 

<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Encandila	Demasiado luminoso	Luminoso	Algo luminoso	poco luminoso	Algo oscuro	Muy oscuro
11. ¿Siente que su rendimiento se ve afectado negativamente por el nivel de iluminación en este momento?  si  no
12. De ser así: ¿En qué grado lo afecta negativamente el nivel de iluminación de su oficina en este momento?
 

<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Nada (0%)	Bajo (25%)	Medio (50%)	Alto (75%)	Muy alto (100%)

Figura 14. Encuesta realizada a UT. Fuente: Elaboración de las autoras.

d. Confort visual: sensor Luxómetro modelo YK-2005LX. Permite medir Niveles de iluminación (lux) en plano de trabajo en un rango de 000/100, 000Lux en tiempo real, sensibilidad espectral que corresponde con las exigencias de la curva CIE (International Commission on Illumination) y precisión de  $\pm 4\%+2$  dígitos).

e. Confort acústico: sensor Decibelímetro modelo SL-4023SD. Permite medir niveles sonoros (dB) en rango automático: 30 a 130dB y en rango manual (3 rangos): de 30 a 80dB, 50 a 100dB, 80 a 130dB. Ponderación de tiempo: rápido/lento. Ponderación de frecuencia de A (dBA)/ C (dBC).

La medición llevada a cabo en el presente trabajo se realizó en un rango de 50 a 100dB, con ponderación de tiempo lento y ponderación de frecuencia A.

La medición comienza al posicionar la UMM junto a un espacio de trabajo (escritorio), ocupado por un UT sentado, a una distancia de 0,50 metros entre ellos y una altura de 0,90 metros sobre el nivel de piso.

### Encuesta

La encuesta facilita la realización de un diagnóstico del UT que sintetice el efecto de las variables de influencia. Entre las preguntas efectuadas, toman mayor relevancia aquellas que indagan sobre el Voto de Rendimiento (VR) del UT. Las mismas se basan en estudios realizados por Humphreys y Nicol (2007), donde se consulta en qué medida (0%-100%) siente que la CAI afecta negativamente a su RL. La Figura 14 muestra las preguntas de la encuesta referidas a la percepción de la CAI del UT que posibilita la obtención de los datos subjetivos.

## IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

Se procede a construir rangos de RL como medio para conocer los grados de "vulnerabilidad" del UT según variable de influencia por tipología de oficina. En este apartado se esbozan los pasos para su construcción.

1. Se contabilizan los valores de VR de cada variable ambiental en que el UT auto reporta influencia nula (0%) sobre su rendimiento.
2. Se definen valores máximos y mínimos del Voto de Rendimiento/Térmico (VRt), del Voto de Rendimiento/Calidad de Aire (VRa), Voto de Rendimiento/ Nivel Iluminación (VRi) y Voto de Rendimiento/Ruido (VRr) que determinan la máxima variabilidad posible de cada parámetro ambiental de influencia.
3. Se definen rangos intermedios en torno a la división entre el valor óptimo (VR=0%) y el valor máximo, y la división entre el valor óptimo (VR=0%) y el valor mínimo.
4. Finalmente, para la obtención de los rangos se definen equivalentes numéricos (EqN) e intervalos de puntuación a fin de establecer la valoración cualitativa de cada rango, desde "excelente" con un EqN igual a 5, hasta "malo" con un EqN igual a 1, para VRt, VRa, VRi y VRr, conforme se indica en Tabla 3.

Valoración cualitativa	Valoración numérica (EqN)	Intervalo de puntuación
Excelente	5	$4,2 < a \leq 5$
Muy Bueno	4	$3,4 < a \leq 4,2$
Bueno	3	$2,6 < a \leq 3,4$
Regular	2	$1,8 < a \leq 2,6$
Malo	1	$1 \leq a \leq 1,8$

Tabla 3. Equivalentes numéricos de rangos de rendimiento.  
 Fuente: Elaboración de las autoras.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La relación entre cada rango por variable de estudio y la variabilidad del RL valorado de forma cualitativa y cuantitativa por medio de EqN se muestra en las Tablas 4 a la 7, haciendo distinción entre tipologías de oficina. Además, cada tabla es sintetizada en gráficos compuestos por un eje de abscisas para valores de medición de cada variable ambiental, y un eje de ordenada, para los EqN de la variable de análisis.

La mayor o menor amplitud de los rangos en los gráficos se asocia a la capacidad de adaptación del UT respecto a la variable correspondiente. Se observa que éstos son representados con uno o dos polos de disconformidad, según la variable ambiental analizada. A continuación, se describe cada una de ellas.

### Temperatura operativa

A fin de evaluar el RL afectado por la variabilidad térmica, se toman los valores de temperatura operativa, ya que representa la temperatura percibida por una persona en un ambiente interior. Esta constituye el promedio entre la temperatura del aire y la temperatura radiante media, medidas en grados Celsius (°C).

La Tabla 4 muestra la variabilidad del RL en función de los rangos de temperatura operativa por tipología de oficina, a la vez que las Figuras 15 y 16 representan los resultados obtenidos de forma gráfica.

Del análisis llevado a cabo, se destaca que los rangos de RL encontrados en tipología OA poseen mayor amplitud respecto a OC. Ello se observa en mayor medida al analizar el rango "excelente". La variabilidad para este nivel es de 0,8°C en OA, mientras que en OC es de 0,3°C. Esta situación permite afirmar que los UT de OA poseen mayor capacidad de adaptación térmica respecto a los de OC. Seguidamente, se advierte preferencia a trabajar con temperaturas más elevadas en UT de OC, eso se divide en mayor medida al comparar el rango "excelente" de ambas tipologías, siendo la variabilidad para OA entre 24.7 a 23.9 C°, mientras que para OC esta variabilidad aumenta ubicándose en 25.1 a 24.9 C°.

Oficina abierta (OA)									
Valoración cualitativa	Malo	Regular	Bueno	Muy bueno	Excelente	Muy bueno	Bueno	Regular	Malo
EqN	1	2	3	4	5	4	3	2	1
Máximos [C°]	<21.5	≤22.3	<23.1	<23.9	<24.7	<25.5	<26.3	<27.1	-
Mínimos [C°]	-	21.5	22.3	23.1	23.9	24.7	25.5	26.3	≥27.1
Oficina cerrada (OC)									
Valoración cualitativa	Malo	Regular	Bueno	Muy bueno	Excelente	Muy bueno	Bueno	Regular	Malo
EqN	1	2	3	4	5	4	3	2	1
Máximos [C°]	<22.8	<23.5	<24.2	<24.9	<25.1	<25.8	<26.5	<27.2	-
Mínimos [C°]	-	22.8	23.5	24.2	24.9	25.1	25.8	26.5	≥27.2

Tabla 4. Valoración de rangos de RL (de influencia térmica) durante período de verano en OA y OC. Fuente: Elaboración de las autoras.

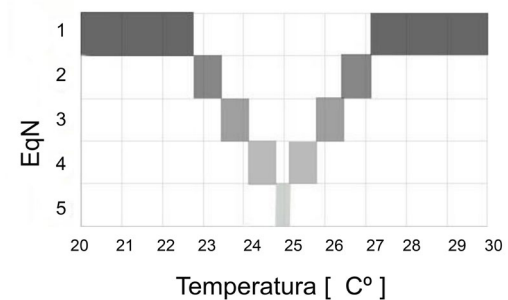
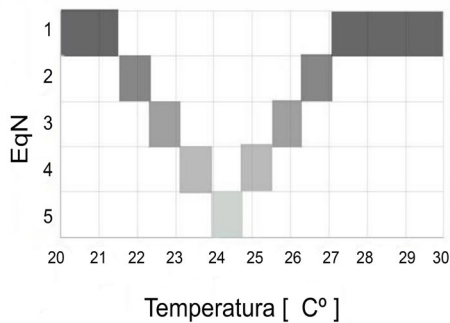


Figura 15. Rangos de variabilidad del RL influenciado por temperatura operativa durante período de verano en OA. Fuente: Elaboración de las autoras.

Figura 16. Rangos de variabilidad del RL influenciado por temperatura operativa durante período de verano en OC. Fuente: Elaboración de las autoras.

### Calidad de aire

La calidad del aire es medida en niveles de concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presentes. Dichos niveles, dependientes de la presencia de personas y del porcentaje de aire renovado, podrían afectar la confortabilidad del UT y con ello su RL. Los niveles de CO<sub>2</sub> se miden en ppm (partes por millón) en cada espacio analizado.

La Tabla 5 expone la variabilidad del RL en función de los rangos de niveles de CO<sub>2</sub> por tipología de oficina; mientras que las Figuras 17 y 18 representan los resultados logrados de forma gráfica.

En el estudio se observa para un EqN igual a 5, una mayor amplitud de los rangos de RL en OA respecto a OC. La amplitud de dicho rango permite identificar a un UT de OA con mayor capacidad de adaptación a valores de hasta 840 ppm (Figura 17), sin ver afectado su rendimiento. Este rango es menor para OC, admitiendo niveles de CO<sub>2</sub> que no superan los 627 ppm (Figura 18).

### Nivel de iluminación

El confort lumínico es medido en términos de niveles de iluminancia sobre el plano de trabajo sin considerar la fuente de iluminación (natural o artificial), los cuales son medidos en Lux.

La Tabla 6 expone la variabilidad del RL en función de los rangos de niveles de iluminancia por tipología de oficina sobre plano de trabajo y las Figuras 19 y 20 los resultados logrados de forma gráfica.

De la observación de rangos, se destaca que el nivel excelente (EqN=5) presenta una diferencia lumínica con valores superiores en OC respecto a OA. Esta característica se da con una diferencia promedio de 100lux (Figuras 19 y 20).

El comportamiento de los datos permite determinar que los UT de OA pueden trabajar de forma óptima a menores niveles de lux, sin percibir afectado su rendimiento, es decir, poseen mayor capacidad de adaptación a planos de trabajo más oscuros.



Oficina abierta (OA)					
Valoración cualitativa	Excelente	Muy bueno	Bueno	Regular	Malo
EqN	5	4	3	2	1
Máximos [ppm]	<842	<953	<1064	<1175	-
Mínimos [ppm]	-	842	953	1064	≥1175
Oficina Cerrada (OC)					
Valoración cualitativa	Excelente	Muy bueno	Bueno	Regular	Malo
EqN	5	4	3	2	1
Máximos [ppm]	<627	<700	<771	<843	
Mínimos [ppm]		627	700	771	≥843

Tabla 5. Valoración de rangos de RL (de influencia calidad de aire) durante período de verano en OA y OC. Fuente: Elaboración de las autoras.

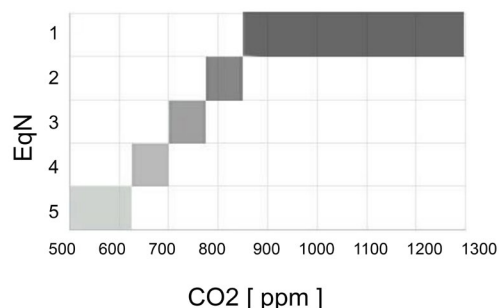
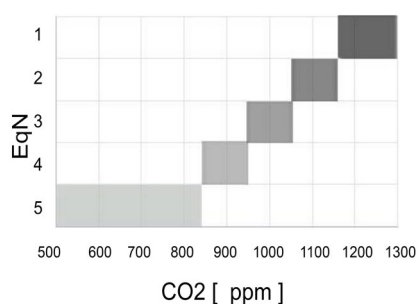


Figura 17. Rangos de variabilidad del RL influenciado por calidad de aire durante período de verano en OA. Fuente: Elaboración de las autoras.

Figura 18. Rangos de variabilidad del RL influenciado por calidad de aire durante período de verano en OC. Fuente: Elaboración de las autoras.

Oficina abierta (OA)									
Valoración cualitativa	Malo	Regular	Bueno	Muy bueno	Excelente	Muy bueno	Bueno	Regular	Malo
EqN	1	2	3	4	5	4	3	2	1
Máximos [Lux]	<210	<238	<325	<413	>500	>588	>675	>763	-
Mínimos [Lux]	-	210	238	325	413	500	588	675	≥763
Oficina cerrada (OC)									
Valoración cualitativa	Malo	Regular	Bueno	Muy bueno	Excelente	Muy bueno	Bueno	Regular	Malo
EqN	1	2	3	4	5	4	3	2	1
Máximos [Lux]	<243	<331	<419	<508	<596	<684	<773	<861	.
Mínimos [Lux]		243	331	419	508	596	684	773	≥861

Tabla 6. Valoración de rangos de RL (de influencia lumínica) durante período verano en OA y OC. Fuente: Elaboración de las autoras.

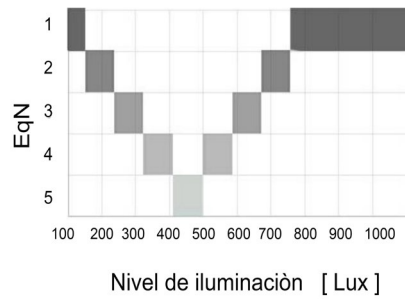


Figura 19. Rangos de variabilidad del RL influenciado por nivel lumínico durante período de verano en OA. Fuente: Elaboración de las autoras.

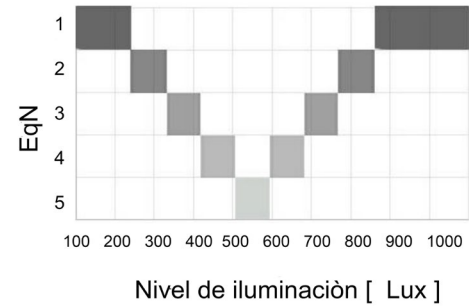


Figura 20. Rangos de variabilidad del RL influenciado por nivel lumínico durante período de verano en OC. Fuente: Elaboración de las autoras.

Oficina abierta (OA)					
Valoración cualitativa	Excelente	Muy bueno	Bueno	Regular	Malo
EeqN	5	4	3	2	1
Máximos [dBA]	<62	<67	<71	<75	-
Mínimos [ dBA]	-	62	67	71	≥75
Oficina cerrada (OC)					
Valoración cualitativa	Excelente	Muy bueno	Bueno	Regular	Malo
EeqN	5	4	3	2	1
Máximos [ dBA]	<57	<61	<65	<68	-
Mínimos [ dBA]	-	57	61	65	≥68

Tabla 7. Valoración de rangos de RL (de influencia acústica) durante período verano en OA y OC. Fuente: Elaboración de las autoras.

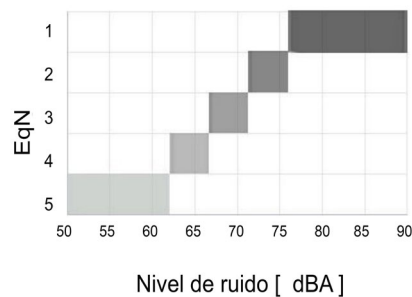


Figura 21. Rangos de variabilidad del RL influenciado por niveles sonoros (dBA) durante PVE en OA. Fuente: Elaboración de las autoras.

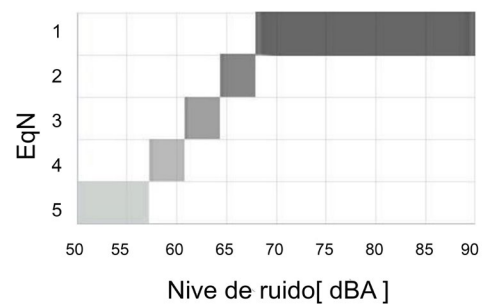


Figura 22. Rangos de variabilidad del RL influenciado por niveles sonoros (dBA) durante PVE en OC. Fuente: Elaboración de las autoras.

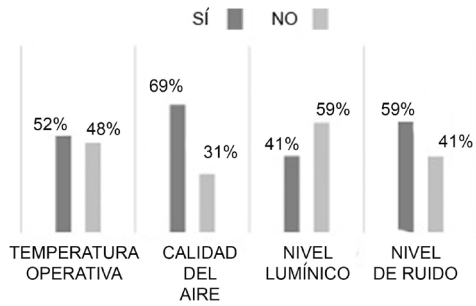


Figura 23. Nivel de influencia de cada variable sobre el RL individual y constantes de proporcionalidad resultantes en tipología OA. Fuente: Elaboración de las autoras.

### Nivel de ruido

El confort sonoro es afectado por el nivel de ruido cuando se trata de un sonido que provoque molestias, y se mide en potencia sonora (dBA, decibelio ponderado).

La Tabla 7 muestra la variabilidad del RL en función de los rangos de niveles de ruido por tipología de oficina, mientras que las Figuras 21 y 22 representan los resultados en forma gráfica.

De los valores hallados, se detecta que los rangos en OA presentan mayor amplitud respecto a OC, existiendo una diferencia de casi 5 dBA entre ambas tipologías de oficina, por cuanto se reconoce al UT de OA con mayor capacidad de aceptar niveles de ruido elevados sin ver afectado su rendimiento laboral.

### Indicador de rendimiento laboral óptimo

De la respuesta a la pregunta “¿Usted cree que esta variable influye negativamente en su rendimiento?” planteada en la encuesta de este estudio, se considera la suma porcentual de aquellos que contestan SÍ [%] y NO [%]. Ello permite conocer el nivel de influencia de cada variable sobre el RL individual.

En función de los porcentajes obtenidos, se construyen constantes de proporcionalidad, para relacionar el total de las variables en su conjunto y cada una, con su peso en importancia.

Lo expuesto en la Figura 23 conduce a la construcción del IRLO para la OA (ver Ecuación 1).

$$IRLO = 0,23 \cdot Eq_{VRt} + 0,31 \cdot Eq_{VRa} + 0,19 \cdot Eq_{VRi} + 0,27 \cdot Eq_{VRr}$$

Lo expuesto en la Figura 24 conduce a la construcción del IRLO para la OC (ver Ecuación 2).

$$IRLO = 0,33 \cdot Eq_{VRt} + 0,36 \cdot Eq_{VRa} + 0,08 \cdot Eq_{VRi} + 0,23 \cdot Eq_{VRr}$$

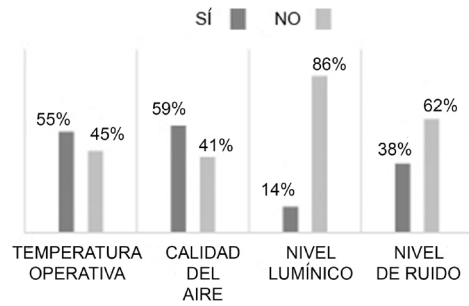


Figura 24. Nivel de influencia de cada variable sobre el RL individual y constantes de proporcionalidad resultantes en tipología OC. Fuente: Elaboración de las autoras.

Como se puede observar, el orden de influencia de las variables cambia para ambas tipologías. No obstante, en ambos casos la concentración de CO<sub>2</sub> se presenta como la de mayor influencia.

El valor obtenido en Ecuación 1 y 2 se traduce cualitativamente, conforme a Tabla 3.

### Aplicación-validación IRLO

En el presente apartado se procede a aplicar la herramienta IRLO en dos casos reales de oficina de tipología OA y OC analizada, a fin de validar los resultados (Tabla 8 y 9).

#### Caso A - OA:

La Tabla 8 muestra los datos obtenidos de mediciones para cada variable ambiental y su valoración (EqN), según las Figuras 15, 17, 19 y 21.

Tipo	Personas	C°	CO <sub>2</sub>	Lux	Dba
OA	4	27	1190	810	74
Valoración		Eq <sub>VRt</sub> =2	Eq <sub>VRa</sub> =1	Eq <sub>VRi</sub> =1	Eq <sub>VRr</sub> =2

Tabla 8. Valores ambientales medidos en caso A y su valoración numérica según rangos. Fuente: Elaboración de las autoras.

Como resultado, se obtiene el siguiente valor del IRLO:

$$IRLO = 0,23 \cdot 2 + 0,31 \cdot 1 + 0,19 \cdot 1 + 0,27 \cdot 2 = 1,50 \rightarrow \text{Malo}$$

#### Caso B - OC:

En correspondencia, la Tabla 9 expone los datos obtenidos de mediciones para cada variable ambiental y su valoración (EqN) según las Figuras 16, 18, 20 y 22.

Tipo	Personas	C°	CO <sub>2</sub>	Lux	DbA
OC	1	24.5	550	495	53
Valoración		Eq <sub>VRt=4</sub>	Eq <sub>VRa=5</sub>	Eq <sub>VRi=5</sub>	Eq <sub>VRr=4</sub>

Tabla 9. Valores ambientales medidos en caso A y su valoración numérica según rangos. Fuente: Elaboración de las autoras.

Como resultado, se obtiene el siguiente valor del IRLO:

$$IRLO = 0,33 \cdot 4 + 0,36 \cdot 5 + 0,08 \cdot 5 + 0,23 \cdot 4 = 4,44 \rightarrow \text{Excelente}$$

## CONCLUSIÓN

Vincular el voto de rendimiento laboral auto reportado con los niveles de cada variable ambiental estudiada permite conocer los valores óptimos y los valores más vulnerables de la temperatura operativa, la calidad del aire, el nivel lumínico y el nivel de ruido, para lograr un buen RL en UT en una zona templada cálida durante el período de verano.

La construcción de rangos valorados a través de los EqN informa el nivel de RL de usuarios por tipología de oficina abierta y cerrada, variando desde 1 (RL malo) a 5 (RL excelente). Así, la valoración de un IRLO igual o cercano a 5, además de indicar las mejores condiciones ambientales para el óptimo rendimiento del UT a favor de la salud, supone un aporte "beneficioso" a las condiciones de comodidad/confort (térmico, visual, acústico y calidad del aire) del UT. Por el contrario, un IRLO igual o próximo a 1 indica al *Buildingmanager* sobre la necesidad de abordar soluciones ambientales a favor del confort y, consecuentemente, del RL en el ambiente laboral.

Respecto a la comparación entre tipologías de oficina, se afirma que el UT desarrolla un mayor nivel de adaptación ambiental en OA, de manera que dichas oficinas resultan un espacio en desventaja por poseer menor factor de ocupación, inexistencia de ventanas, falta de cerramiento total y mayores niveles de ruido.

Por último, se pone en valor que el desarrollo de la herramienta IRLO caracteriza las condiciones de RL en oficinas para regiones de clima templado cálido durante período de verano. En próximas investigaciones se prevé extrapolar estos avances en la temática a los períodos de invierno y transitorio, así como aplicarlos en otros casos de estudio a nivel local.

## LISTADO DE ABREVIATURAS

CAI	Calidad Ambiental Interior
CO2	Dióxido de Carbono
EqN	Equivalente Numérico
IRLO	Indicador de Rendimiento Laboral Óptimo
OA	Oficina de Tipología Abierta
OC	Oficina de Tipología Cerrada
RL	Rendimiento Laboral
UMM	Unidad Móvil de Medición
UT	Usuarios-Trabajadores
VR	Voto de Rendimiento
VRa	Voto de Rendimiento de la Calidad de Aire
VRi	Voto de Rendimiento del Nivel de Iluminación
VRr	Voto de Rendimiento del Nivel de Ruido
VRt	Voto de Rendimiento Térmico
Eq <sub>VRt</sub>	Equivalente Voto de Rendimiento Térmico
Eq <sub>VRa</sub>	Equivalente Voto de Rendimiento Calidad de Aire
Eq <sub>VRi</sub>	Equivalente Voto de Rendimiento de Iluminación
Eq <sub>VRr</sub>	Equivalente Voto de Rendimiento de Ruido

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Candanedo, L. M. y Feldheim, V. (2016). Accurate occupancy detection of an office room from light, temperature, humidity and CO2 measurements using statistical learning models. *Energy and Buildings*, 112, 28-39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.071>
- De Dear, R. (2004). Thermal comfort in practice. *Indoor air*, 14(s 7), 32-39.
- Haegerstrand, A. y Knutsson, E. (2019). *The Attractive Workplace: ¿Are the Site Offices Meeting the Employees' Needs?* Recuperado de <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1335603&dsid=-2150>
- Humphreys, M. A. y Nicol, J. F. (2007). Self-assessed productivity and the office environment: monthly surveys in five European countries. *ASHRAE transactions*, 113, 606. Recuperado de <https://www.proquest.com/openview/8cfc5a0731a88d2407b3521e54829ebe/1?pq-origsite=gscholar&cbl=34619>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos, Argentina [INDEC]. (2010). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010. Recuperado de <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-CensoNacional-999-999-Censo-2010>.
- IRAM (1996). 11603: Acondicionamiento térmico de edificios. *Clasificación bioambiental de la República Argentina*. Buenos Aires, Argentina.
- Kari, T., Makkonen, M. y Frank, L. (2017). The Effect of Using Noise Cancellation Earplugs in Open-plan Offices of the Work Well-being and Work Performance of Software Professionals. En *MCIS 2017: 11th Mediterranean Conference on Information Systems*. MCIS. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/301373762.pdf>

- Kuchen, E. y Fisch, M. N. (2009). Spot monitoring: thermal comfort evaluation in 25 office buildings in winter. *Building and Environment*, 44(4), 839-847. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.023>
- Lamb, S. y Kwok, K. C. (2016). A longitudinal investigation of work environment stressors on the performance and wellbeing of office workers. *Applied Ergonomics*, 52, 104-111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.07.010>
- Liebl, A. y Jahncke, H. (2017). Review of research on the effects of noise on cognitive performance 2014-2017. En *12th IC BEN conference on noise as a public health problem, 18-22 June 2017, Zurich, Switzerland*. Recuperado de <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1119275&dsid=-4070>
- Liu, T., Lin, C. C., Huang, K. C. y Chen, Y. C. (2017). Effects of noise type, noise intensity, and illumination intensity on reading performance. *Applied Acoustics*, 120, 70-74. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.01.019>
- Lou, H. y Ou, D. (2019). A comparative field study of indoor environmental quality in two types of open-plan offices: Open-plan administrative offices and open-plan research offices. *Building and Environment*, 148, 394-404. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.022>
- Marín Galeano, A. F. (2013). *La oficina administrativa como diseño espacial acorde a las necesidades del trabajador*. Recuperado de <https://repositorio.ucp.edu.co/handle/10785/1616>
- Maula, H., Hongisto, V., Koskela, H. y Haapakangas, A. (2016). The effect of cooling jet on work performance and comfort in warm office environment. *Building and Environment*, 104, 13-20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.018>
- Minetti, J. L., Carletto, P. M., y Sierra, A. y Poblete. Y. E. (1986). El régimen de precipitaciones de San Juan y su entorno. *Centro de Investigaciones Regionales de San Juan*. Recuperado en: [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=+El+r%C3%A9gimen+de+precipitaciones+de+San+Juan+y+su+entorno&author=Minetti+J.L.&publication\\_year=1986&pages=19-22](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=+El+r%C3%A9gimen+de+precipitaciones+de+San+Juan+y+su+entorno&author=Minetti+J.L.&publication_year=1986&pages=19-22)
- Nag, P. K. (2019). Spatial and Behavioural Attributes in Office Design. En Nag, P. K., *Office Buildings* (pp. 29-49). Singapur: Springer. Recuperado de [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-2577-9\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-2577-9_2)
- Organización Internacional del Trabajo [OIT]. *Garantizar un tiempo de trabajo decente para el futuro*. Recuperado de [https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed\\_norm/---relconf/documents/meetingdocument/wcms\\_618490.pdf](https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_norm/---relconf/documents/meetingdocument/wcms_618490.pdf)
- Pan, S., Xiong, Y., Han, Y., Zhang, X., Xia, L., Wei, S., ... y Han, M. (2018). A study on influential factors of occupant window-opening behavior in an office building in China. *Building and environment*, 133, 41-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.008>
- Perucca, L. P. y Martos, L. M. (2012). Geomorphology, tectonism and Quaternary landscape evolution of the Central Andes of San Juan (30 S–69 W), Argentina. *Quaternary International*, 253, 80-90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.08.009>
- Puliafito, S. E., Allende, D. G., Mulena, C. G., Cremades, P. y Lakkis, S. G. (2015). Evaluation of the WRF model configuration for Zonda wind events in a complex terrain. *Atmospheric Research*, 166, 24-32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.06.011>
- Shin, D. S., Jeong, B. Y. y Park, M. H. (2018). Structural equation modeling of office environment quality, sick building syndrome and musculoskeletal complaints on aggregate satisfaction of office workers. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 28(3), 148-153. DOI: <https://doi.org/10.1002/hfm.20730>
- Shriram, S., Ramamurthy, K. y Ramakrishnan, S. (2019). Effect of occupant-induced indoor CO2 concentration and bioeffluents on human physiology using a spirometric test. *Building and Environment*, 149, 58-67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.015>
- Wargocki, P. y Wyon, D. P. (2017). Ten questions concerning thermal and indoor air quality effects on the performance of office work and schoolwork. *Building and Environment*, 112, 359-366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.020>
- Weather Atlas Recuperado de: <https://www.weather-atlas.com/> [Diciembre, 2020].
- Wei, W., Wargocki, P., Zirngibl, J., Bendžalová, J. y Mandin, C. (2020). Review of parameters used to assess the quality of the indoor environment in Green Building certification schemes for offices and hotels. *Energy and Buildings*, 209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109683>
- Wu, H., Wu, Y., Sun, X. y Liu, J. (2020). Combined effects of acoustic, thermal, and illumination on human perception and performance: A review. *Building and Environment*, 169, 106593. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106593>
- Yang, W. y Moon, H. J. (2019). Combined effects of acoustic, thermal and illumination conditions on the comfort of discrete senses and overall indoor environment. *Building and Environment*, 148, 623-633. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.040>







Recibido 10/05/2021  
Aceptado 28/06/2021

# MINGA: MODELO REPLICABLE DE RENOVACIÓN URBANA SOSTENIBLE, CASO BUENAVENTURA

## MINGA: SUSTAINABLE AND REPLICABLE URBAN RENOVATION MODEL, THE BUENAVENTURA CASE

VALERIA VILLAMIL CÁRDENAS  
Estudiante de arquitectura  
Pontificia Universidad Javeriana  
Cali, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0002-9016-2374>  
[villamilvaleria@javerianacali.edu.co](mailto:villamilvaleria@javerianacali.edu.co)

IVÁN OSUNA-MOTTA  
Magister en Arquitectura y Urbanismo  
Doctorante en Arquitectura y Urbanismo  
Director de la Maestría en Hábitat Sustentable  
Pontificia Universidad Javeriana  
Cali, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0001-5137-2603>  
[ivan.osuna@javerianacali.edu.co](mailto:ivan.osuna@javerianacali.edu.co)

### RESUMEN

Este artículo presenta los resultados obtenidos en la investigación realizada durante la ejecución de un diseño de renovación urbana sostenible en la ciudad de Buenaventura, Valle del Cauca, Colombia, como parte de la propuesta del equipo MINGA para el SDLAC 2019 (Solar Decathlon Latin America and Caribbean). Este proyecto fue desarrollado por un grupo de estudiantes y profesores, dentro de los espacios académicos de los programas de pregrado de Arquitectura e Ingeniería Civil de las universidades partícipes del equipo MINGA. Se utilizó la metodología de enseñanza-aprendizaje basada en proyectos, con integración curricular en cursos interdisciplinarios tipo taller de proyectos. El objetivo principal fue demostrar la viabilidad de un proyecto de urbanismo resiliente, concebido para el clima futuro en una ciudad costera del trópico cálido-húmedo. Los resultados demostraron que se puede crear un urbanismo climático, resiliente al clima, que garantice la permanencia de los habitantes originales de las zonas costeras, mitigando los riesgos por inundación y garantizando el arraigo cultural de sus habitantes, aun en escenarios de aumento en el nivel del mar

### Palabras clave

urbanismo sustentable, cambio climático, vivienda social

### ABSTRACT

This article presents the results obtained in research made during a sustainable urban renewal design in the city of Buenaventura, Valle del Cauca, Colombia, as part of MINGA team's proposal for SDLAC 2019 (Solar Decathlon Latin America and Caribbean). This project was developed by a group of students and professors, as part of the undergraduate programs of architecture and civil engineering of the partner universities in the MINGA team. A project-based teaching-learning methodology was used, integrating the curricula in interdisciplinary project workshop-type courses. The main goal was to demonstrate the viability of a resilient urban planning project, conceived for the future climate in a coastal city in the hot-humid tropics. The results showed that a climate-resilient urbanism can be created, which guarantees the permanence of the original inhabitants of the coastal areas, mitigating flooding risks, and preserving the cultural roots of the inhabitants, even under sea-rise scenarios.

### Keywords

sustainable urbanism, climate change, social housing

## INTRODUCCIÓN

El Solar Decathlon es actualmente el evento académico de construcción sostenible más importante a nivel global; se desarrolla desde 2002 y declara dentro de sus objetivos la educación de estudiantes y público respecto a los beneficios ambientales que presenta la construcción sostenible (Kos y De Souza, 2014). Las ediciones latinoamericanas del concurso, realizadas en Cali, son pioneras al enfocar sus esfuerzos en las soluciones de vivienda sostenibles para poblaciones de bajos recursos, con relevancia regional para el trópico (Herrera-Limones, León-Rodríguez y López-Escamilla, 2019). Para la edición 2019, se realizó una alianza entre la Pontificia Universidad Javeriana Cali (Colombia), la Universidad Federal de Santa Catarina y el Instituto Federal de Santa Catarina (Brasil), que derivó en la conformación de un equipo interdisciplinario constituido por estudiantes y profesores de arquitectura, ingenierías, diseño de comunicación visual y comunicación. El equipo Minga, diseñó, construyó y puso en funcionamiento un prototipo de vivienda que hace parte de un proyecto habitacional multifamiliar urbano, para la ciudad de Buenaventura. Si bien la propuesta urbana se sitúa en un lugar específico, teniendo en cuenta las condiciones medioambientales, sociales y económicas de la ciudad y la región, con un proyecto que responde a las necesidades de la población, es adaptable a otros territorios con condiciones similares de costa en el trópico cálido-húmedo.

Las áreas urbanas en zonas costeras del planeta son las más vulnerables a los efectos negativos del cambio climático, por estar muy pobladas y tener una mayor proyección de crecimiento poblacional (Béné et al., 2018; Neumann, Vafeidis, Zimmermann y Nicholls, 2015). En estas regiones y particularmente en Latinoamérica, existen altos índices de pobreza, exclusión, inequidad y precariedad de las viviendas, que convierten a la vida en las costas en una opción de alto riesgo (Nicholls et al., 2014; Vergel Tovar, 2010). Todo esto plantea nuevos desafíos para las ciudades costeras: hacerlas más viables y apropiadas para las condiciones climáticas futuras, priorizando la protección de la vida de sus habitantes y la protección de las infraestructuras frente a los efectos negativos del cambio climático, mediante estrategias de adaptación que se anticipen a los eventos y reduzcan la vulnerabilidad (Hernández-Guerrero, Vieyra-Medrano y Mendoza, 2012).

Ante los nuevos desafíos se hacen necesarias aproximaciones metodológicas capaces de desarrollar modelos urbanos *climate-proof* (Wardekker, De Jong, Knoop y Van Der Sluijs, 2010) orientados hacia el urbanismo climático como un nuevo paradigma que supera el concepto de urbanismo sostenible (Long y Rice, 2019). Es en este escenario de cambio que cobra mayor importancia el concepto de resiliencia urbana, entendida como la capacidad de un sistema para mantener o regresar rápidamente a su funcionamiento deseado, luego de una perturbación (Meerow, Newell y Stults, 2016). Se requiere que los sistemas urbanos incrementen su capacidad de

adaptación, anticipando una respuesta adecuada a los desafíos actuales y futuros (Hernantes, Maraña, Giménez, Sarriegi y Labaka, 2019).

El caso de estudio plantea además el desafío de actuar sobre la ciudad informal. Tradicionalmente, los grandes proyectos urbanos dan respuesta a un entorno físico que precisa transformarse, pero en muy pocas ocasiones se dirigen a las verdaderas necesidades de sus pobladores (Hernández Araque, 2016). Se debe, así, desarrollar procesos de diseño, con participación comunitaria, que ofrezcan respuestas "situadas", relacionadas adecuadamente con contextos específicos (Musango, Currie, Smit y Kovacic, 2020). La propuesta aquí expuesta plantea que es posible elaborar un modelo de renovación urbana resiliente, que minimice el desplazamiento forzado dentro de la ciudad y desacelere la expansión del área urbana, mediante un proyecto que considere las condiciones climáticas actuales y futuras, las condiciones socioculturales y que reinterprete los sistemas de ocupación del territorio ancestrales, con el uso de nuevas tecnologías de construcción y procesos de diseño innovadores.

## CONTEXTUALIZACIÓN

Buenaventura es una ciudad costera del suroccidente colombiano (3°52'59" Norte, 77°4'1" Oeste). Posee uno de los puertos marítimos más importantes del país debido a su posición estratégica, su conexión con el Océano Pacífico y cercanía con el canal de Panamá. La ciudad está dividida en dos: la parte continental y la isla de Cascajal, conectadas entre sí a través de la vía principal de la ciudad, la avenida Simón Bolívar. Asimismo, dicha relación con el mar, resulta un aspecto muy importante para la economía, la riqueza ambiental y la cultura de la ciudad. A pesar de esto, por razones de índole político, los ingresos económicos no se ven reflejados en la infraestructura de la ciudad; es por esto que las condiciones de vida de los habitantes son, en muchos casos, precarias.

De acuerdo a la clasificación climática de Köppen-Geiger, los climas de Colombia son tipo "A" que corresponden a los tropicales húmedos. Específicamente, Buenaventura posee un clima de selva tropical "Af", que presenta altas temperaturas (alrededor de 30°C), con variaciones muy pequeñas durante el año, abundantes precipitaciones (150-1000cm), bastante nubosidad y una alta humedad (Rafferty, 2009). Gracias a su ubicación, la ciudad cuenta con una gran diversidad y riqueza natural. Aunque posee una importante cantidad de especies de flora y fauna, a nivel urbano carece de espacios con adecuadas condiciones ambientales. Se han proyectado áreas de expansión urbana en el Plan de Ordenamiento Territorial – POT (Alcaldía de Buenaventura, 2001) que perpetúan la deforestación y contempla el uso de muchos ecosistemas importantes para tal fin, como los manglares (Figura 1).

Con una población estimada de 440.995 habitantes (DANE, 2005), contando tanto el área rural como la urbana, las

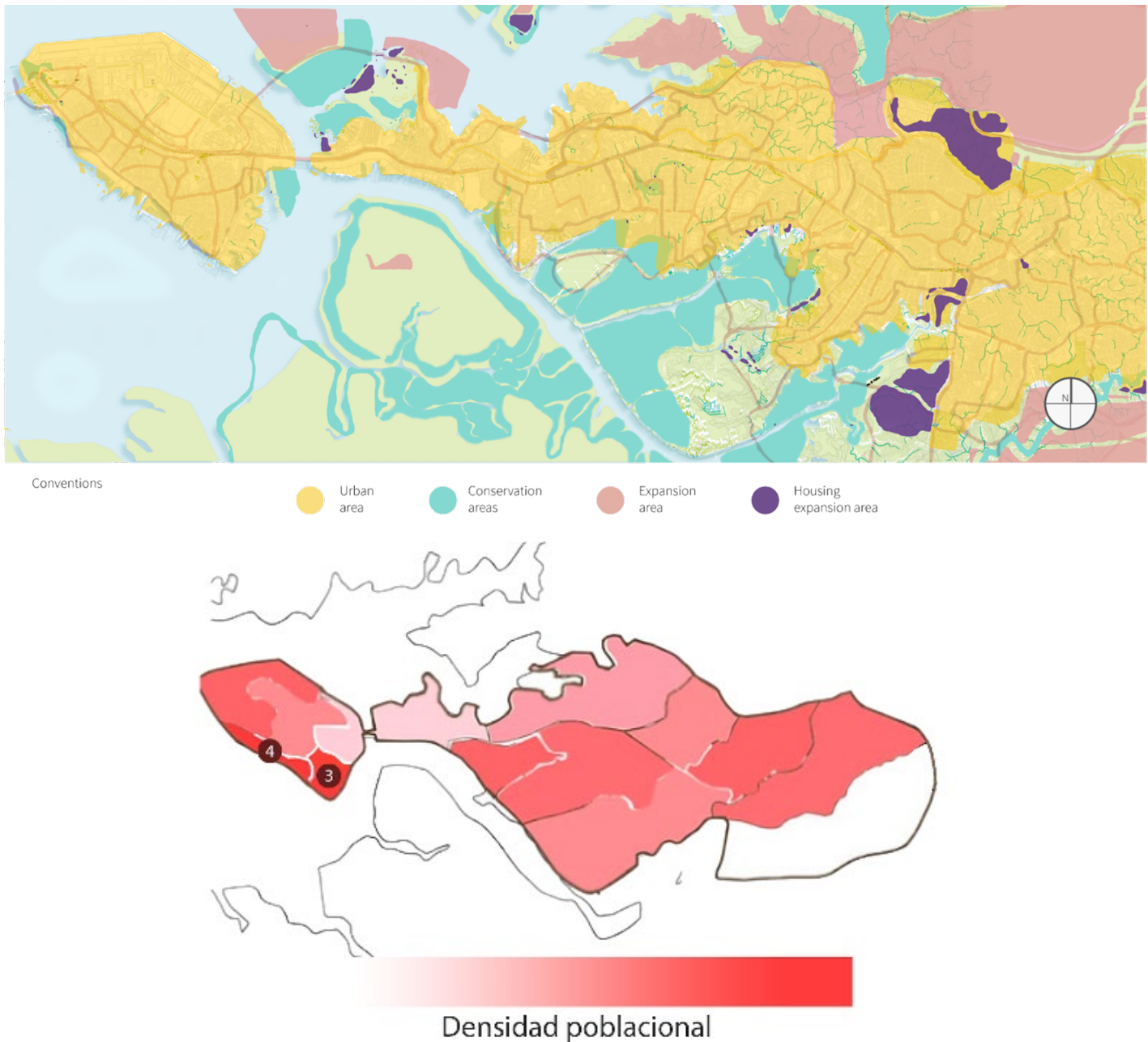


Figura 1. Zonas de expansión / Densidad Poblacional de Buenaventura. Fuente: Elaborado por los autores

comunidades (zonas) con mayor densidad se encuentran hacia el borde sur de la isla (especialmente las 3 y 4) (Figura 1), donde se asientan de manera informal y en condiciones de hacinamiento debido a la gran cantidad de personas por vivienda, en pocos metros cuadrados. En ese sector de la isla se concentra la mayoría de hogares con necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) y miseria del municipio (DANE, 2020). Efectivamente, en Buenaventura, más del 15% de la población no cuenta con los servicios básicos (DANE, 2018) y las áreas mencionadas están dentro de las más afectadas en ese sentido. Además, los niveles de violencia son mayores en estas comunas respecto al resto de la ciudad.

Sumado a lo anterior, diversas problemáticas sociales y económicas impactan a la comunidad, entre ellas:

el desplazamiento forzado, la falta de equidad y de oportunidades laborales, el poco acceso a la educación y a la salud, el analfabetismo, ilegalidad, etc. (Martínez et al., 2013). Tan solo en el año 2013 fueron desplazadas más de 13.000 personas de manera forzosa a la ciudad (Schoening, 2014), lo cual puede explicar el creciente desarrollo de asentamientos informales, sobretodo en el borde de la isla, que se han extendido hacia el mar con condiciones precarias y carencia de recursos para su habitabilidad

Es así como, hoy en día, los bordes de la isla de Cascajal están compuestos mayoritariamente de relleno utilizado por los pobladores con el fin de ganar terreno hacia el mar, expandiendo sus límites urbanos. Para ello, se usa un sistema de construcción tradicional: la palafítica (Figura 2).





Figura 2. Estructuras existentes en la zona de estudio. Fuente: Elaborada por los autores

En ella, se hincan los palafitos (palos de palma de chonta) en el lecho marino, para fijar una base hecha de la misma madera y construir sobre esta, relleno después debajo con material de residuo. Esto causa una alta contaminación del mar y pone en peligro a las personas que allí se asientan debido al riesgo de inundación existente en gran parte de la zona sur de la isla y al oeste del área continental (Figura 3). Asimismo, la falta de planeación ha generado deficiencia o ausencia de sistemas de acueducto y alcantarillado, entre otros sistemas deficientes o inexistentes.

Casos similares se han estudiado a nivel regional, como en Morelia (México), ya que se pueden asociar los eventos de inundación con la manera cómo se concibe la ciudad. La falta de planeación de la misma y de una respuesta acertada por parte de las autoridades hace evidente que las diferencias socioeconómicas respecto a quienes habitan en la periferia (como es también el caso de la comunidad bonaverense) refleja una notoria “inequidad frente al riesgo”; por esto la noción de adaptabilidad que se pretende exponer a partir

del proyecto MINGA y el caso de estudio en Morelia, se convierte en una especie de eufemismo de “justicia social” (Hernández-Guerrero *et al.*, 2012).

La Organización Mundial de la Salud afirma que los espacios públicos “verdes” y “azules” pueden mejorar en gran medida la salud, física y mental, y la calidad de vida de las personas, reduciendo los niveles de estrés, comorbilidades y propiciando espacios de descanso, recreación y actividad física (World Health Organization, 2016). Actualmente, Buenaventura tiene un índice de espacio público de 0.51m<sup>2</sup> por habitante, representado en la carencia parques públicos, muy por debajo de las ciudades que fueron objeto del estudio ya mencionado. Por otra parte, respecto al sistema vial, la avenida Simón Bolívar es un eje que comunica la ciudad con el resto del país. Está proyectada una vía en el lado norte de la isla que será construida con un objetivo más comercial y de transporte pesado, lo que dinamizará esta zona de la ciudad y consolidará el sur como una zona residencial



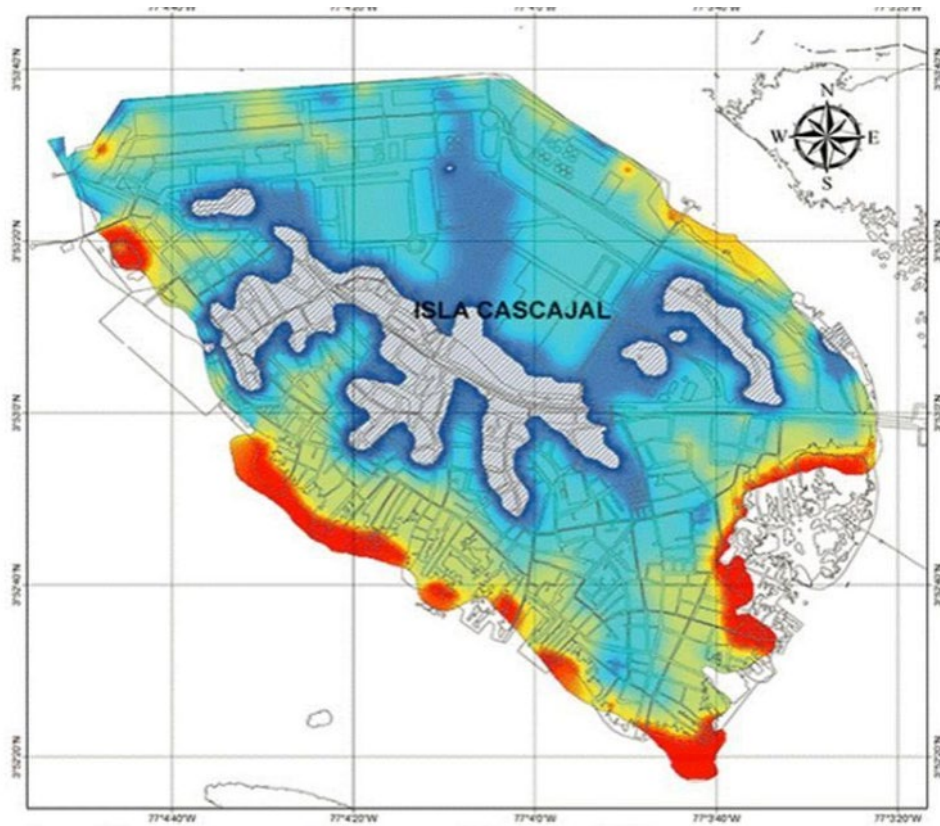
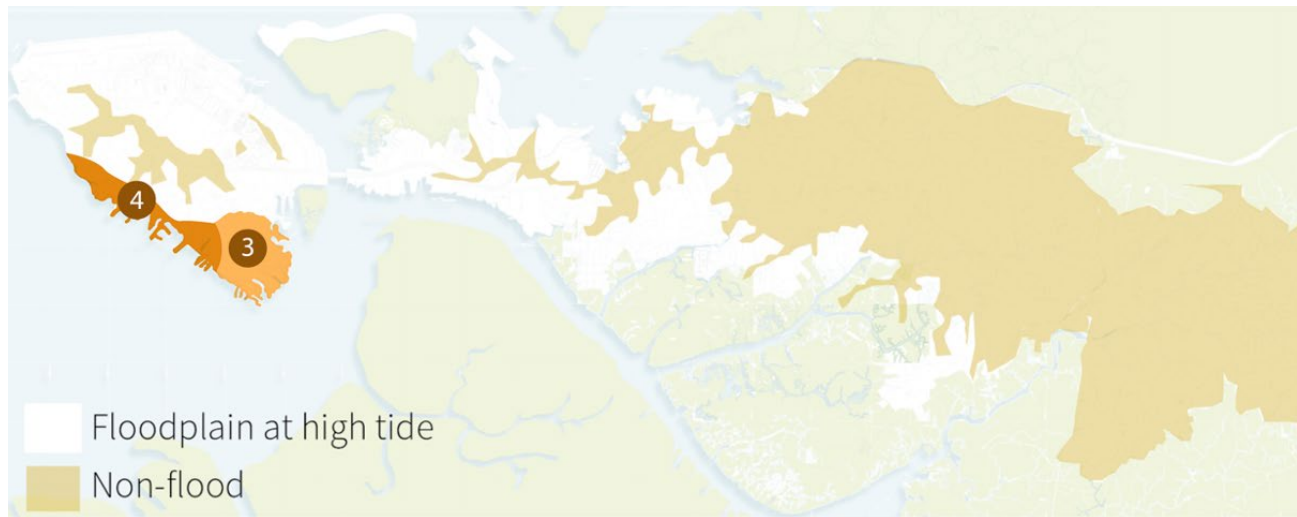


Figura 3. Mapa de inundación de Buenaventura y la Isla de Cascajal. Fuente: superior: Elaborada por autores. Inferior: Cocuñame y Salcedo (2017, p. 200).

y de transporte liviano. Así, el equipo MINGA entiende las variables del contexto y toma la decisión de trabajar principalmente el borde de la isla de Cascajal y un sector del borde del área continental.

## METODOLOGÍA

En atención a los planteamientos del concurso, la propuesta urbana de MINGA se realizó integrando las temáticas del Solar Decathlon en los cursos de últimos años de pregrado de las carreras de Arquitectura e

Ingeniería Civil de la Javeriana Cali y la UFSC, cursos en los cuales se implementó la metodología de enseñanza-aprendizaje basada en proyectos que permite a los estudiantes poner en práctica los conocimientos teóricos adquiridos en los cursos tradicionales (Herrera-Limones, Rey-Pérez, Hernández-Valencia y Roa-Fernández, 2020; Jin et al., 2018; Osuna-Motta, 2018). Con este enfoque, la investigación, realizada por más de 80 estudiantes y 12 profesores de Colombia y Brasil, se centró en la temática del diseño urbano en densidad media aplicado al contexto del trópico latinoamericano, para lograr una propuesta

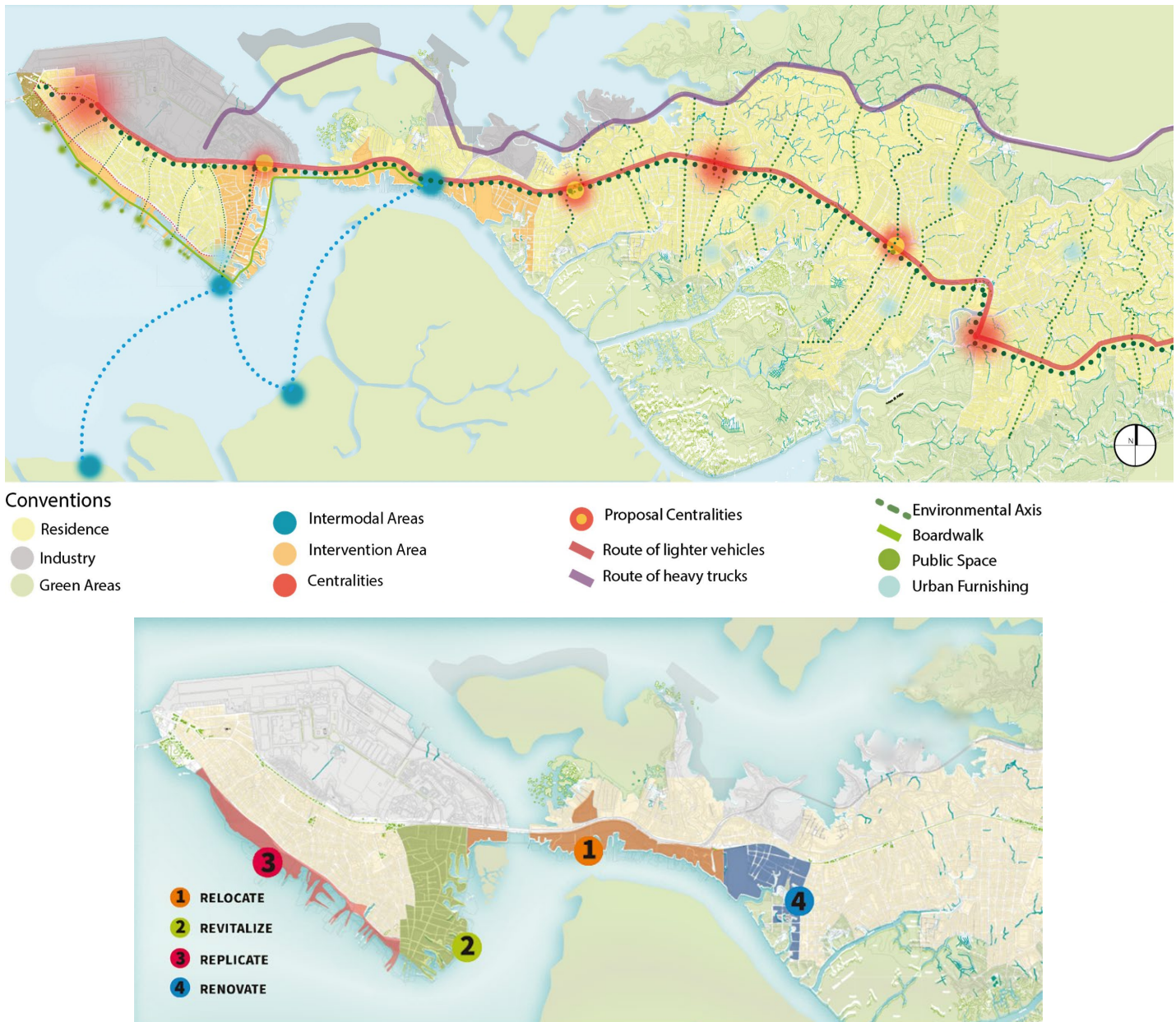


Figura 4. Plan Maestro Urbano. Propuesta del equipo MINGA 7 Fases del proyecto. Fuente: Elaborada por los autores

innovadora inspirada en viviendas sociales de bajo costo, sostenibles para las condiciones de clima en los próximos 50 años. El proceso fue el siguiente:

1. Se realizó un análisis e investigación del territorio, abarcando las condiciones medioambientales, históricas, sociales y económicas, viales, morfológicas, de los servicios públicos, de normativa, de usos y equipamientos y de riesgos.
2. Se inició con un esquema básico, yendo de una escala macro a una micro, identificando cuáles eran los lugares de la ciudad con más riesgos y condiciones críticas para trabajar sobre ellos dentro de un plan maestro.
3. En seguida, se planteó un Plan Maestro Urbano que comprendió tanto la zona continental como

- la isla de Cascajal, y contempló 3 fases donde se incorporó estrategias de relocalización de los habitantes de las zonas a afectar y diseño de vías y zonas a intervenir (tanto para desarrollo de vivienda como para equipamientos y espacio público). También se desarrolló a mayor detalle la escala de sitio, que abarca varias manzanas en el sector sur de la isla, replicando el prototipo de vivienda en las edificaciones en altura.
4. Finalmente, se realizó un prototipo de vivienda que fue construido a escala real para demostrar su funcionamiento y un modelo a escala 1:250 que muestra las unidades de vivienda que conforman las edificaciones en altura diseñadas para el plan urbano, además de algunas zonas de espacios públicos y la propuesta en cuanto a diseño vial.





Figura 5. Localización y propuesta a escala. Fuente: Elaborada por los autores.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se desarrolló una propuesta de renovación urbana factible, en un sector para el cual las autoridades municipales han planteado un proceso de desalojo debido al alto riesgo de inundación existente en la zona. La medida, que no considera alternativas de mitigación para conservar a los habitantes en su lugar, generaría el desarraigo de una población que depende económica y culturalmente de su relación con el mar. A continuación, se explica el modelo a partir de las escalas en las que se trabajó: de macro a micro.

### PLAN MAESTRO URBANO

Comenzando por la escala mayor, la propuesta urbana del equipo MINGA busca, a partir de la comprensión del contexto, generar estrategias para la solución a distintas problemáticas de la comunidad bonaverense. Una de las primeras consiste en generar dos vías importantes para la conexión entre la isla y la zona continental: una sería la ya propuesta por el POT, al norte de la ciudad, que recibiría el tráfico pesado y serviría como una conexión comercial para la ciudad. La otra vía sería el malecón –que se detallará más adelante–, diseñado para proporcionar el espacio público del que carece la ciudad y con varias opciones de transporte limpio.

De la misma manera se recuperarían distintas rutas ya existentes para aprovecharlas como ejes ambientales: en primer lugar, creando un gran separador verde que recorra la avenida Simón Bolívar (av. SB), la cual cruza toda la ciudad. En segundo, se ubicarían varios puntos de conexión importantes a lo largo de esta avenida, con la idea de que se conviertan en ejes ambientales secundarios y rematen en espacios públicos y equipamientos de orden recreativo mayormente. En tercer término, paralelamente al malecón, se habilitaría la calle 1ra

que se deriva al oeste de la avenida Simón Bolívar al oriente de la isla, recorre gran parte del borde y se une con la carrera 20, la cual lleva al lado este de la avenida principal (Simón Bolívar). Este camino se dispondría para transporte liviano, otros medios de transporte ya usados como el vehículo particular, taxis, buses que ya circulan en la ciudad, etc. (Figura 4).

A escala local, el proyecto se desarrollaría en 4 fases (Figura 5):

1. Relocalización: en esta etapa se pretende conectar la isla con la zona continental de la ciudad, mientras se genera espacio público y comercial a lo largo del puente del Piñal, la única infraestructura vial que conecta la isla con el continente en la actualidad. A su vez, se reubicaría a la población del área intervenida en un principio, de manera que se relocalizarían temporalmente en la porción continental de la ciudad dando paso a la segunda fase.
2. Revitalización: se procuraría revitalizar la primera zona a intervenir en dos frentes: el público, con la realización del tramo correspondiente del malecón, junto con los equipamientos y espacios públicos proyectados; y el privado, con la construcción de las zonas residenciales.
3. Replicación: el malecón se conectaría con el ya existente y todo el modelo de urbanización sería replicado a lo largo de los bordes sur y oeste de la isla de Cascajal, uniéndola, a su vez, con el continente. Se trata esta de una acción detonadora que pueda propiciar y promover la correcta urbanización hacia el sur y la consolidación de esta zona residencial con el espacio público que requiere.
4. Renovación: esta última fase consolidaría el proyecto de renovación urbana, conectando el borde entero de la isla con la zona continental.



Figura 6. Corte urbano de la propuesta y factores a potenciar. Fuente: Elaborada por los autores

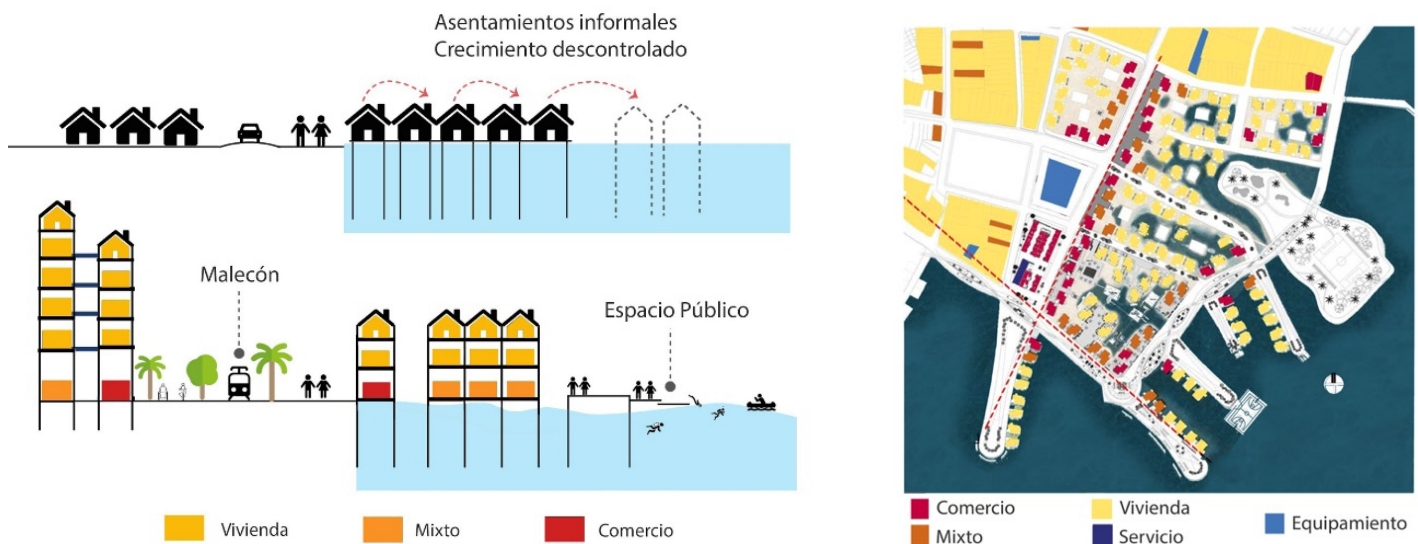


Figura 7. Altura y usos propuestos. Fuente: Elaborada por los autores.

## ESCALA LOCAL

### Uso sostenible de los recursos

Ante todo, se pretende reusar el suelo y la estructura urbana ya existentes con el fin de no generar intervenciones que traigan consigo más daño al territorio -en especial el crecimiento descontrolado hacia el mar y la deforestación de los manglares-, favoreciendo una estructura urbana más compacta y menos extendida (Urriza y Garriz, 2014). Seguidamente, debido a la importante relación con el mar que tienen los habitantes de Buenaventura, dentro del diseño urbano se contemplan las distintas actividades económicas que se dan a través de este cuerpo de agua, como: la pesca, una vía distinta a la terrestre para movilizarse entre las zonas aledañas y el área continental, además de su relación con las tradiciones de los lugareños y su connotación cultural. En tercer lugar, la implementación de nuevos mecanismos para suplir consumo energético se da en dos escalas. A escala macro, se pretende usar fuentes de energías renovables para los espacios públicos, además de la implementación del tranvía eléctrico como transporte público. A escala micro, se busca replicar el sistema fotovoltaico usado en el prototipo de vivienda, al igual que el sistema de recolección de aguas lluvias y los sensores inteligentes para controlar el consumo

de cada unidad habitacional. Cabe agregar que, en ambas escalas existe la posibilidad de generar otras opciones de energía renovable, como la eólica, mareomotriz y undimotriz.

### Uso sostenible del espacio construido y las actividades urbanas

En concordancia con el lema del equipo MINGA, "Comunidades sostenibles", se definieron tres factores a potenciar para el desarrollo del proyecto urbano en Buenaventura: la naturaleza, el turismo y el comercio (Figura 6). Mediante estas tres dimensiones se promueve la mixtura de usos en el proyecto, sin perder el propósito principal de desarrollar un modelo urbano de vivienda sostenible. De igual manera, están pensadas con el fin de incentivar los respectivos sectores de la economía y regenerar los espacios públicos de la ciudad, para potenciarla como un destino turístico y económico en Colombia, y balancear, consecuentemente, la calidad del sector residencial. Al mismo tiempo, se espera generar comunidades sostenibles, preservando los valores culturales de la población.

Así pues, la generación de distintos usos permite una mayor accesibilidad a los ciudadanos de acuerdo a las necesidades, reduciendo los tiempos y distancias de transporte. Es por





Figura 8. Diseño de espacios públicos / adaptabilidad e inundabilidad. Fuente: Elaborada por los autores.

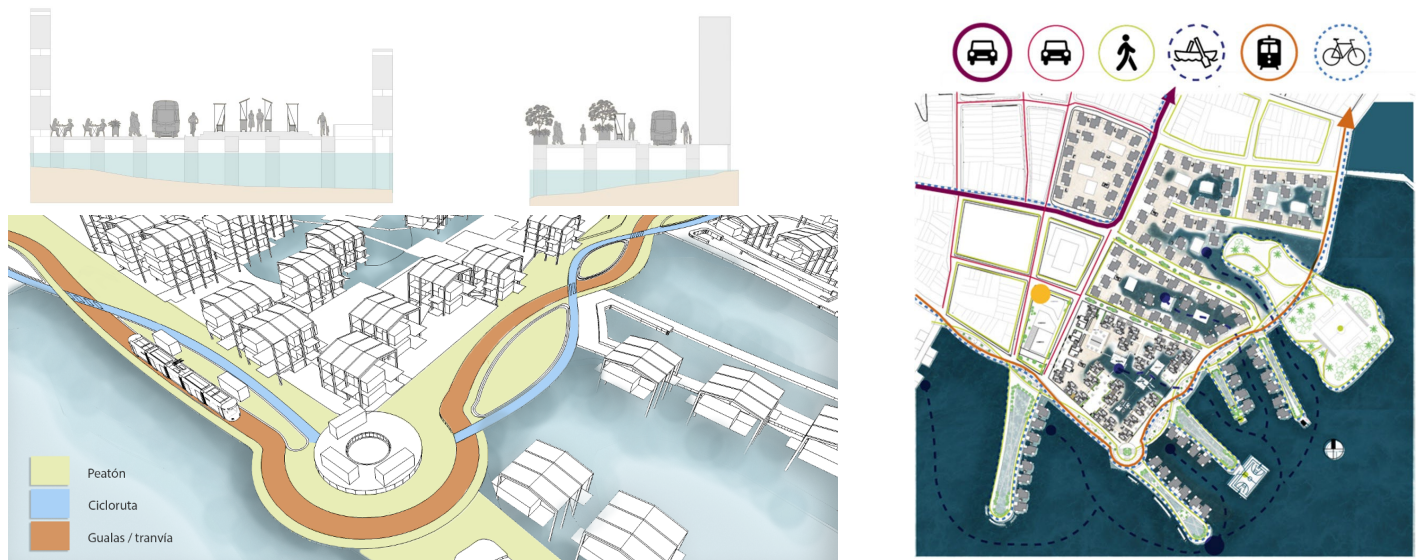


Figura 9. Propuesta de movilidad sostenible / Malecón. Fuente: Elaborada por los autores.

esto que, en la planta pública del proyecto, se propone la disposición de unidades de comercio que respondan a las vías principales, tanto vehiculares como peatonales (en las que se incluye el malecón), y conserven la privacidad de la vivienda y sus áreas comunes al interior de las manzanas. En la misma línea, ya que la densificación en altura permite una mayor capacidad en cuanto a número de habitantes en una menor porción de suelo, se decidió realizar bloques en altura que no superaran los 6 pisos ni fueran menores a 3 pisos. De esa forma, los edificios resultan dispuestos de manera tal que su altura disminuye conforme se acercan al mar (Figura 7).

### Espacio público efectivo y desarrollo de equipamientos

La deficiencia y carencia de espacio público en Buenaventura muestran la necesidad de diseñar espacios públicos efectivos que brinden a los habitantes más lugares de calidad, de mayor

envergadura, más accesibles y mejor diseñados. Se propone, entonces, el uso de los predios no construidos, con el fin de generar allí zonas públicas equipadas con juegos para niños, espacios de actividad física y, en la medida de lo posible, focos verdes para la ciudad. Estas zonas son diseñadas para ser resilientes ante una posible inundación, es decir, para que se adapten a los cambios de marea y así sea posible mitigar el impacto de posibles desastres naturales, cosa que también pretende el malecón (Figura 8).

### Transporte sostenible y accesibilidad

Para mejorar y facilitar la conexión entre la isla de Cascajal y la porción continental de la ciudad, se diseñó el malecón, en el que se planea converjan distintos medios de transporte limpios (Figura 9). El diseño se despliega a partir de una sola superficie, demarcando cada zona para su respectivo





Figura 10. Localización y planta de bloque diseñado a escala de sitio. Fuente: Elaborada por los autores.

usuario, con el objetivo de democratizar el espacio y fomentar una cultura en la que se privilegie al peatón, dando también lugar a demás medios de transporte. En un inicio, una vía será destinada para las tradicionales gualas, el sistema de transporte público informal más usado en la isla, haciéndolo formal y procurando su transición futura hacia el tranvía como sistema de transporte limpio. Conjuntamente, se asignará una vía para la cicloruta y otra gran porción para el peatón, esta última contigua al mar. Como una solución adicional, a partir del entendimiento de los distintos medios de transporte de Buenaventura, se incluyó una vía paralela al malecón, la cual atravesaría también toda la isla conectándola con el continente y en la que se daría el flujo de automóviles y motos.

### ESCALA DE SITIO

Para el proyecto urbano, el concurso SDLAC 2019 propuso el desarrollo a profundidad de un bloque o manzana en mayor detalle. Así, el equipo MINGA escogió un bloque o manzana al sur de la isla de Cascajal (Figura 10), en la comuna 3, zona en la que convergen distintas actividades y la que permitirá la conexión de la isla con la porción continental. Se resaltó la importancia de entender la manera cómo se concibe la ciudad para sus habitantes, las características de desarrollo urbano y sus formas de vida, derivado de lo cual se plantearon los siguientes objetivos:

- Resolver la alta demanda de vivienda efectiva por la creciente densidad poblacional en la isla, comenzando por las comunas 3 y 4, en las que existe mayor cantidad de viviendas construidas de manera informal, a fin de que se densifique en altura, liberando mayor espacio común y público en la primera planta, para lo cual se propone una densidad de mínimo 120 viviendas por hectárea.
- Lograr un balance entre la densidad de habitantes y el espacio público efectivo, mejorando y manteniendo la vida en comunidad.
- Propiciar las relaciones ya existentes con el mar, de modo que no se pierdan a pesar del cambio respecto a la forma de construcción en la vivienda.

- Diseñar un modelo de vivienda sostenible, el cual considere la posibilidad de albergar hasta ocho personas en dos módulos de vivienda independientes, respondiendo a la forma de vida de las familias bonaverenses en la que es común encontrar más de un núcleo familiar por unidad de vivienda. Además, debe ser más factible económicamente, sin sobrepasar los topes de la política de subsidio a la vivienda de interés social de Colombia, lo que vuelve el proyecto accesible a la población objetivo.
- Incluir zonas comunes para la integración de la comunidad, en las que se pueda permanecer mientras la marea sea baja, sean inundables cuando suba la marea y sean un medio de conexión y transporte con el mar.
- Las áreas comunes de circulación en las edificaciones serán puntos para propiciar el encuentro como una "extensión" de las zonas privadas de estancia, que favorezcan la vida en comunidad.
- Hacer uso de energías renovables.
- Realizar un diseño estructural acorde con una tipología de edificación resiliente, que permita contrarrestar los posibles efectos del cambio climático y el consecuente crecimiento del nivel del mar (Figura 11).
- Disponer algunas unidades de vivienda en la planta pública para la adaptación de pequeños locales comerciales; práctica muy usada en este sector de la ciudad.

### SISTEMA CONSTRUCTIVO: REINTERPRETACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN TRADICIONAL PALAFÍTICA

Se efectuó una reinterpretación de la tipología de vivienda palafítica, con un sistema estructural novedoso en Colombia, hecho a partir pórticos de madera laminada encolada, en reemplazo de la madera de manglar utilizada tradicionalmente, que permite la construcción de edificios multifamiliares de hasta seis pisos. Con ello, se reduce el impacto por deforestación de estos ecosistemas. Por otra parte, se pretende minimizar el riesgo de inundación por mareas en el clima actual y futuro y frenar el crecimiento informal de la isla mediante la densificación en altura de

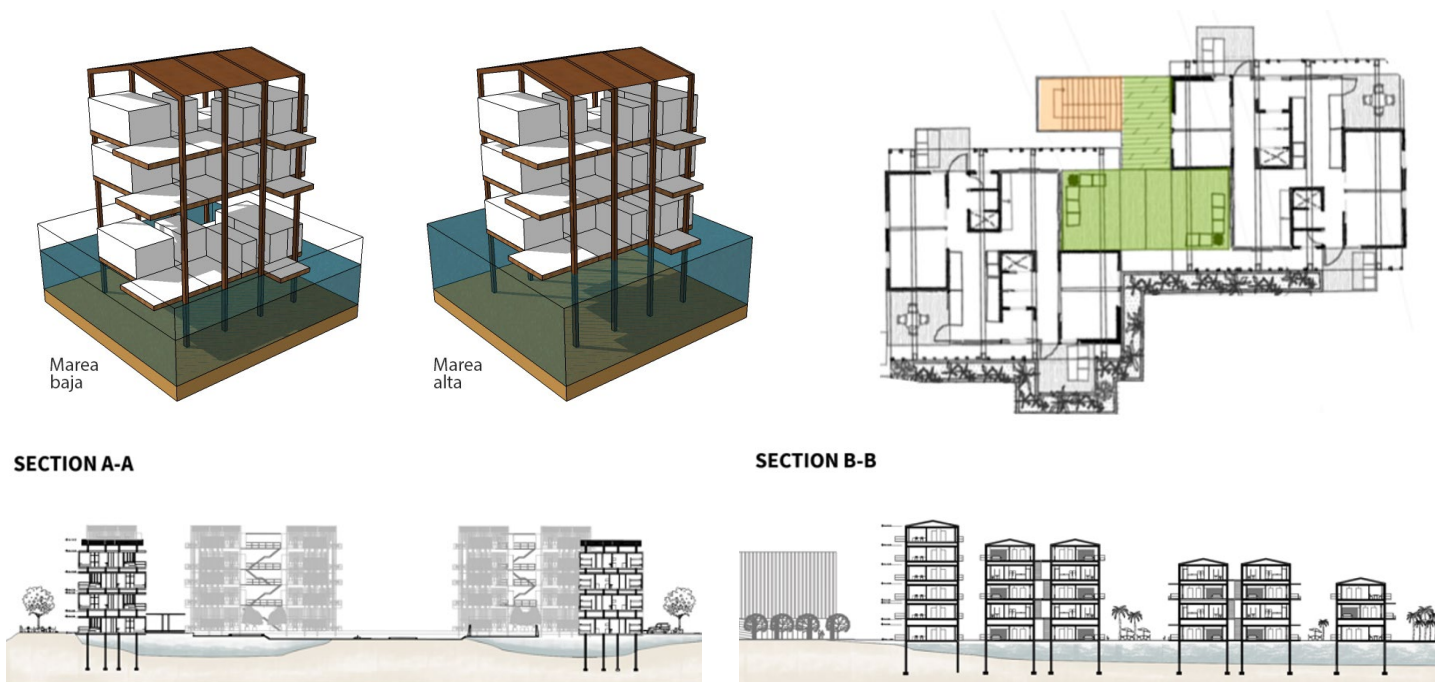


Figura 11. Esquema de flotabilidad, planta tipo y secciones del conjunto de viviendas. Fuente: Elaborada por los autores.

una zona urbana, aunado al diseño de equipamientos y espacio público hacia el borde de la isla.

### VIABILIDAD: POLÍTICA DE SUBSIDIO Y FINANCIACIÓN

La política de VIS (Vivienda de Interés Social) en Colombia tiene un sistema de subsidio a la demanda. Esta política busca incrementar la demanda efectiva de vivienda de interés social mediante subsidios a los beneficiarios, los que se complementan con créditos blandos y ahorro para que las familias con menos recursos puedan acceder a una vivienda propia. El valor otorgado a las familias beneficiarias, depende del rango de ingresos familiares y del costo total de la vivienda. Para promover el desarrollo de proyectos en áreas urbanas con tratamiento de renovación, el gobierno nacional amplió el tope de la vivienda de interés social objeto de subsidio hasta 175 SMMLV (Salarios Mínimo Mensual Legal Vigente) que equivalen, para el año 2020, a 153.615.525 COP (pesos colombianos), aproximadamente 41.794 USD (dólares estadounidenses) al 27 de julio de 2020.

El proyecto multifamiliar MINGA para la isla de Cascajal integra viviendas en bloques de edificios de hasta 6 pisos de altura, alcanzando una densidad de 127 viviendas por hectárea, cada una con opción de albergar hasta 2 núcleos familiares (8 personas máximo), con altos estándares de accesibilidad y calidad de los espacios públicos y colectivos. Lo anterior, mediante sistemas de construcción y prefabricación industrializada, y el empleo de materiales locales. Para enmarcarse en este rango de precios, la iniciativa plantea estrategias que fomentan el mejoramiento de la calidad en las condiciones urbanas del área de intervención, con las siguientes condiciones:

- Promueve la densificación del área con un proyecto integral que garantiza la construcción de equipamientos, servicios complementarios y de espacio público.
- Garantiza la prestación adecuada y eficiente de los servicios públicos domiciliarios.
- Prevé un adecuado uso y manejo del ambiente y de los recursos naturales.
- Promueve la protección e integración de las áreas de conservación y protección ambiental, de acuerdo con lo definido en el POT.
- Articula la vivienda de interés social con la infraestructura para el sistema vial de transporte.
- Promueve y genera redes de movilidad accesibles para personas con discapacidad y dificultades de locomoción a partir de la eliminación de barreras físicas.
- Mejora los estándares cualitativos de espacio público, buscando incrementar la calidad, la dotación y el mejor aprovechamiento de los espacios públicos existentes.
- Garantiza los sistemas de equipamientos colectivos que suplen las necesidades de la nueva población que se incorpora a la zona.
- Incorpora determinantes de gestión y prevención del riesgo en un sector que el plan de ordenamiento territorial ha identificado como de riesgo mitigable alto o medio.

## CONCLUSIONES

Con los resultados del proyecto MINGA, se demuestra la viabilidad de las estrategias propuestas para la renovación de los frentes marítimos en las ciudades costeras del

tropical mediante viviendas de bajo costo en altura, con una densidad habitacional que usa adecuadamente la infraestructura urbana existente y logra frenar el crecimiento de las áreas urbanas de las ciudades, atendiendo una problemática muy sensible en las ciudades litorales de América Latina y el Caribe (Barragán y De Andrés, 2016). El proyecto logra altos estándares de sostenibilidad puesto que su costo de construcción permite que sea subsidiado dentro de la política de VIS en Colombia. Este tipo de vivienda sostenible genera un menor costo para los usuarios durante su vida útil, ya que reduce el valor de los servicios públicos, gracias al uso de energía solar fotovoltaica, el aprovechamiento de las aguas lluvias y el usufructo económico de la propiedad, disponiendo un módulo como local comercial o a partir del arriendo de este como segunda unidad de vivienda de la casa.

Para concluir, si bien la propuesta urbana se sitúa en la ciudad de Buenaventura, Colombia, y teniendo en cuenta sus condiciones medio ambientales, sociales y económicas, las estrategias proyectuales empleadas son adaptables a otros territorios con condiciones similares. Así, el modelo de renovación urbana es replicable en cualquier ciudad costera con clima cálido - húmedo tropical, siempre y cuando se consideren las diferencias en cuanto a las condiciones, adecuándose al contexto en el que se desea implantar: contemplar niveles de riesgo, relaciones con la estructura urbana del lugar, características de la población y políticas de vivienda de los gobiernos locales.

En suma, se demuestra la factibilidad de desarrollar renovaciones urbanas sostenibles y se releva la importancia de generar proyectos urbanos que respondan a las necesidades de las comunidades -entendiendo las relaciones que estas tienen con su entorno-, como también de buscar soluciones que comprendan las particularidades del territorio existentes.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los miembros del equipo MINGA, estudiantes, profesores, colaboradores y voluntarios de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, de la Universidad Federal de Santa Catarina y el Instituto Federal de Santa Catarina. También a los organizadores del Solar Decathlon Latin America & Caribbean 2019.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcaldía de Buenaventura (2001). Acuerdo 03 de 2001, Plan de Ordenamiento Territorial POT "Convivencia Pacífica desde la Diversidad", Buenaventura 2001.

Barragán, J. M. y De Andrés, M. (2016). Expansión urbana en las áreas litorales de América Latina y Caribe. *Revista de Geografía Norte Grande*, (64), 129-149.

Béné, C., Mehta, L., Mcgranahan, G., Cannon, T., Gupte, J. y Tanner, T., (2018). Resilience as a policy narrative: potentials and limits in the context of urban planning. *Clim. Dev.*, 10(2), 116-133. DOI: <https://doi.org/10.1080/17565529.2017.1301868>

Cocuñame Ricardo, D. y Salcedo Hurtado, E. (2017). Evaluación del riesgo de inundación ante tsunami local en la isla de Cascajal, Pacífico Colombiano. *Revista de geografía Norte Grande*, (68), 185-219.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE] (2005). Proyecciones de población municipales por área. En: *Proyección municipios 2005 - 2020*. Bogotá D.C.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE] (2018). Necesidades Básicas Insatisfechas Comparación CG 2005 y CNPV 2018. En: *Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda 2018*. Bogotá D.C.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE] (2020). *La información del DANE en la toma de decisiones de los municipios del país*. Buenaventura, Valle del Cauca. Recuperado de <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/planes-desarrollo-territorial/100320-Info-Alcaldia-Buenaventura.pdf>

Hernández Araque, M.J. (2016). Urbanismo participativo. Construcción social del espacio urbano. *Rev. Arquít.*, 18(1), 6-17. DOI: <https://doi.org/10.14718/revarq.2016.18.1.2>

Hernández-Guerrero, J., Vieyra-Medrano, A. y Mendoza, M.E., (2012). Adaptation strategies in communities under precarious housing: Flooding risks in the peri-urban sector of the city of Morelia, Michoacán, México. *Appl. Geogr.*, 34, 669-679. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.04.010>

Hernantes, J., Maraña, P., Giménez, R., Sarriegi, J.M. y Labaka, L. (2019). Towards resilient cities: A maturity model for operationalizing resilience. *Cities*, 84, 96-103. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.07.010>

Herrera-Limones, R., León-Rodríguez, Á.L., López-Escamilla, Á. (2019). Solar Decathlon Latin America and Caribbean: Comfort and the balance between passive and active design. *Sustainability*, 11(13). DOI: <https://doi.org/10.3390/su11133498>

Herrera-Limones, R., Rey-Pérez, J., Hernández-Valencia, M. y Roa-Fernández, J. (2020). Student competitions as a learning method with a sustainable focus in higher education: The University of Seville "Aura Projects" in the "Solar Decathlon 2019". *Sustainability*, 12(4). DOI: <https://doi.org/10.3390/su12041634>

Jin, R., Yang, T., Piroozfar, P., Kang, B.G., Wanatowski, D., Hancock, C.M. y Tang, L. (2018). Project-based pedagogy in interdisciplinary building design adopting BIM. *Eng. Constr. Archit. Manag.*, 25(10), 1376-1397. DOI: <https://doi.org/10.1108/ECAM-07-2017-0119>

Kos, J.R. y De Souza, B.M. (2014). Educating home users through a solar house: The Ekó House experience. *Energy Build.*, 83, 181-185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.080>

Long, J. y Rice, J.L., 2019. From sustainable urbanism to climate urbanism. *Urban Stud.*, 56(5), 992-1008. DOI: <https://doi.org/10.1177/0042098018770846>



Martínez, A., García, H., Ramírez, C., Ramírez, D., Restrepo, J., Ortega, P., ... Rocha, L. A. (2013). *Hacia un desarrollo integral de la ciudad de Buenaventura y su área de influencia*. Bogotá: Fedesarrollo-CERAC.

Meerow, S., Newell, J.P. y Stults, M. (2016). Defining urban resilience: A review. *Landsc. Urban Plan.*, 147, 38–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011>

Musango, J K., Currie, P., Smit, S. y Kovacic, Z. (2020). Urban metabolism of the informal city: Probing and measuring the 'unmeasurable' to monitor Sustainable Development Goal 11 indicators. *Ecol. Indic.*, 119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106746>

Neumann, B., Vafeidis, A.T., Zimmermann, J. y Nicholls, R.J., 2015. Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding - A global assessment. *PLoS One*, 10(6). DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118571>

Nicholls, R.J., Hanson, S.E., Lowe, J.A., Warrick, R.A., Lu, X. y Long, A.J., 2014. Sea-level scenarios for evaluating coastal impacts. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Chang.*, 5(1), 129–150. DOI: <https://doi.org/10.1002/wcc.253>

Osuna-Motta, I. (2018). Aprender haciendo: La Experiencia De Aprendizaje En Construcción Sostenible Del Solar Decathlon. En Cortés, M. et al. (Eds.), *Sustentabilidad y tecnología : herramientas para la gestión segura y eficiente del hábitat (Hábitat Sustentable Contemporáneo)* (pp. 119–144). <https://doi.org/10.2307/j.ctvjhzpn5.8>

Rafferty J. (2009). Köppen climate classification. Wet equatorial climate. En *Tropical monsoon and trade-wind littoral climate. Encyclopedia Britannica*. Recuperado de <https://www.britannica.com/science/Koppen-climate-classification>

Schoening, M. (2014). *The crisis in Buenaventura: disappearances, dismemberment, and displacement in Colombia's main Pacific Port*. Human Rights Watch.

Solar Decathlon Latin America & Caribbean [SDLAC] (2019). *Rules Adjusted Version*. Recuperado de <https://solardecathlonlac.com>

Urriza, G. y Garriz, E. (2014). ¿Expansión urbana o desarrollo compacto? Estado de situación en una ciudad intermedia: Bahía Blanca, Argentina. *Revista Universitaria de Geografía*, 23(2), 97-123.

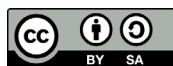
Vergel Tovar, E. (2010). Asentamientos precarios Una aproximación para su mejoramiento integral y prevención. *Dearq*, (6), 64–81. DOI: <https://doi.org/10.18389/dearq6.2010.08>

Wardekker, J.A., De Jong, A., Knoop, J.M. y Van Der Sluijs, J.P. (2010). Operationalising a resilience approach to adapting an urban delta to uncertain climate changes. *Technol. Forecast. Soc. Change*, 77(6), 987–998. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2009.11.005>

World Health Organization [WHO] (2016). *Urban green spaces and health*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.







Recibido 22/02/2021  
Aceptado 24/07/2021

# APLICACIÓN DE LA "FOOTPRINT FAMILY" PARA LA EVALUACION AMBIENTAL DE EDIFICIOS PUBLICOS EN ESPAÑA. ESTUDIO DE CASO: CENTRO EDUCATIVO.

## APPLICATION OF THE "FOOTPRINT FAMILY" FOR THE ENVIRONMENTAL EVALUATION OF PUBLIC BUILDINGS IN SPAIN. CASE STUDY: EDUCATIONAL CENTER.

CRISTINA RIVERO-CAMACHO  
Doctora en Arquitectura  
Investigadora del grupo ARDITEC. ETS Ingeniería de Edificación  
- Departamento de Construcciones Arquitectónicas II.  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, España  
<https://orcid.org/0000-0001-9411-7311>  
[cririvcam@gmail.com](mailto:cririvcam@gmail.com)

ANTONIO FERREIRA-SÁNCHEZ  
Doctor en Arquitectura  
Funcionario del Ministerio  
"Misterios de Defensa de España"  
Madrid, España  
<https://orcid.org/0000-0001-5814-4179>  
[ferreirasanchez@hotmail.com](mailto:ferreirasanchez@hotmail.com)

### RESUMEN

Dentro de los compromisos de la Agenda 2030, destacan los objetivos socioeconómicos para un desarrollo sostenible del conjunto de la sociedad, que plantean minimizar el impacto producido por la Administración Pública sobre el medio ambiente en todas sus actividades. Por ello, la creación y reforma de sus infraestructuras, necesarias para su funcionamiento y los servicios que presta, supone un gran impacto. El objetivo del presente trabajo se centra en una adaptación metodológica para evaluación ambiental de las obras promovidas por entes públicos, cuantificando y localizando los focos de impacto para poder tomar las medidas que los minimicen. Para ello, se proponen como indicadores la familia de las huellas, ecológica, de carbono e hídrica, caracterizadas por la simpleza del mensaje y la facilidad para implantarse en el sector de la construcción, a través del control de costes de los proyectos. En concreto, se presenta un estudio de caso, la construcción de un centro de educación infantil en la ciudad de Madrid, para cuyo análisis se exponen y analizan los datos necesarios. Los resultados reflejan información interesante, en términos de huellas, sobre los elementos que deben ser controlados y mejorados en el diseño del proyecto, tales como el hormigón y acero.

### Palabras clave

Ingeniería de la construcción, impacto ambiental, indicadores ambientales.

### ABSTRACT

Within the commitments of the 2030 Agenda, the socio-economic objectives for a sustainable development of society as a whole, stand out, which propose minimizing the impact produced by all the activities of the Public Administration on the environment. Therefore, the creation and retrofitting of its infrastructures, needed for its operation and the services it provides, has a great impact. The goal of this work focuses on a methodological adaptation for the environmental evaluation of the works promoted by public organizations, quantifying and locating the sources of impact with the purpose of taking the measures to minimize them. For this, the footprint family, ecological, carbon, and water, are proposed as indicators, characterized by the simplicity of their message and the ease of their implementation in the construction sector, by controlling project costs. A case study is presented, the construction of an early childhood education center in the city of Madrid, for which the data needed for the calculation are presented and analyzed. The results reflect interesting information in terms of footprints, on the elements that must be controlled and improved in the project design, such as concrete and steel.

### Keywords

Construction engineering, Environmental impact, Environmental indicators.

## INTRODUCCIÓN

Dentro de las directrices indicadas por la Agenda 2030 para un desarrollo sostenible de la sociedad española, se establecen objetivos como elaborar infraestructuras sostenibles y aminorar su impacto, además de orientar la actividad empresarial y pública hacia una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Dentro de las actividades propias de la Administración Pública, la construcción de nuevas edificaciones o la reforma de las existentes, suponen un impacto que es necesario cuantificar para poder tomar las medidas que lo minimicen y, a la vez, ayuden en la toma de decisiones. Se ha determinado que el sector de la construcción, en su actividad productiva, supone el consumo del 40% del total de los recursos naturales, así como del 30% de la energía consumida y produce por encima del 30% de los gases de efecto invernadero emitidos (Fundación General de la Universidad Complutense de Madrid, 2010). Considerando que la actividad relacionada con la contratación pública de obras representó en 2019 hasta un 23% del importe total contratado por la Administración General del Estado en España (Comisión Nacional del Mercado y la Competencia, 2019) y que ascendió a casi 1.000 millones de euros, lo cual constituye un 5% del PIB del país, es posible ofrecer una idea de del importante impacto del sector de la construcción en la actividad productiva.

La necesidad de definir indicadores cuyas aplicaciones sean rápidas y cuyas interpretaciones sean simples, hacen de la Huella de Carbono (HC), la ecológica (HE) y la hídrica (HH), valiosas herramientas para la evaluación del impacto del proceso constructivo (Zhang, Dzakpasu, Chen y Wang, 2017). Son, asimismo, exitosas gracias a que los resultados que producen son comprensibles por la sociedad no científica, y a su facilidad de aplicación en la toma de decisiones (Bare, Hofstetter, Pennington y Udo de Haes, 2000) y políticas, por lo que en su conjunto reciben el nombre de "footprint family" (Vanham et al., 2019). Las huellas son ideales como indicadores ambientales dentro de la contratación pública (Kairies, Muñoz y Martínez, 2021) y el desarrollo legislativo en materia de sostenibilidad, a pesar de que se necesitan avances en la estandarización de su uso (Laurent y Owsianiak, 2017).

En primer lugar, por ser la más empleada, la HC mide la cantidad total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y se expresa en unidades de masa de CO<sub>2</sub> equivalente. Existe una gran cantidad de revisiones bibliográficas relacionadas con el empleo del indicador HC en la construcción (Geng, Mansouri y Aktas, 2017), sin embargo, los resultados no son siempre comparables, debido a la ausencia de una metodología que siga los estándares internacionales (Dossche, Boel y De Corte 2017). Por ello, también

se han realizado estudios en los últimos años para establecer baremos que permitan definir intervalos razonables de emisiones de CO<sub>2</sub> en los procesos constructivos (Chastas, Theodosiou, Kontoleon y Bikas, 2018).

En segundo lugar, destaca el consumo de agua, para ello el indicador HH, mide el volumen de agua empleado, tanto de forma directa (agua consumida desde la red de suministro), así como indirecta, conocida también como Agua Virtual (AV). El concepto fue formulado por Allan (1993) como indicador del agua dulce que se consume en cualquier proceso productivo. Aún puesto en crisis (Velázquez, Madrid y Beltrán, 2011; Beltrán y Velázquez, 2015), el concepto ha tenido un gran desarrollo y resulta de utilidad para conseguir una mejor gestión del agua asociada a los edificios. No obstante, son pocos los estudios sobre edificación que emplean este indicador. El AV en construcción se define como el volumen de agua dulce consumida para producir materiales de construcción a utilizar desde su cuna a la puerta de la fábrica. Sobresalen los estudios australianos del sector terciario que se abocan al consumo de AV durante la etapa de construcción respecto al resto del Ciclo de Vida del Edificio (CVE) (McCormack, Treloar, Palmowski y Crawford, 2007). También Crawford y Pullen (2011) analizaron el agua en el CVE residenciales durante un periodo de 50 años y concluyeron que el AV en materiales de construcción es mayor que el consumo directo de las viviendas, por lo que las políticas sobre el agua deben incluir también los consumos virtuales. Ferriz Papí (2012) realizó un estudio sobre el consumo de agua que utilizan los materiales de construcción a lo largo de su ciclo de vida y obtuvo unos resultados estadísticos similares, durante 3 años en 200 proyectos en Cataluña.

El tercer indicador de la familia de huellas es la HE que se concibe como la superficie de tierra necesaria para suministrar los recursos (cereales, pienso, leña, pescado y terreno urbano) y absorber las emisiones (CO<sub>2</sub>) de la sociedad mundial, es decir, mide la superficie de terreno productivo en hectáreas globales (hag). En los últimos años, algunas investigaciones avalan la idoneidad del indicador para el análisis del impacto ambiental de la edificación. Respecto al ciclo de vida del edificio, destacan los trabajos de González, Marrero y Solís (2015), que desarrollan la metodología de cuantificación para la construcción del edificio. Martínez-Rocamora, Solís-Guzmán y Marrero (2016b), por su parte, diseñan un método de cálculo de los costes económicos e impacto ambiental durante el uso y mantenimiento, arrojando datos en términos de HE. Alba-Rodríguez (2016) propone el desarrollo de una metodología para conocer la viabilidad ambiental de la recuperación de edificios frente a su demolición. Freire, Alba y Marrero (2019) determinan la HE de los elementos que forman parte de las tradicionales bases de costes de la construcción

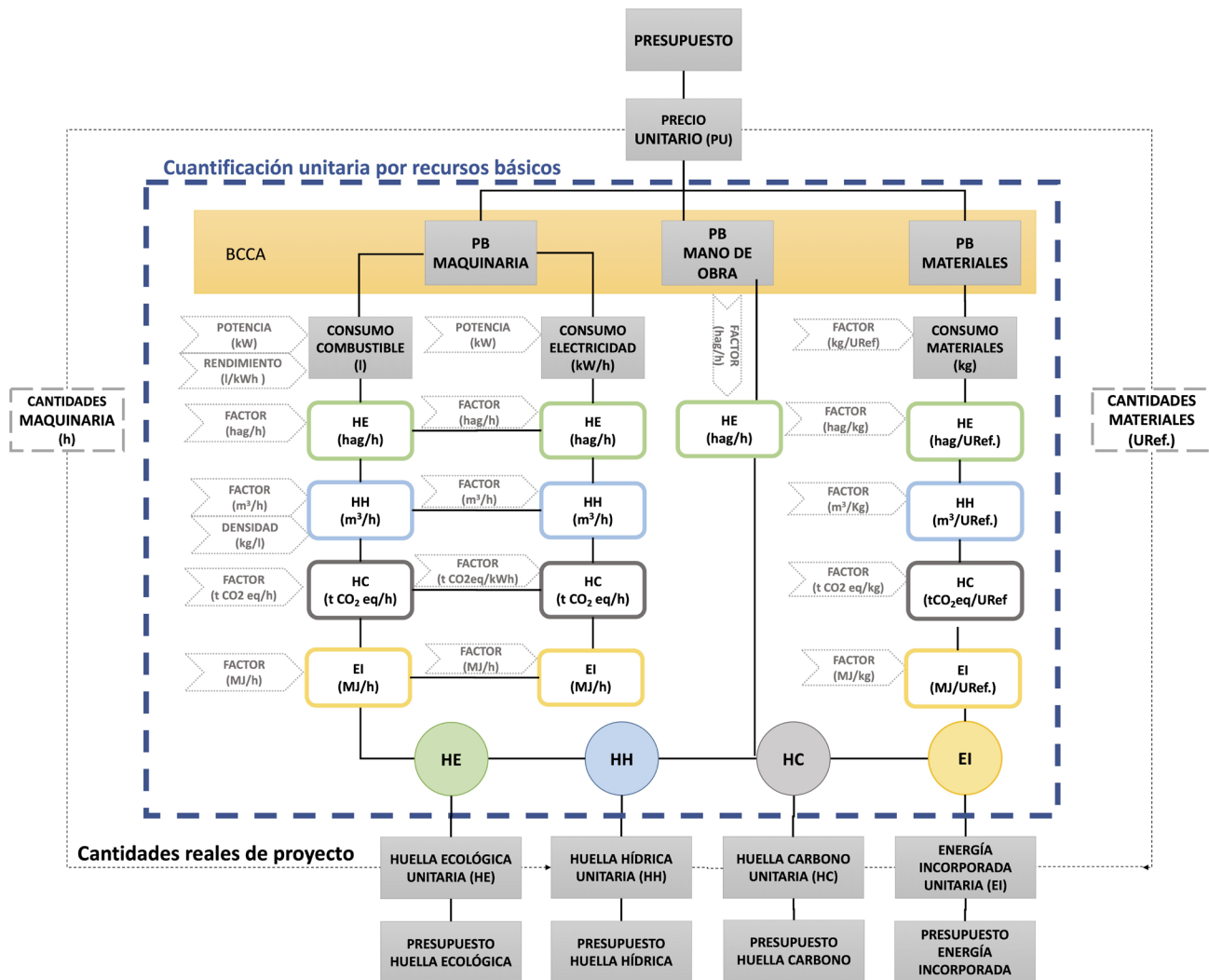
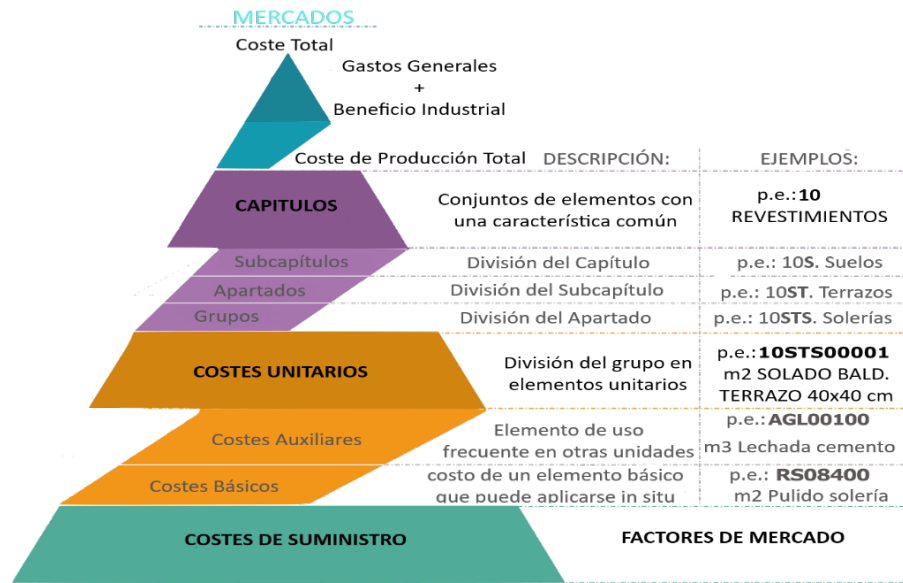


Figura 1. (a) Estructura de precios del BCCA. (b) Aplicación de la metodología general a los costes/precios unitarios. La energía incorporada (EI) es un impacto intermedio que también se calcula. Fuente: (a) Elaborado a partir de Marrero et al., 2020. b) (Rivero, 2020, p. 39).

y, finalmente, Rivero (2020) verifica todas las etapas del CVE de construcciones residenciales desde una nueva perspectiva de "presupuesto ambiental".

Actualmente, la administración pública española ha adquirido el compromiso de minimizar el impacto de su actividad en el medio ambiente. Esto se ve reforzado por las políticas públicas provenientes de la Unión Europea para la contratación pública, las cuales instan a que las adjudicaciones de los contratos se realicen en base a una pluralidad de criterios, económicos, cualitativos y sociales, dotando de gran relevancia los aspectos medioambientales (Ley Contratos del Sector Público, 2017). En consecuencia, se requiere del acercamiento de los presupuestos de los proyectos a este tipo de metodologías de evaluación de impacto ambiental, de manera que estas se adapten a las singularidades de las infraestructuras públicas. Desde esa perspectiva, y siguiendo la línea del presupuesto ambiental, se evalúa aquí el impacto que supone la construcción de un edificio del sector terciario, concretamente, un centro de educación infantil en Madrid, España. Se plantea su análisis global a partir de las tres huellas presentadas: de carbono, hídrica y ecológica.

## METODOLOGÍA

Para la consecución del objetivo propuesto, se parte del presupuesto económico de la obra que, siguiendo la estructura de costes establecida por la Ley de Contratos del Sector Público y su reglamento de desarrollo (Reglamento de la Ley de Contratos del Sector Público, 2001), establece la subdivisión del presupuesto en Precios Básicos (PB), Auxiliares (PA) y Unitarios (PU) a los que se asignan los costes directos e indirectos de cada unidad de obra. En la Figura 1a se muestra la clasificación piramidal de dicha estructura de costes/precios en el caso particular de su aplicación en el Banco de Costes de la Construcción de Andalucía (Marrero y Ramírez de Arellano, 2010). Posteriormente, con la medición de unidades de obra o PU, se obtiene el importe de cada uno y, por agregación, el presupuesto total de la obra.

La determinación de los distintos indicadores, HE, HC y HH (Figura 1-b) se realiza siguiendo la metodología definida por Freire y Marrero (2015a). El impacto de los materiales y maquinaria, se calcula mediante la conversión de la unidad de medida del presupuesto a kg. Los impactos por kg se obtienen de la base de datos de análisis de ciclo de vida, Ecoinvent LCA (Ecoinvent Center, 2013), conocida por ser una de las bases más completas a nivel europeo (Martínez-Rocamora *et al.*, 2016a) y por su integración con el software Simapro LCA (PRé Sustainability, 2016). El trabajo es similar al realizado para el cálculo de la HC con la herramienta SOFIAS, que utiliza datos de las

declaraciones ambientales de productos, OpenDAP, o de la plataforma BEDEC, desarrollada por el Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña [ITeC] (ITeC, 2013). En la Figura 1-b se expone de forma esquematizada la integración de las huellas en los presupuestos de obra para el caso particular del Banco de Costes de la Construcción de Andalucía (BCCA) (Marrero y Ramírez de Arellano, 2010). La formulación se resume en la Tabla 1, relativa a la HE, y en la Tabla 3, relativa a la HC y la HH. La metodología, que se ordena en tres niveles (datos de entrada, impactos y huellas), permite, desde los datos generales de la obra y los económicos del presupuesto, obtener el impacto ambiental del proyecto. El presente estudio evalúa, dentro del ciclo de vida, la etapa de construcción que incluye lo que se consume dentro de la obra, por lo que los contornos de los impactos corresponden a los criterios de medición en el presupuesto.

La maquinaria de obra se calcula en función de la potencia de motor y las horas de uso en la obra, y se determina la energía consumida en kWh que se transformará en emisiones de CO<sub>2</sub> (Freire y Marrero, 2015a). También se incluye en el cálculo la maquinaria del transporte de Residuos de Construcción y Demolición (RCD). Esta parte del presupuesto de obra se incorpora, en un capítulo independiente, tal y como establece el RD 105/2008 (Marrero y Ramírez de Arellano, 2010) que regula la gestión de RCD en España.

En el caso particular del impacto de la mano de obra, que solo se calcula en el indicador HE, se determina el alimento consumido como fuente energética del trabajador (Tabla 2). Se utiliza como base un menú típico para un adulto compuesto por carnes, pescados, cereales y agua (Grunewald, Galli, Katsunori, Halle y Gressot, 2015), y se determina la HE relativa en: pastos, mar y cultivo. La HE de la mano de obra incluye asimismo sus Residuos Sólidos Urbanos (RSU) que corresponde a la media generada por cada trabajador y sus correspondientes factores de emisiones.

La HE tiene en cuenta, además, el impacto debido a la superficie de terreno ocupada, que no será productiva agrícolamente, y el agua consumida en la ejecución. A todos los impactos se asigna una HE parcial en distintas categorías del indicador (mar, pastos, cultivos, suelo) para, en definitiva, a través de factores de conversión, obtener la huella global en una superficie equivalente.

En los consumos directos de agua y energía en la propia ejecución de la obra, se han establecido de manera empírica el valor del consumo en metros cúbicos de agua en función de la superficie construida (González *et al.*, 2015), a la que se aplica la transformación en emisiones de CO<sub>2</sub> a través de la energía en kWh necesarios para obtener un metro cúbico de agua. De manera análoga, se determina la energía eléctrica consumida (Freire y Marrero, 2015b).

HUELLA ECOLÓGICA		n° ecuación
<b>Mano de obra</b>		
HE <sub>COMIDA</sub> : HE producida por el consumo de alimentos (hag)		
$HE_{COMIDA_i} = (H_{TRAB} / H_D) \times (PC/100) \times (HE_i / 365)$		1
H <sub>TRAB</sub> : Número de horas trabajadas (h)		
H <sub>D</sub> : Número de horas trabajadas por día (8h/día/persona)		
PC: Porcentaje que representa el desayuno y el almuerzo de la comida del trabajador (60%)		
HE <sub>i</sub> : Huella del consumo de comida en categoría i de HE (gha/persona) (Tabla 2)		
365: días en un año		
HE <sub>RSU</sub> : HE producida por los residuos sólidos urbanos (hag)		
$HE_{RSU} = (H_{TRAB} \times R_{RSU} \times E_{RSU} \times 0.72) / A_F \times FE_B$		2
R <sub>RSU</sub> : Cantidad de RSU producido por hora de trabajo (0.000077 t/h por persona) (EUROSTAT 2015);		
E <sub>RSU</sub> : factor de emisiones por residuo (0.244 t CO <sub>2</sub> /tRSU) (Almasi y Milios, 2013)		
0.72: CO <sub>2</sub> absorbido por los bosques. El 28% restante, absorción de océanos (Borucke et al., 2013)		
A <sub>F</sub> : factor de absorción de los bosques (3.59t CO <sub>2</sub> /ha)		
FE <sub>B</sub> : factor de equivalencia de los bosques (hag/ha)		
<b>Materiales</b>		
HE <sub>MAT</sub> : HE de materiales de construcción (ha)		
$HE_{MAT} = ((\sum C_i \times E_{MAT_i}) \times 0.72) / A_F \times FE_B + HE_{TRAN} \times Cm$		3
C <sub>i</sub> : consumo del material i (kg)		
E <sub>MAT</sub> : emisiones por material (kg CO <sub>2</sub> /kg material)		
HE <sub>TRAN</sub> : huella ecológica del transporte de materiales de construcción (ha/kg)		
<b>Maquinaria</b>		
V: consumo de combustible (litros) (50)		
$V = (Pot \times TU \times Rend)$		4
Pot: potencia de motor de la maquinaria eléctrica (kW)		
TU: tiempo utilización según mediciones (horas)		
Rend: combustible consumido por el motor según sea gasoil o gasolina (l/kWh)		
HE <sub>COMB</sub> : HE consumo combustible (fósil) de maquinaria (hag)		
$HE_{COMB} = (V \times E_{COMB} \times 0.72) / A_F \times FE_B$		5
E <sub>COMB</sub> : factor de emisión del combustible (kg CO <sub>2</sub> /litros). Dato español: 2.616 kg CO <sub>2</sub> /l (IDAE, 2011);		
HE <sub>ELEC</sub> : HE consumo electricidad de maquinaria (hag)		
$HE_{ELEC} = ((Pot \times TU) \times E_{ELEC} \times 0.72) / A_F \times FE_B$		6
E <sub>ELEC</sub> : factor de emisión del mix energético (kg CO <sub>2</sub> /kWh). Dato español: 0.248 kg CO <sub>2</sub> /kWh (REE, 2014).		
<b>Agua consumida</b>		
HE <sub>AGUA</sub> : HE de agua consumida (hag)		
$HE_{AGUA} = ((C \times IE_{AGUA} \times E_{AGUA} \times 0.72) / A_F) \times FE_B$		7
C: consumo (m <sup>3</sup> )		
IE <sub>AGUA</sub> : intensidad energética del agua (0.44 kWh/m <sup>3</sup> ) (EMASESA, 2005)		
E <sub>AGUA</sub> : factor de emisión de electricidad (0.000248 kg CO <sub>2</sub> /kWh) (REE, 2014)		
<b>Superficie consumida</b>		
HE <sub>sup</sub> : HE de superficie consumida (hag)		
$HE_{sup} = S \times FE_x$		8
S: superficie de ocupación directa (ha)		
FE <sub>x</sub> : factor de equivalencia de la superficie construida (hag/ha).		

Tabla 1. Formulación del modelo HE. Fuente: Elaboración de los autores.



Cultivos (10 <sup>-3</sup> gha)	Pastos (10 <sup>-3</sup> gha)	Mar (10 <sup>-3</sup> gha)	Fósil (10 <sup>-3</sup> gha)
1,45	0,27	0,41	0,49

Tabla 2. HE del consumo de comida diario por año y persona en España. Fuente: González Vallejo (2017, p. 270).

HUELLA DE CARBONO	
Materiales	
HC <sub>MAT</sub> : HC de materiales de construcción (tCO <sub>2</sub> ,eq)	
$HC_{MAT} = (\sum_i C_{m_i} \times E_{MAT}) + (HC_{TRAN} \times C_m)$	9
C <sub>m</sub> : consumo del material i (kg)	
E <sub>MAT</sub> : emisiones por material (tCO <sub>2</sub> ,eq/kg material)	
HC <sub>TRAN</sub> : huella de carbono del transporte de materiales de construcción (tCO <sub>2</sub> ,eq/kg)	
Maquinaria	
V: consumo de combustible (litros)	
$V = (Pot \times TU \times Rend)$	10
Pot: potencia de motor de la maquinaria eléctrica (kW)	
TU: tiempo utilización según mediciones (horas)	
Rend: combustible consumido por el motor según sea gasoil o gasolina (l/kWh)	
HC <sub>COMB</sub> : HC consumo combustible (fósil) de maquinaria (tCO <sub>2</sub> ,eq)	
$HC_{COMB} = V \times E_{COMB}$	11
E <sub>COMB</sub> : factor de emisión del combustible (tCO <sub>2</sub> ,eq/litros). Dato: 2.616 kg CO <sub>2</sub> /l (IDAE, 2011);	
HC <sub>ELEC</sub> : HC consumo electricidad de maquinaria (tCO <sub>2</sub> ,eq)	
$HC_{ELEC} = (Pot \times TU) \times E_{ELEC}$	12
E <sub>ELEC</sub> : factor de emisión del mix energético (kg CO <sub>2</sub> /kWh). Dato: 0.248 kg CO <sub>2</sub> /kWh (REE, 2014).	
HUELLA HÍDRICA	
Materiales de construcción	
WF <sub>ma</sub> : Huella Hídrica parcial del consumo de materiales (m <sup>3</sup> )	
$WF_{ma} = \sum (C_{mai} \cdot VW_{mai})$	13
C <sub>mai</sub> : Consumo de materiales i (kg)	
VW <sub>mai</sub> : Agua virtual del material i (m <sup>3</sup> /kg)	
WF <sub>tr</sub> : Huella parcial del transporte del material (m <sup>3</sup> )	
$WF_{tr} = \sum (\frac{W_{mai}}{T_{cap}} \cdot D_{ma}) \cdot T_{con} \cdot VW_f$	14
W <sub>mai</sub> : Peso del consumo material i (t)	
T <sub>cap</sub> : Capacidad del transporte (t)	
D <sub>ma</sub> : Distancia media de transporte (km)	
T <sub>con</sub> : Consumo de combustible del transporte (l/100 km)	
VW <sub>f</sub> : Factor de agua virtual del combustible (m <sup>3</sup> /l)	
Maquinaria.	
WF <sub>mc</sub> : Huella hídrica parcial de la maquinaria (m <sup>3</sup> )	
$WF_{mc} = \sum (H_{mci} \cdot C_{fi} \cdot VW_{fi})$	15
H <sub>mci</sub> : Horas de uso de la maquinaria i (h)	
C <sub>fi</sub> : Factor de consumo de la maquinaria i (l/h or kW)	
E <sub>fi</sub> : Factor de agua virtual del combustible usado por la maquinaria i (m <sup>3</sup> /l or m <sup>3</sup> /kWh)	

Tabla 3. Formulación modelos HC y HH. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 2. a) Foto real b) Alzado principal y laterales del CEI en El Goloso. Fuente: a) Elaborada a partir de Google map. b) Extraída de Barbero (2018, p. 352).

## ESTUDIO DE CASO

España cuenta con 34.168 centros educativos no universitarios, según el Registro Estatal de Centros Docentes no Universitarios del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. De ellos, la mayoría son públicos (el 65,9%). Por ello, como edificio público representativo, para el estudio de caso se calcula el impacto de la construcción de un centro de educación infantil en El Goloso, Madrid. El edificio es dos plantas, posee una superficie construida total de 874,72m<sup>2</sup> y está completamente dotado para dar cabida a 84 niños. Se ha seleccionado un edificio con soluciones constructivas más frecuentes de las edificaciones públicas actuales en España y que, a su vez, contempla una amplia variedad de partidas de obra distintas al albergar diferentes dotaciones e instalaciones. Está compuesto por aulas, aseos, servicio de cocina, asistencia médica y administración. Su planta se desarrolla en U, alrededor del patio de juegos parcialmente cubierto y su acceso se realiza a través de la fachada principal (Figura 2). Su presupuesto es 1.834.831,14€ y se ha ejecutado en un plazo de 12 meses.

Constructivamente, se soporta sobre cimentación por losa armada de hormigón, estructura de forjado sanitario en planta baja y losa superior de hormigón armado, apoyada esta última sobre pilares de hormigón armado. El cerramiento principal se caracteriza por su fachada

ventilada con acabado en paneles de aluminio lacado y aislamiento de lana de roca, mientras que las fachadas laterales y la trasera se resuelven con un cerramiento de doble hoja de fábrica de ladrillo revestida con mortero monocapa de acabado blanco. Las divisiones interiores se realizan con sistema de paneles de yeso laminado y falsos techos desmontables. La cubierta del edificio es plana y ajardinada, y el patio de juegos cuenta con un muro verde y pavimentos de caucho adaptados al uso infantil. Las carpinterías interiores son de madera y las exteriores de aluminio, con rotura de puente térmico y acristalamiento doble. Los acabados interiores son suelos en linóleo, salvo en la cocina y aseos, que son de gres antideslizante. A nivel de instalaciones, el edificio dispone de los elementos básicos de saneamiento, agua, electricidad, climatización, comunicaciones y protección contra incendios. En cuanto a la urbanización, se sustituyen parcialmente pavimentos, acerados y conexión a las instalaciones generales y viales del entorno.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El primer paso consiste en obtener de las bases de datos de análisis de ciclo de vida el impacto por familias de materiales de construcción, (Tabla 4). Estos datos se aplican las cantidades de unidades del proyecto recogidas en el presupuesto.

MATERIAL	HH (m <sup>3</sup> /t)	HE (hag/t)	HC (t CO <sub>2</sub> eq. /t)
Suelo	0	0,005	0,004
Madera	2,62	-0,483	-0,990
Hormigón	1,68	0,057	0,112
Asfalto	3,0	0,098	0,21
Cerámica	1,0	0,107	0,22
Áridos y piedras	1,2	0,005	0,004
Metales	81	0,907	2,01
Plásticos	456	0,898	1,97
Vidrio	17	0,30	0,669
Morteros y pastas	67	0,294	0,610

Tabla 4. Huellas de las familias de materiales por tonelada. Fuente: Elaboración de los autores.

Capítulos del proyecto	HE (hag)	HC (tCO <sub>2</sub> eq)	HH (m <sup>3</sup> )
C01.: Demoliciones	22,747	53,426	685,630
C02.: Acondicionamiento de terrenos	23,270	57,177	705,403
C03.: Cimentación	52,062	122,665	2012,721
C04.: Saneamiento	7,056	17,153	301,713
C05.: Estructura	50,776	116,693	1904,439
C06.: Albañilería	62,697	138,381	2107,457
C07.: Cubierta	13,188	26,854	723,513
C08.1: Inst. Climatización y ventilación	5,812	11,913	387,321
C08.2: Inst. Eléctrica	4,988	15,967	176,894
C08.3: Inst. Agua (Suministro y evacua)	13,206	26,404	190,653
C08.4: Inst. Producción agua caliente	9,524	23,723	759,060
C08.5: Inst. Accesibilidad	14,628	32,875	297,379
C09. Aislamientos	3,133	8,874	148,149
C10. Revestimientos	30,980	66,404	1783,008
C11. Carpintería, seguridad y protección	7,866	16,487	380,069
C12. Vidriería	3,719	8,292	250,583
C13. Pinturas	6,671	10,516	268,751
C15. Urbanización	29,263	64,923	949,244
TOTAL	361.586	818,728	14031,988

Tabla 5. Resultados obtenidos por capítulos de proyecto. Fuente: Elaboración de los autores.

En el proyecto se obtiene una HE total de 361,6 hectáreas globales/ año (Tabla 5), donde las actividades relacionadas con los trabajos de albañilería corresponden a un 17,3% del total, los que presentan una mayor HE, seguidos de la cimentación y la estructura, con un 14,4% y 14,0%, respectivamente. El peso total de los materiales del edificio es de 1.986.086,61 kg, los cuales suponen una

repercusión de 2.270,54 kg/m<sup>2</sup>. Y se generan 95.136,07 kg de RCD o 108,76 kg /m<sup>2</sup> de superficie construida.

Los materiales con un mayor impacto ambiental, con más del 69% de la HE, se presentan en este orden: hormigones, metales y aleaciones y cerámicas (Figura 3). Dado lo anterior, cambios en la energía incorporada en los

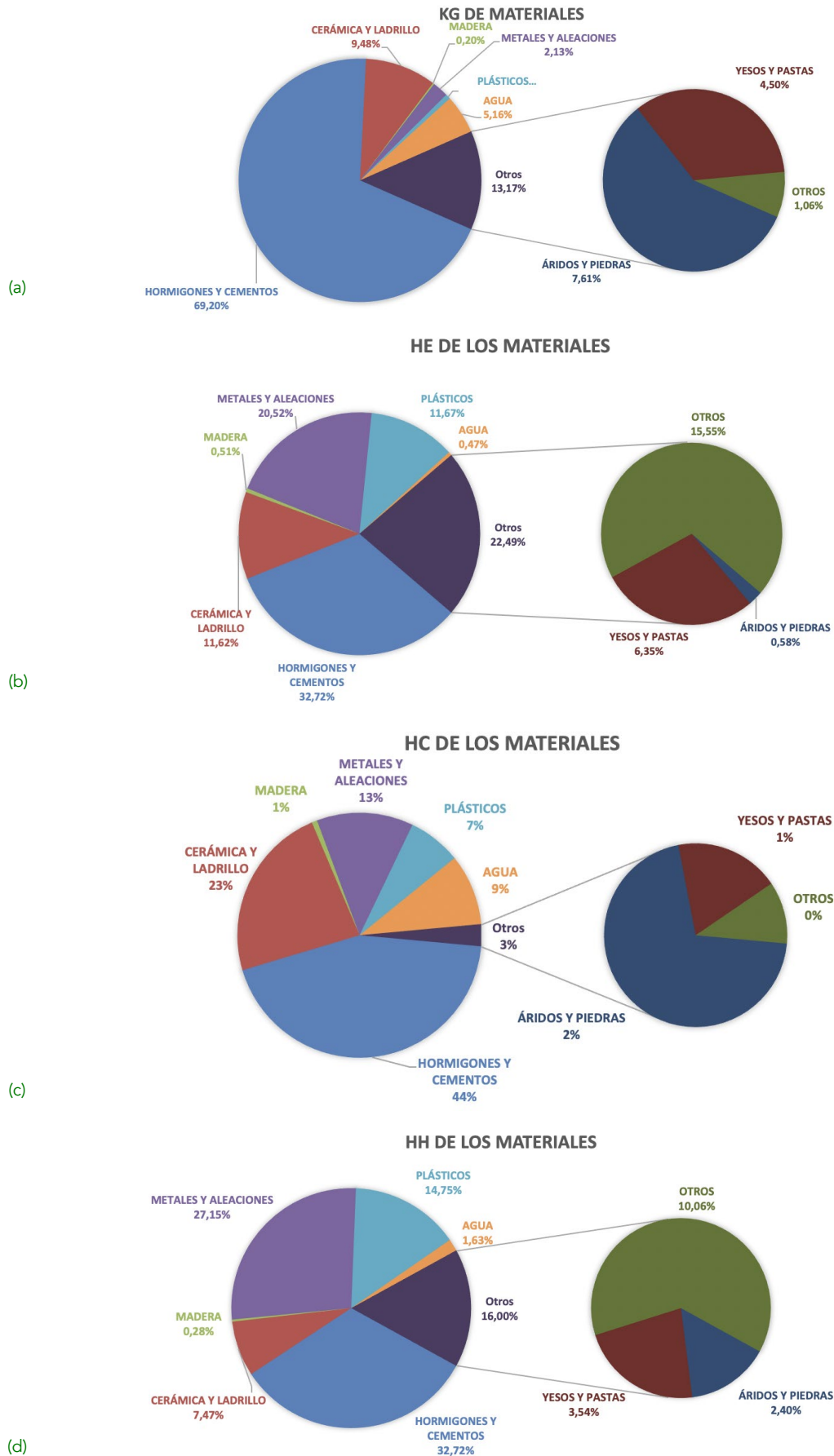


Figura 3. (a) El peso de los materiales en el proyecto. Huellas de los materiales: (b) ecológica; (c) carbono; (d) hídrica. Fuente: Elaboración de los autores.

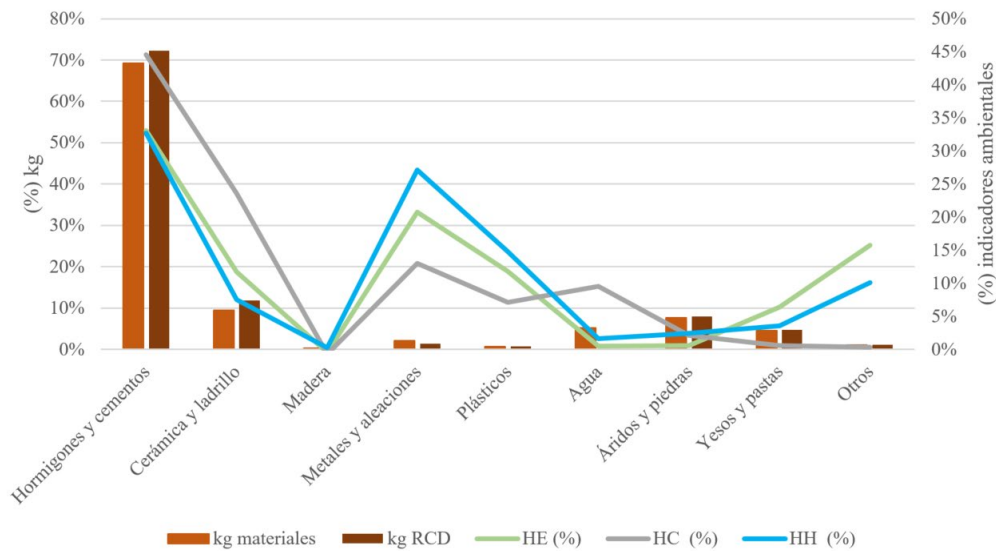


Figura 4. Impactos por familias de materiales. Fuente: Elaboración de los autores.

procesos de manufactura, o en las emisiones de sus procesos, como por ejemplo el empleo de materiales reciclados en estos o con un alto contenido de residuos, pueden reducir significativamente la huella del proyecto (Freire *et al.*, 2019). Estos materiales son igualmente los que más pesan dentro del conjunto: el hormigón corresponde a casi el 70% del peso total, y destaca el peso del agua que representa el 15% del total. En el cálculo de las otras huellas, tal como en el trabajo de Marrero, Rivero y Alba (2020), son los mismos materiales los que registran el mayor impacto. La HE de los materiales de construcción representa el 80% del total del proyecto, frente a un 18,5% de la maquinaria; mientras que el impacto de los trabajadores apenas supone un 1,5% del total.

En relación a la HC (Figura 3), se comprueba el alto impacto de los hormigones en el proceso con un 44%, seguidos de los elementos cerámicos con un 23%, mientras que los materiales metálicos y las aleaciones suponen un 13% de su HC. En el extremo opuesto se encuentran las maderas, con sólo un 1% del impacto. Esta huella tiene las mismas proporciones que la ecológica debido a la gran importancia de los materiales de construcción en ambos cálculos. A nivel total se calcula un impacto de HC de 653,62 tCO<sub>2</sub>eq y una repercusión de 0.7472 tCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>.

La HH de los materiales mantiene la línea de las dos anteriores, según se exhibe en la Figura 4, pese a que se reduce el impacto del hormigón respecto a la HC, bajando hasta el 32%. Por el contrario, se observa el aumento del impacto en metales y aleaciones, frente a la reducción en importancia de los materiales cerámicos, al 7%. Destaca el bajo impacto mantenido de la madera. El volumen total de la HH se estima en 12.601m<sup>3</sup>, lo que significa una

repercusión de 14,340 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> de construcción. En la Figura 4 se muestran los resultados de los impactos de los materiales de construcción en porcentajes, que permiten comparar la importancia de cada tipo y, simultáneamente, exponer los respectivos residuos generados. Se puede apreciar cómo la huella hídrica es menos importante en los materiales cerámicos que en el caso de los metales, al contrario que la huella de carbono, por lo que un solo indicador no parece suficiente para resaltar los materiales que se deben mejorar en el proyecto. Hormigones y cementos son los materiales más masivos, con mayor cantidad de RCD y, a su vez, los más impactantes en todas las categorías, de manera que ejercer acciones en la reducción de su impacto representarán una mejora global del proyecto. Por otro lado, los metales, aunque en peso y residuos no son significativos, su impacto es muy alto en todas las huellas y debe ser la segunda categoría a mejorar en la sustitución por soluciones constructivas más sostenibles.

En el análisis por capítulos de proyecto, los resultados son muy similares a los obtenidos por otras autoras (González, Muñoz Sanguinetti y Marrero, 2019). En el caso del análisis de vivienda social, donde los capítulos con mayor impacto son la cimentación, las estructuras y la albañilería, una vez más, debido a los materiales que se emplean en grandes volúmenes, estos suponen el uso de mucha energía y emisiones de CO<sub>2</sub> incorporados en sus procesos de manufactura. Se puede, por ello determinar que, a pesar de las diferencias constructivas y técnicas de los edificios públicos educativos, que se dotan de mayores instalaciones electromecánicas y materiales más singulares, el impacto medioambiental de los mismos se encuentra en línea con los edificios residenciales.



## CONCLUSIONES

El modelo propuesto por Rivero (2020) combina la evaluación de las huellas junto a la valoración económica de la construcción de edificios. Con el presente trabajo se comprueba la adaptabilidad de la metodología consolidada existente para la evaluación y control ambiental de los proyectos de cualquier tipología de edificaciones, ya que se basa en una estructura de costes o sistemas de clasificación sistemática de precios.

Siendo una metodología nutrida desde los actuales sistemas de clasificación, permite a los profesionales del sector desarrollar rápidamente un presupuesto económico y que puede llegar a incorporar el impacto medioambiental. El análisis de las huellas incluye los materiales de construcción desde la cuna de hasta el sitio (obra) de todos los elementos que forman parte del proyecto. También se incluye la mano de obra, por su fuente de energía (ingesta de alimentos), y la maquinaria, por sus consumos energéticos.

La presente metodología puede ser implementada de una forma fácil y satisfactoria por la administración pública española. Esto es gracias a que proviene del modelo de tradicional de clasificación de los trabajos, el cual es ampliamente utilizado por los técnicos intervinientes en el proceso constructivo. En el presente estudio se empleó la clasificación sistemática del Banco de Costes de la Construcción de Andalucía, pero bien podría replicarse con otras clasificaciones o banco de costes nacionales. La claridad de los datos obtenidos y su fácil interpretación por el personal no especializado hacen del modelo una valiosa herramienta para la evaluación del impacto medioambiental de la construcción.

La principal diferencia entre los proyectos públicos y los privados radica en las soluciones constructivas empleadas, así como en el consumo de recursos por superficie construida. Sería recomendable aplicar el modelo a otros tipos de construcciones públicas como museos, oficinas, centros de comunicación, etc., tanto en los que se ejecuten en nueva planta como en los que reformen en edificaciones existentes, dentro del espectro de las infraestructuras públicas, dadas las singularidades constructivas de cada uno de ellos. De ese modo, es posible definir impactos de referencia que sirvan como base para la toma de decisiones ambientales en el proceso constructivo. Los resultados obtenidos en este trabajo sirven como punto de partida para generar nuevas referencias de impacto de edificaciones públicas y bases de datos para futuras investigaciones con las que comparar y efectuar propuestas de mejora en los diseños de los proyectos evaluados.

Como conclusión, y debido a que el cálculo de las huellas se fundamenta en el presupuesto de la obra,

dentro de los procedimientos de contratación pública pueden desarrollarse sistemas de valoración de las propuestas de los licitadores para minimizar el impacto de la construcción que, además, formen parte de los pliegos de contratación. Así se podría ofrecer un soporte técnico a la valoración de medidas de mejora medioambientales en la licitación pública.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al VI Plan Propio de la Universidad de Sevilla por financiar parte del trabajo de investigación contenido en la presente comunicación, a través de un contrato pre-doctoral o PIF, referencia VIPPIT-2016-IV.3, para el desarrollo del programa I+D+i, durante cuatro años, desde 2016 a 2020.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLAN, J. A. (1993). *Fortunately there are Substitutes for Water Otherwise our Hydro-political Futures would be Impossible. En Priorities for Water Resources Allocation and Management (13-26)*. London: ODA.

ALMASI, A. M. Y MILIOS, L. (2013). *Municipal waste management in Spain*. European Environment Agency. Recuperado de [https://www.eea.europa.eu/ds\\_resolveuid/UD8Z6VW5GB](https://www.eea.europa.eu/ds_resolveuid/UD8Z6VW5GB)

BARBERO ARRABÉ, I. (2018). *Proyecto de construcción de Centro de Educación Infantil*. Madrid: Centro de Proyectos del Ejército. Dirección de Infraestructura (DIIN).

BARE, J., HOFSTETTER, P., PENNINGTON, D.W. Y UDO DE HAES, H.A. (2000). Life cycle impact assessment workshop summary. Midpoints versus endpoints: the sacrifices and benefits. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(6), 319-326.

BELTRÁN, M. J. Y VELÁZQUEZ, E. (2015). La ecología política del agua virtual y huella hídrica. Reflexiones sobre la necesidad de un análisis crítico de los indicadores de flujos virtuales de agua en la economía. *Revista de Economía Crítica*, (20). Recuperado de <http://www.revistaeconomiacritica.org/node/770>

COMISIÓN NACIONAL DEL MERCADO Y LA COMPETENCIA (2019). *Radiografía de los procedimientos de contratación pública en España*. Madrid: Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia. Recuperado de <https://www.cnmc.es/expedientes/ecnmc00418>

CHASTAS, P., THEODOSIOU, T., KONTOLEON, K. J. Y BIKAS, D., (2018). Normalizing and assessing carbon emissions in the building sector: A review on the embodied CO<sub>2</sub> emissions of residential buildings. *Building and Environment*, 130, 212-226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.032>

CRAWFORD, R. H. Y PULLEN, S. (2011). Life cycle water analysis of a residential building and its occupants. *Building Research and Information*, 39(6), 589-602. DOI: <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.584212>

DOSSCHE, C., BOEL, V. Y DE CORTE, W. (2017). Use of life cycle assessments in the construction sector: critical review. *Procedia Engineering*, 171, 302-311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.338>

ECOINVENT CENTER (2013). *Ecoinvent database v3 Ecoinvent Report*. Recuperado de [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org)

EMASESA (2005). *Sostenibilidad y Gestión. Éramos así, así somos* (1975-2005). Recuperado de <https://www.emasesa.com/asi-eramos-asi-somos-1975-2005/>

FÉRRIZ PAPÍ, J.A. (2012). Water consumption in buildings: Embedded water in construction materials. Trabajo presentado en *1st International Congress on Water, Waste and Energy Management*. Salamanca. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/277716798\\_Water\\_Consumption\\_in\\_Buildings\\_Embedded\\_Water\\_in\\_Construction\\_Materials](https://www.researchgate.net/publication/277716798_Water_Consumption_in_Buildings_Embedded_Water_in_Construction_Materials)

FREIRE GUERRERO, A., ALBA RODRÍGUEZ, M<sup>a</sup> D. Y MARRERO MELÉNDEZ, M. (2019). A budget for the ecological footprint of buildings is possible: a case study using the dwelling construction cost database of Andalusia. *Sustainable Cities and Society*, 51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101737>

FREIRE GUERRERO, A. Y MARRERO, M. (2015a). Ecological Footprint in Indirect Costs of Construction. *Proceedings of the II International congress on sustainable construction and eco-efficient solutions: Seville 25-27 may 2015* (pp. 969-980). Recuperado de <http://hdl.handle.net/11441/59685>

FREIRE GUERRERO, A. Y MARRERO, M. (2015b). Evaluación a través del presupuesto de la energía incorporada al proyecto de edificación. *Revista Hábitat Sustentable*, 5(1), 54-63. Recuperado de <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/1812>

FUNDACIÓN GENERAL DE LA UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID (2010). *Cambio Global España 2020/50. Sector edificación*. Programa Cambio Global España 2020/50 del Centro Complutense de Estudios e Información Medioambiental. Madrid.

GENG, R., MANSOURI, A. Y AKTAS, E. (2017). The relationship between green supply chain management and performance: A meta-analysis of empirical evidences in Asian emerging economies. *International Journal of Production Economics*, 183, 245-258. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.10.008>

GONZÁLEZ VALLEJO, P., MUÑOZ SANGUINETTI, C. Y MARRERO MELÉNDEZ, M. (2019). Environmental and economic assessment of dwelling construction in Spain and Chile. A comparative analysis of two representative case studies. *Journal of Cleaner Production*, 208, 621-635. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.063>

GONZÁLEZ VALLEJO, P. (2017). *Evaluación económica y ambiental de la construcción de edificios residenciales. Aplicación a España y Chile*. Tesis doctoral de Arquitectura, Universidad de Sevilla.

González Vallejo, P., Marrero, M. y Solís Guzmán, J. (2015). The ecological footprint of dwelling construction in Spain. *Ecological Indicators*, 52, 75-84, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.11.016>.

GRUNEWALD, N., GALLI, A., KATSUNORI, I., HALLE, M. Y GRESSOT, M. (2015). *The Ecological Footprint of Mediterranean Diets*. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/275349456\\_The\\_Ecological\\_Footprint\\_of\\_Mediterranean\\_Diets](https://www.researchgate.net/publication/275349456_The_Ecological_Footprint_of_Mediterranean_Diets)

IDAE (2011). *Factores de Emisión de CO<sub>2</sub>*. Recuperado de <https://www.idae.es/informacion-y-publicaciones>

INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN DE CATALUÑA (ITEC) (2013). Recuperado de <http://www.itec.es/nouBedec.e/bedec.aspx> (accessed on Dec 3, 2013).

KAIRIES ALVARADO, D., MUÑOZ SANGUINETTI, C. Y MARTÍNEZ ROCAMORA, A., (2021). Contribution of energy efficiency standards to life-cycle carbon footprint reduction in public buildings in Chile, *Energy and Buildings*, 236, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110797>

LAURENT, A. Y OWSIANIAK, M. (2017). Potentials and limitations of footprints for gauging environmental sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 25, 20-27, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.04.003>

MARTÍNEZ-ROCAMORA, A., SOLÍS-GUZMÁN, J. Y MARRERO, M. (2016a). LCA databases focused on construction materials: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 565-573. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.243>

MARTÍNEZ-ROCAMORA, A., SOLÍS-GUZMÁN, J. Y MARRERO, M. (2016b). Toward the Ecological Footprint of the use and maintenance phase of buildings: Utility consumption and cleaning tasks. *Ecological Indicators*, 69, 66-77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.04.007>

MARRERO, M. Y RAMÍREZ DE ARELLANO, A. (2010). The building cost system in Andalusia: application to construction and demolition waste management. *Construction Management and Economics*, 28(5), 495-507. DOI: <https://doi.org/10.1080/01446191003735500>

MARRERO, M., RIVERO, C. Y ALBA, M<sup>a</sup> D. (2020). What are we discarding during the life cycle of a building? Case studies of social housing in Andalusia, Spain. *Waste Management: international journal of integrated waste management, science and technology*, 102, 391-403. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.002>

MCCORMACK, M., TRELOAR, G.J., PALMOWSKI, L. Y CRAWFORD, R. (2007). Modelling direct and indirect water requirements of construction. *Building Research and Information*, 35(2), 156-162. DOI: <https://doi.org/10.1080/09613210601125383>

PRÉ SUSTAINABILITY (2016). Simapro 8. Recuperado de <https://simapro.com/>

REE (2014-2018). El Sistema Eléctrico Español / The Spanish Electric System. Recuperado de <https://www.ree.es/es/datos/publicaciones/informe-anual-sistema/informe-del-sistema-electrico-espanol-2018>

RIVERO, C. (2020). *Estudio de Huellas en el Ciclo de Vida del Edificio Residencial*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.

VANHAM, D., LEIP, A., GALLI, A., KASTNER, T., BRUCKNER, M., UWIZEYE, A., VAN DIJK, K., ... Y HOEKSTRA, A. (2019). Environmental footprint family to address local to planetary sustainability and deliver on the SDGs. *Science of The Total Environment*, 693. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133642>

VELÁZQUEZ, E., MADRID, C. Y BELTRÁN, M. J. (2011). Rethinking concepts of virtual water and water footprint in relation to the production–consumption binomial and the water–energy nexus. *Water Resources Management*, 25, 743–761. DOI:10.1007/s11269-010-9724-7

ZHANG, L., DZAKPASU, M., CHEN, R. Y WANG, X. (2017). Validity and utility of ecological footprint accounting: A state-of-the-art review. *Sustainable Cities and Society*, 32, 411-416. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.04.016>





