



Revista
Hábitat
Sustentable

ISSN 0719-0700

Vol. 8 N° 2

Diciembre

2018



UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO



**Revista
Hábitat
Sustentable**

ISSN 0719-0700
Vol. 8 N°. 2
diciembre
2018



UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO

RECTOR:

MAURICIO CATALDO MONSALVES

DECANO FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO:

ROBERTO EDUARDO BURDILES ALLENDE

DIRECTOR GENERAL:

Dr. RODRIGO GARCÍA ALVARADO / Departamento de Teoría y Diseño de la Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío - Bío, Concepción, Chile
rgarcia@ubiobio.cl

EDITORA GENERAL:

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

CORRECCIÓN DE ESTILO:

Dra. OLGA OSTRIA REINOSO, Departamento Estudios Generales

COMITÉ PRODUCTIVO:

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

Dra. PAULINA WEGERTSEDER / Departamento de Teoría y Diseño de la Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío - Bío, Concepción, Chile

CONSEJO EDITORIAL:

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

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

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

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

Dra. CRISTINA ENGEL / Universidad Federal. Vitória. Brasil.

Dr. ERNESTO KUCHEN / Universidad Nacional de San Juan. Argentina

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

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

TRADUCCIONES:

THERESA ST JOHN

DIRECTOR DE ARTE Y DIAGRAMACIÓN:

IGNACIO A. SÁEZ ARANEDA

FOTOGRAFÍA PORTADA:

ALEJANDRA BANCALARI CORNEJO / Cúpula edificio Reichstag, Berlin Alemania

DIRECCIÓN:

Avda. Collao 1202

CP: 4081112. Concepción, Chile

TEL.(56-41)3111409

Revista HS indexada en Emerging Source Citation Index de Web of Science de Thomson Reuters, Avery Index, Latindex catálogo, Open Archives, Dialnet, Redib, Ebsco, JournalTOCs, Rebiun y ARLA (Asociación de Revistas Latinoamericanas de Arquitectura).

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 la Facultad de Arquitectura, 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.

- 05 **PRESENTACIÓN**
- Roberto Burdiles Allende
- 07 **EDITORIAL**
- Dra. Claudia Muñoz Sanguinetti
- 08 **EL HÁBITAT SUSTENTABLE DE LOS MERCADOS URBANOS HISTÓRICOS. APLICACIÓN DEL CONCEPTO AL MERCADO CENTRAL DE CONCEPCIÓN, CHILE**
- Ana Zazo Moratalla, María Isabel López Meza
- 20 **HUELLA DE CARBONO COMO INSTRUMENTO DE DECISIÓN EN LA REHABILITACIÓN ENERGÉTICA. PELÍCULAS DE CONTROL SOLAR FRENTE A LA SUSTITUCIÓN DE VENTANAS**
- Cristina Rivero Camacho, Júlia Pereira, M. Glória Gomes, Madelyn Marrero
- 32 **HERRAMIENTA PARA LA ESTIMACIÓN DE COSTES ECONÓMICOS Y AMBIENTALES EN EL CICLO DE VIDA DE EDIFICIOS RESIDENCIALES. FASE DE CONSTRUCCIÓN**
- Patricia González Vallejo
- 52 **MATRIZ DE REFERENCIA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE LOS MATERIALES CONSTRUCTIVOS DE LA VIVIENDA SOCIAL EN ZONAS ÁRIDO-SÍSMICAS**
- Analia Alejandra Alvarez, Veronica Ripoll Meyer
- 64 **MÉTODOS DE EVALUACIÓN OPTO-TÉRMICA DE MATERIALES Y COMPONENTES DE LA ENVOLVENTE EDILICIA. SITUACIÓN EN ARGENTINA**
- Ayelén María Villalba, Noelia Liliana Alchapar, Erica Norma Correa, Andrea Elvira Pattini, Leonardo Santoni
- 80 **TERMOGRAFÍA INFRARROJA PARA EL DIAGNÓSTICO TÉRMICO CONFIABLE CON ALTA REPLICABILIDAD Y BAJO COSTO DE VIVIENDAS EN MENDOZA, ARGENTINA**
- Carolina Ganem Karlen
- 90 **RENTABILIDAD DE LAS ESTRATEGIAS PASIVAS DE EFICIENCIA ENERGETICA PARA LA INDUSTRIA DEL VINO. ANÁLISIS TERMO-ENERGÉTICO Y ECONÓMICO**
- Alba Inés Ramos Sanz
- 104 **CONSUMOS ENERGÉTICOS DE GAS NATURAL Y ELECTRICIDAD EN EDIFICIOS ESCOLARES DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN JUAN, ARGENTINA. ANÁLISIS ESTADÍSTICO EN FUNCIÓN DE VARIABLES ARQUITECTÓNICAS**
- María Guillermina Re, Celina Filippín, Irene Blasco Lucas
- 116 **COMPORTAMIENTO Y CONFORT TÉRMICO EXTERIOR DE CANALES VIALES URBANOS INSERTOS EN DIVERSAS TRAMAS Y GEOMORFOLOGÍAS DE MENDOZA**
- Ana Laura Castillo, María Belén Sosa, Erica Norma Correa, María Alicia Cantón

PRESENTACIÓN

Nuestra Facultad, desde su génesis, con la creación de la Escuela de Arquitectura a fines de los años sesenta y, luego, de Escuela de Construcción, en el año 1982 -ambas insertas en la zona centro sur del país- y dada su condición de universidad pública, estatal y regional, ha puesto atención a todos los fenómenos que definen las características constructivas locales y que forman parte de su identidad. La madera, quizá de forma intuitiva, fue uno de los grandes temas a investigar, por ser parte del patrimonio arquitectónico local, de su tradición e identidad constructiva; por tratarse de una materia prima existente y abundante en el paisaje regional, de recurrencia cotidiana en el hacer tanto profesional como popular de las edificaciones; y por constituir un material renovable de bajo impacto ambiental.

Es así, como a comienzos de la década de los noventa, etapa coincidente con el retorno a la democracia y la reinserción de nuestro país en el ámbito académico internacional, se da inicio a un plan de fortalecimiento en la formación disciplinar de académicos e investigadores, en las diferentes áreas y líneas de conocimiento, contenidas dentro de su plan de desarrollo. Una de estas líneas de especialización proyectadas, complementaria al estudio de la arquitectura patrimonial y las tecnologías en la construcción en madera, fue la línea del hábitat sustentable y la eficiencia energética, que sería impulsada través de la formulación de un programa de investigación hacia fines de los mismos noventa -con una visión anticipadora-, que le ha permitido hoy liderar la investigación, las publicaciones y la formación de posgrado en el ámbito nacional e internacional.

El primer decenio de este siglo correspondió a un período de formación de equipos interdisciplinarios de trabajo investigativo, para la postulación a fondos concursables con proyectos de investigación de financiamiento, tanto interno como externo. Junto a la generación de nuevo conocimiento, fue también el nacimiento de cursos de capacitación y diplomados orientados a académicos, profesionales y servicios públicos: la construcción de un esforzado camino que posteriormente daría origen al programa de Magister en Hábitat Sustentable y Eficiencia Energética. Fueron los tiempos de formación de redes y vinculación nacional e internacional del equipo.

La revista Hábitat Sustentable surge a inicios de 2011, con el objetivo de convocar investigaciones en esta área del urbanismo, la arquitectura y la construcción, y consecuentemente desarrollar una publicación científica que validara su nivel académico. Este período, en que se consolida el área, coincide con el terremoto y maremoto de 2010, que acelera el necesario proceso de reconversión y adaptación al cambio climático, para una edificación sustentable.

A siete años de su primera edición, HS cuenta con la indexación en Web of Science - Emerging Sources Citation Index (ESCI) y, recientemente, la indexación ScELO, en la biblioteca electrónica científica que incluye un grupo de revistas seleccionadas en Chile. Dichas indexaciones buscan asegurar una difusión amplia del conocimiento y una focalización en los avances más significativos, de quienes los hayan producido.

Esta sintética narración acerca del ámbito de Hábitat sustentable y Eficiencia Energética de nuestra Facultad, permite entender el valor de esta última indexación SciELO obtenida y ha buscado contextualizar el origen y sentido de la revista HS, en aras de resaltar este hito y dejar testimonio de su historia y del trabajo de quienes han participado: los académicos creadores de la revista HS, la dirección editorial, el equipo de producción, la corrección de estilo, traducción, diagramación, los evaluadores externos y los autores; todos quienes, en definitiva, han sido parte de este valioso logro.

Roberto Burdiles Allende
Decano Facultad de Arquitectura Construcción y Diseño



EDITORIAL

Nos es muy grato compartir con ustedes una edición especial, la cual está marcada por un hito histórico que nos llena de orgullo. Durante el mes de julio del presente año la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) nos ha notificado que la revista Hábitat Sustentable ha sido incorporada en el prestigioso Catálogo SciELO (Scientific Electronic Library Online). Este relevante resultado es fruto de un proceso sistemático, riguroso y del trabajo comprometido de un valioso equipo humano que ha permitido alcanzar una meta propuesta hace exactamente cuatro años.

A siete años de su creación, con 15 ediciones y 97 artículos publicados, HS ha dado muestras de su grado de madurez y fortalecimiento como revista científica reconocida. Durante este periodo hemos alcanzado altos niveles de indexaciones sumadas a SciELO, tales como Latindex, Directory of Open Access Journals (DOAJ), AveryIndex y REDIB, entre las que destaca también la conseguida en 2017 en Web of Science: Emerging Sources Citation Index (ESCI).

Estos significativos logros nos enorgullecen y dan cuenta de que todos los esfuerzos realizados son reconocidos y van en el camino correcto. Actualmente, se dispone de muy pocas revistas indexadas en español en estas áreas, por lo que la selección de HS de la Universidad del Bío-Bío viene a ampliar la visibilidad latinoamericana de la proyección institucional, respaldando la reflexión sobre la arquitectura, la construcción y el urbanismo sustentable.

A partir de este punto, buscamos continuar perfeccionando el estándar de calidad de la revista. Dentro de los desafíos futuros, está incrementar los niveles de visibilidad de HS y, en ese contexto, ya fue posible adjudicarnos fondos del CONICYT orientados al Mejoramiento de la Comunicación Científica de las Revistas UBB, lo cual nos permitirá, en un plazo de 2 años, avanzar en gestión digital y traducciones pertinentes al proceso editorial y de producción.

Para el equipo de HS, el año 2018 ha sido un año pleno y productivo, que sin duda nos alienta a seguir progresando y posicionando a nuestra revista en mejores rankings, sin perder de vista el principal objetivo de su creación: contar con un medio de diseminación de la creciente productividad científica generada en

Latinoamérica como resultado de investigaciones en temáticas relacionadas con el hábitat sustentable.

En mi rol de editora responsable de HS, quisiera expresar un reconocimiento y agradecimiento a todos quienes han sido parte de este proyecto y han contribuido a este notable logro. En primer lugar, a los creadores de la revista, Dra. Maureen Trebilcock y el Dr. Rodrigo García, por el valioso aporte que representó la visión y apuesta de abrir la discusión y reflexión sobre temas referidos al ambiente construido y hábitat sustentable. Asimismo, al equipo humano y de profesionales comprometidos con la calidad del resultado obtenido en cada edición: Jocelyn Vidal, por su relevante rol de productora; Dra. Olga Ostría, por su importante contribución como correctora de estilo; Theresa St John por su labor de traducción, Ignacio Sáez por su talento y excelente disposición en la diagramación de HS, y Karina Leiva, Ingeniera Civil en Informática, quien ha sido un aporte sustancial en la producción de HS.

Nuestra gratitud va también a todos nuestros revisores externos, un valioso apoyo para alcanzar los estándares citados, y, desde luego, a los autores, por la confianza depositada en HS.

Por último, agradecemos muy especialmente a la Vicerrectoría de Investigación UBB, por su permanente respaldo y financiamiento a través del Convenio de Desempeño de Innovación en Biomateriales y Eficiencia Energética para el Hábitat Sustentable (MECESUP CD-INES), como igualmente el apoyo y compromiso brindado por la Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño a través de su decanatura.

Con el gusto de compartir esta gratificante noticia, los invitamos finalmente a leer el presente número, correspondiente a diciembre de 2018, el cual incluye artículos provenientes de Chile, España y Argentina. Una edición especial dedicada, principalmente, a relevar el trabajo de investigación femenino latino e iberoamericano, que nos permite entregar, una vez más, un nutrido repertorio seleccionado rigurosamente, con sólidas aportaciones al conocimiento para el desarrollo sostenible del hábitat y el ambiente construido.

Dra. Claudia Muñoz Sanguinetti
Editora Revista Hábitat Sustentable





EL HÁBITAT SUSTENTABLE DE LOS MERCADOS URBANOS HISTÓRICOS. APLICACIÓN DEL CONCEPTO AL MERCADO CENTRAL DE CONCEPCIÓN, CHILE

THE SUSTAINABLE HABITAT OF HISTORIC URBAN MARKETS: THE APPLICATION OF THIS CONCEPT TO THE CENTRAL MARKET OF CONCEPCION, CHILE

ANA ZAZO MORATALLA
Doctora en Sostenibilidad Urbana
Departamento de Urbanismo y Diseño,
Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño,
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
<http://orcid.org/0000-0003-1912-9448>
azazo@ubiobio.cl

MARÍA ISABEL LÓPEZ MEZA
Doctora en Urbanismo Sustentable
Departamento de Urbanismo y Diseño,
Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño,
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-0942-9722>
mlopez@ubiobio.cl

RESUMEN

La importancia de los mercados ha estado tradicionalmente ligada a su papel como abastecedor urbano de alimentos frescos. Sin embargo, a partir de la segunda mitad del siglo XX muchos de estos espacios han perdido este valor simbólico y han entrado en un proceso de obsolescencia multidimensional. Se propone aquí analizar, como ejemplo de este proceso de declive, el caso del Mercado Central de Concepción (Chile), utilizando como enfoque metodológico el de hábitat sustentable. Desde esta perspectiva, se examina el funcionamiento del mercado como ámbito edificado y como espacio socioeconómico, tanto a escala arquitectónica, como de su entorno urbano. La metodología aplicada consideró el análisis planimétrico, la observación en terreno y las entrevistas, para identificar los factores que han incidido en la insostenibilidad de este mercado histórico. Los resultados sugieren que diversos factores sociales y económicos vinculados al edificio en sí, tanto como a su contexto urbano, permitieron o incluso contribuyeron a la pérdida de cualidades claves para la sostenibilidad del hábitat del mercado.

Palabras clave

mercado histórico, vitalidad urbana, ámbito edificado, espacio socioeconómico.

ABSTRACT

The importance of markets has traditionally been linked to their role as an urban provider of fresh food. However, beginning in the second half of the twentieth century, many of these commercial spaces have ceased to possess this symbolic value and have begun a process of multidimensional obsolescence. As an example of this deterioration process, this research seeks to analyze the case of the Central Market of Concepción (Chile) using the concept of sustainable habitat as a methodological approach. From this perspective, the operation of the market was studied as a built environment and as a socio-economic space, both at the building and urban levels. Plans were analyzed, on-site observations were made, and interviews were carried out to identify the factors that have influenced the unsustainability of this historic market. They also suggest that various social and economic factors linked to the building itself, as well as its urban context, enabled or even contributed to the loss of key qualities for the sustainability of the market's habitat.

Keywords

historic market, urban vitality, built environment, socioeconomic space.

INTRODUCCIÓN

La historia de los mercados, como institución económica y social medular (González y Hiernaux, 2017), ha estado siempre ligada a su papel como abastecedor de alimentos urbanos frescos. Se constituyen como nodos vitales culturales (Zakariya, Kamarudin, y Harum, 2016; Rosa, 2017) dentro del tejido urbano que conforman espacios de encuentro, socialización e intercambio a nivel básico y que vertebran la vida social a escala barrial (Hernández y Andreeva, 2017). Durante la segunda parte del siglo XX, estos espacios comerciales han dejado de poseer globalmente este valor simbólico como espacios de abastecimiento urbano, habiéndose enfrentado a una obsolescencia multidimensional -física, funcional y económica (Delgadillo, 2017). Sin embargo, esta obsolescencia no es un proceso natural despolitizado, sino que deriva de procesos de despojo y privatización (Delgadillo, 2016), como también de la retirada de responsabilidades por parte de los agentes de producción de la ciudad (Soares, 2017). Producto de este contexto, en las últimas décadas, estos espacios comerciales han sido vistos como infraestructuras de alto potencial económico con objetivos de gentrificación urbana (González y Waley, 2012) o, por el contrario, y como reacción a estos procesos de obsolescencia, han sido objeto de fenómenos de conservación mediante patrimonialización material o inmaterial (Hernández y Andreeva, 2017). En ambos casos, la ausencia de una visión integral de lo que supone un mercado como nodo urbano conduce a la pérdida de su vitalidad (Hamza *et al.*, 2017) y al desplazamiento de la comunidad de locatarios que da sentido a este espacio comercial (Lacarrière, 2016).

El caso del Mercado Central de Concepción (MMC) no es una excepción a este problema global. El mercado, ubicado desde el siglo XIX en la actual manzana del centro histórico, fue ganando superficie hasta que, tras el terremoto de 1939, la municipalidad decidió reconstruirlo, de modo que ocupara toda la manzana (Salazar, 2018). El proyecto del mercado desarrollado por la Corporación de Reconstrucción y Auxilio (CRA) fue inaugurado en el año 1950 (*ibidem*) y heredó de su antecesor el papel simbólico de espacio abastecedor de productos frescos y vitalizador urbano. El desarrollo de la actividad comercial en el mercado fue sustentado por un grupo de comerciantes asociados bajo diversos nombres y tipos de sociedad a lo largo de su historia. Tras el incendio del edificio, en el año 2013, que lo convirtió en ruina, fue declarado Monumento Histórico por el Consejo de Monumentos Nacionales (Gobierno de Chile, 2014). Si bien este decreto reconoce el valor patrimonial del edificio, deja fuera el componente vivo del edificio -sus locatarios y locatarias- y,

al reconocer el edificio como elemento aislado y no como equipamiento urbano integrado en un entorno urbano, desacopla su preservación del tejido comercial en el que se encuentra inserto y con el que, durante décadas, mantuvo una relación simbiótica.

Del conjunto de las investigaciones sobre mercados históricos, tres grupos resultan relevantes para esta investigación: los que analizan el valor patrimonial del mercado, centrándose en él como "espacio contenedor" (Salazar, 2018), los que centran su análisis en su uso como espacio de esparcimiento y socialización entre locatarios y clientes (Lama, 2018) y, por último, aquellos que estudian los resultados de políticas focalizadas en la regeneración del uso y cuyo resultado es la gentrificación (Delgadillo, 2016; García, Rodríguez y Maiello, 2016; Lacarrière, 2016; Rodríguez, 2014; González y Waley, 2012).

El presente artículo analiza la aplicabilidad del concepto de "hábitat sustentable" para un mercado histórico urbano. Dicho enfoque se aplica como herramienta metodológica al caso del Mercado Central de Concepción (Chile). Se analizan, así, las vinculaciones entre los aspectos de gestión y planificación urbana en la sustentabilidad del hábitat del mercado.

MARCO TEÓRICO: PERSPECTIVA SOBRE EL HÁBITAT SUSTENTABLE EN RELACIÓN A LOS MERCADOS HISTÓRICOS

El concepto de "hábitat" proviene de la ecología y se define como el "lugar en el que habita un organismo o una población" (López, 2003:5). Si bien la definición pone el acento en el lugar, a partir del concepto de habitar, quedan también incorporados otros aspectos como "el despliegue de las funciones que permiten el desarrollo de la vida en un tiempo dado" (*ídem*). También desde la ecología, el hábitat es concebido como un espacio determinado que cuenta con recursos y que es escogido por un grupo o comunidad para transitar su experiencia y satisfacer sus necesidades (CEHAP, 1998). El hábitat se vuelve un agente que genera cambios en su entorno y se ve afectado por él. Esta interacción puede darse en la dimensión social (Leff, 1998), o bien, basarse en el intercambio metabólico de materia y energía cuantitativos y cualitativos (Delgado, Campos y Rentería, 2012). A partir de estas consideraciones, se infiere que la sostenibilidad de un hábitat humano implica dos principales factores.

En primer lugar, requiere considerar no sólo el soporte territorial (i.e. el lugar o edificio) en el cual éste se

[1] Desarrolladas por el Proyecto Europeo URBACT Markets. <http://urbact.eu/urbact-markets>.

[2] Además de los productores locales, autoridades regionales y locales, asociaciones barriales, inversionistas, cadenas de supermercados.

desarrolla, sino también las dimensiones socioeconómicas que permiten su desarrollo. Las Guías *URBACT Markets*¹ señalan que para que los mercados puedan impulsar el desarrollo social, ambiental y económico de los barrios, es necesario un acercamiento multifacético: “tomar en consideración todo el ecosistema de los mercados” (2013: 5), incluyendo a sus actores sociales: los comerciantes y sus asociaciones, y a los habitantes de la ciudad². Desde el urbanismo, Hamza *et al.* (2017) propone superar el acercamiento tradicional a los mercados históricos enfocado exclusivamente en el edificio, por uno que integre la sostenibilidad de su uso tradicional (i.e. oferta de alimentos frescos) y la permanencia de sus comerciantes originales. Asimismo, señala que la pérdida de los locatarios tradicionales conduce a una pérdida de la sostenibilidad del edificio, de su identidad y de sus valores sociales y culturales. Aunque las edificaciones no dejan de ser soporte, una visión integral que apunte hacia la sustentabilidad del hábitat debe orientarse a su articulación con otros soportes urbanos para contribuir a mejorar la calidad de vida dentro de las ciudades y aumentar su dinamismo (Amaya *et al.*, 2004).

En segundo lugar, el análisis de la sostenibilidad de los mercados históricos no debería abordar únicamente la escala de la unidad o célula, sino también la manera en que ésta interactúa con el tejido en el cual se inserta. López (2003) pone como ejemplo, en este sentido, la vivienda como célula del hábitat de un individuo o grupo familiar, y enfatiza que no es posible analizarla de manera aislada y desprendida de los “hilos invisibles y conductores de lo social, lo cultural, lo económico y lo político” (6). Para Yigitcanlar, Dur y Dizdaroglu (2015), quienes se centran en los planteamientos y propuestas de UN-Hábitat, el hábitat comprende un medio construido y un medio natural -o contexto- donde ambos interactúan, generando diferentes dinámicas urbanas de acuerdo con sus expresiones. Del medio construido, toman relevancia su localización y diseño en la accesibilidad y atracción de los habitantes hacia estos polos. El equipamiento urbano, entre los que figuran los mercados, cumplen un papel en la construcción de ciudad y hábitat a partir de “la estructuración del territorio en relación al sentido del lugar (*geniusloci*), relacionados con la conglomeración de personas y la creación de símbolos que hacen legible y propio el territorio” (Ovalle y Páez, 2017:47). Estos equipamientos proporcionan servicios a la ciudadanía y al tejido en el que se inserta, prestando un servicio complementario al de los equipamientos del entorno al estar centrado en el abastecimiento de productos frescos.

Por tanto, el hábitat sustentable de un mercado urbano histórico implica entenderlo como un espacio integrado en el que el edificio, su uso comercial y las personas que le dan vida se encuentran integrados espacial y funcionalmente en un entorno socioeconómico urbano concreto, y cuyo papel como equipamiento abastecedor de productos frescos se mantiene como servicio complementario a la oferta del entorno.

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DESDE LA PERSPECTIVA DEL HÁBITAT SUSTENTABLE

La investigación se plantea desde un paradigma constructivista, congruente con su enfoque cualitativo y descriptivo analítico, su orientación holística y concretizadora (Ruiz Olabuénaga, 1996), así como con el carácter inductivo de la hipótesis (Rodríguez y Vallderiola, 2009). Dentro de este paradigma se utilizaron, en particular, los métodos basados en la observación y la entrevista. Se propone aplicar el enfoque del hábitat sustentable como herramienta metodológica para analizar el estudio de caso del Mercado Central de Concepción (Chile) con el objetivo concreto de analizar si la gestión aplicada, en ambas escalas y ambas dimensiones, propició el mantenimiento del hábitat sustentable del mercado. El objetivo final es que las aportaciones derivadas del estudio de caso contribuyan a la construcción del concepto. Para ello, se considera el Mercado como la unidad o célula de la población del mercado.

La hipótesis señala que la gestión disociada de estas dos dimensiones (construida y social) y no integrada de ambas escalas espaciales ha contribuido a la insostenibilidad del hábitat del Mercado Central de Concepción (MCC). El diseño metodológico se centra en la evolución que han tenido ambas componentes a ambas escalas en tres periodos relevantes de su evolución. El periodo en el que el mercado fue un epicentro de actividad comercial urbana, décadas 1960-1979; el periodo en el que comienza el declive del mercado, décadas 1980 y 1990; y el periodo en el que, a consecuencia del terremoto del año 2010 y del incendio de 2013, se cierra el mercado. Para cada una de las etapas se definen dos categorías de análisis -el medio construido y el medio socioeconómico- que se estudian a dos escalas: la del mercado y la de su contexto.

El análisis del ambiente construido se basa principalmente en un análisis planimétrico y fotográfico. En la escala arquitectónica, las variables analizadas son la funcionalidad del espacio interior y perimetral del mercado, y la imagen arquitectónica del edificio. En la escala urbana las variables utilizadas se refirieron a la ubicación y carácter de los usos comerciales en el entorno: comercio construido y comercio al aire libre. El análisis de la dimensión socioeconómica se basa en dos aspectos. En la escala del mercado, se consideraron el cambio en los tipos de comercio (productos frescos, otros productos de almacén y cocinerías); el tipo de tenencia de los locatarios; y el valor simbólico del mercado como lugar de abastecimiento urbano. En la escala del contexto socioeconómico se estudia el tipo de comerciantes que se instalan tanto en el espacio público (comercio informal) como en los locales comerciales del entorno (tendencias y contenido simbólico de las tres calles comerciales en los tres momentos que evidencian el declive en el tipo de comercio).

Para el levantamiento de datos se aplicó un cuestionario a todos los locales en funcionamiento del anillo exterior del Mercado Central, y de las aceras de en frente del mercado. El objetivo fue identificar el rubro del local, reconstruir el tiempo que llevaba en ese rubro, y si había acogido a otro anteriormente. Este sondeo permitió identificar cambios en los tipos de comercio y vincularlos con hitos históricos del Mercado Central. A fin de confirmar estos primeros hallazgos, obtener un acercamiento a la vida cotidiana del Mercado Central y conocer la distribución y uso interior de sus espacios, se realizaron entrevistas semiestructuradas a 3 actores claves -antiguos dirigentes y locatarios históricos. La entrevista abarcó temáticas asociadas a la vida del Mercado Central durante las etapas previas a los hitos históricos (Privatización de Bienes Públicos década del 80; Terremoto 2010; Incendio 2013) y a los efectos de esos mismos hitos en el edificio comercial. Paralelamente, se complementó la información recabada con una revisión del material fotográfico de Archivo Histórico de la Universidad del Bío-Bío y una entrevista al encargado. Toda la información fue sistematizada para, luego, construir los planos asociados a cada etapa histórica.

RESULTADOS

A continuación, se presentan separadamente los resultados del análisis del medio construido en sus dos escalas de análisis (arquitectónica y urbana) y, posteriormente, del medio socioeconómico en la escala del mercado y su contexto.

ANÁLISIS DEL AMBIENTE CONSTRUIDO

Época de Oro: Décadas 1960 y 1970

En relación a lo arquitectónico, dos características permiten valorar al mercado como un icono de la arquitectura moderna: a) la ausencia de ornamento o de referencias a las formas historicistas³ y la propuesta formal de la marquesina a lo largo de la fachada; y, b) el uso innovador de los materiales y de las formas arquitectónicas por parte de la CRA (Salazar, 2018), particularmente el uso experimental del hormigón armado para estructurar la bóveda parabólica y el muro cortina bajo la bóveda que permite un interior de gran luminosidad. Una primera alteración arquitectónica ocurre tras el terremoto de 1960 cuando los ventanales se dañan y la fachada se cubre con planchas semitransparentes de zinc, alterando la luminosidad del espacio interior.

La forma de ocupación de la manzana siguió una tradición que se remontaba a fines del siglo XIX en la construcción



Figura 1. Fachada principal del mercado en 1950. Fuente: Colección A. Bustos.

de mercados (Salazar, 2018: 20)⁴. El MCC repite varios planteamientos del antiguo mercado de abastos localizado en el mismo sitio, proponiendo un borde y un centro con varios accesos perimetrales y ubicando el principal hacia la calle Caupolicán (Herrera, 2011). Estas características permiten valorar el MCC como un ejemplo de "racionalismo pragmático" (Eliash y Moreno, 1989: 88) en el cual convergen modernidad y tradición. Funcionalmente, el proyecto se organiza en dos zonas: un anillo perimetral que configura una fachada continua de locales comerciales, abierta al entorno; y un espacio interior al cual se accede mediante diversas penetraciones del anillo. Interiormente, los puestos se ubicaron en la nave central parabólica y sus naves laterales. Los espacios de servicio incluían baños en los accesos desde Freire y Maipú, y bodegas subterráneas. A lo largo de Caupolicán se situaba una franja de estacionamientos y la zona de carga y descarga, en Rengo⁵. Las circulaciones principales se ordenaron como dos ejes paralelos que atravesaban el Mercado conectando ambas calles, y un tercero central que unía el acceso principal en Caupolicán con el espacio central. En el sentido perpendicular, un cuarto eje central conectaba las calles Maipú y Freire. De esta manera, el mercado se configura como un edificio de gran permeabilidad, integrado a los circuitos peatonales del entorno.

En relación a la dimensión urbana, las calles Barros Arana, Freire y Maipú constituían tres importantes ejes comerciales conformados, fundamentalmente, por locales comerciales de pequeño tamaño. La calle Caupolicán y Rengo constituían ejes de apoyo comercial secundario a los principales. Las galerías comerciales comienzan a aparecer en el entorno

[3] Presentes, en cambio, en los Mercados de Talca y de Temuco que Salazar (2018) presenta como precedentes del MCC.

[4] Salazar (2018) rebate, de esta manera, a otros autores que apoyaban la vinculación del MCC con el movimiento moderno a partir de la supuesta autoría de los arquitectos Ricardo Müller y Tibor Weiner, la que en realidad correspondió a la CRA.

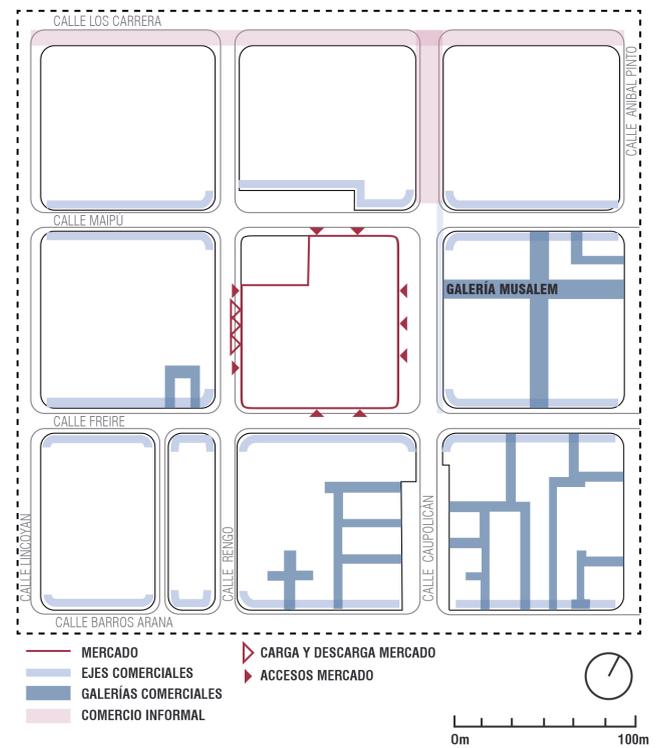
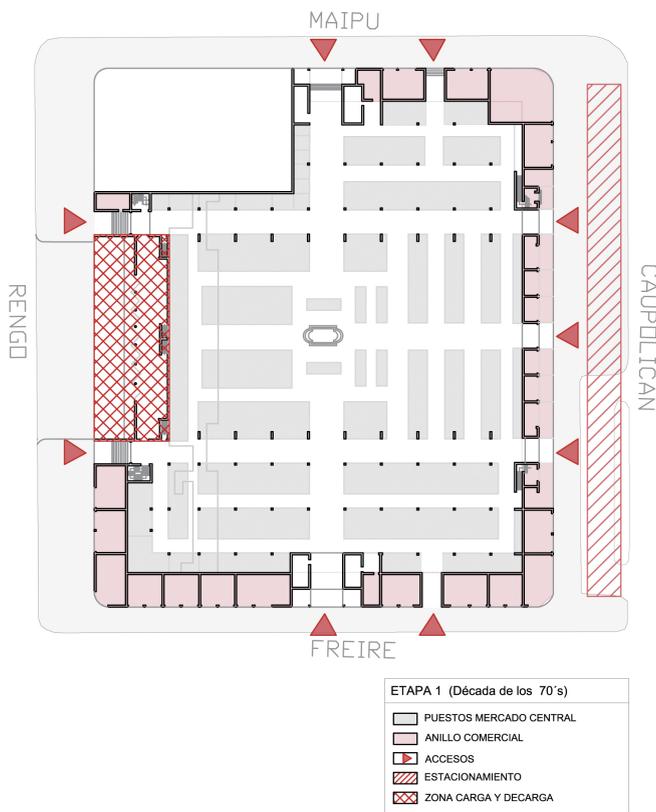
[5] <http://concehistorico.blogspot.com/2013/05/sobre-el-mercado-central.html>



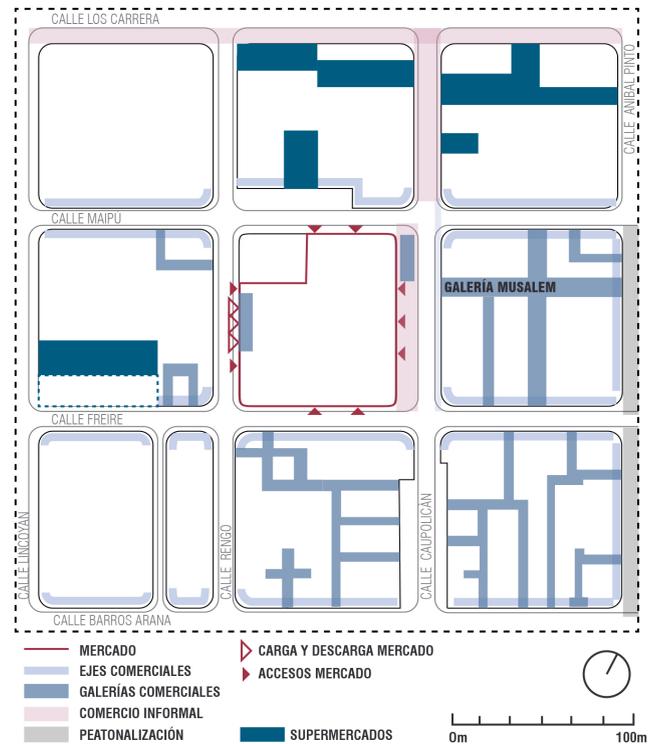
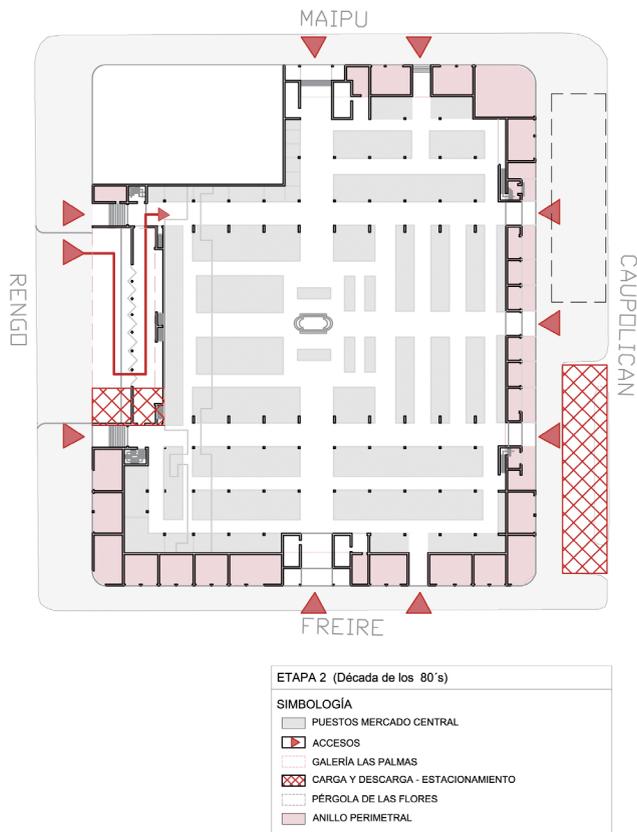
Figura 2. Fachada principal del mercado en 1980. Fuente: Archivo de Arquitectura UBB.



Figura 1. Fachada principal del mercado en 1950. Fuente: Colección A. Bustos.



Figuras 4, 5. Plano del espacio del mercado y del entorno urbano en las décadas del 60 y 70. Fuente: Elaboración de las autoras.



Figuras 6, 7. Plano del espacio del mercado y del entorno urbano en las décadas del 80 y 90. Fuente: Elaboración de las autoras.

urbano en la década de los 40 y se multiplican durante las décadas de los 50, 60 y 70. Éstas perforan el centro urbano convirtiendo todas las manzanas en espacios de gran permeabilidad para la conectividad peatonal interior y exterior. La galería Musalem, que colinda con la portada del mercado, genera continuidad transversal con el eje de Caupolicán.

Declive: Décadas de 1980 y 1990.

En cuanto al punto de vista arquitectónico, tres factores contribuyeron a la pérdida de valores formales del edificio: a) la falta mantenimiento por parte de la sociedad encargada de su administración⁶; b) diversas modificaciones interiores por parte de los locatarios, entre ellas un crecimiento desorganizado de los mesones en el espacio central -las alas laterales mantuvieron mayor homogeneidad de organización al estar insertas en la estructura-; y, c) el cambio de un lenguaje unitario del anillo exterior a una fragmentación y desorden formal (Salazar, 2018).

De modo similar, en lo funcional se producen tres cambios desafortunados: a) se reduce considerablemente la zona de carga y descarga de Rengu producto de la construcción de la Galería Las Palmas, espacio que no se integra ni formal ni espacialmente al MCC⁷; b) se reduce a la mitad la zona

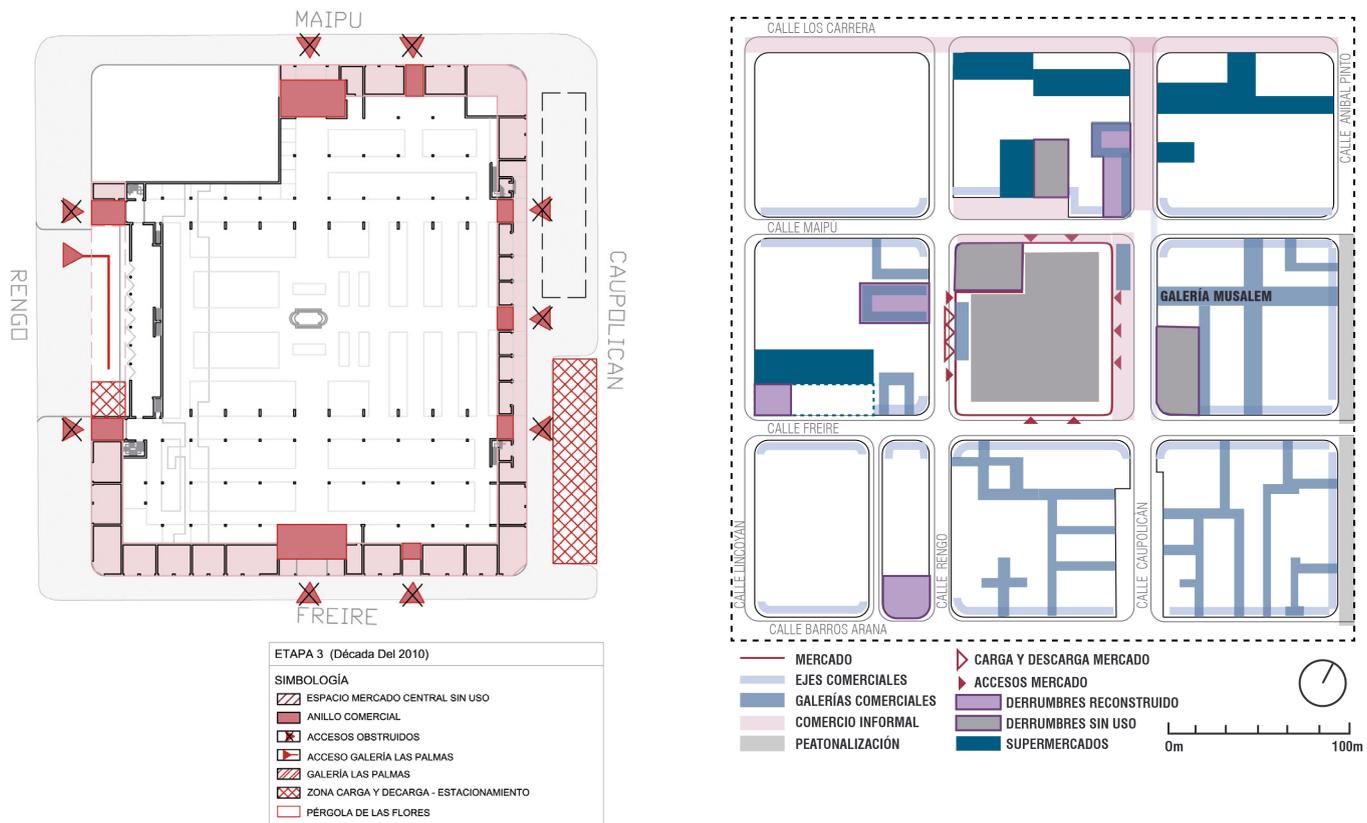
de estacionamientos en calle Caupolicán debido a la construcción de una Pérgola de las Flores; y, c) se reduce el número de accesos al espacio central (Herrera, 2011).

En relación a la esfera urbana, en esta década aparece la Galería Caracol, en la esquina suroeste de Freire con Rengu, que se considera un proto-centro comercial (De Simone, 2012) en la manzana adyacente. También surgen diversos supermercados que se instalan en el entorno urbano. Estos grandes volúmenes cerrados, que cuentan con estacionamiento, rompen la continuidad y debilitan la actividad comercial que se daba en torno los pequeños locales comerciales a lo largo de Caupolicán, Maipú y Freire. Adicionalmente, la vitalidad comercial en el espacio público se concentra a lo largo de nuevos paseos peatonales en Barros Arana y Aníbal Pinto.

Desaparece el uso del Mercado: Décadas 2010 y posteriores.

El incendio del 28 de abril de 2013 deja en ruinas la nave central y las alas laterales. Los locales del anillo exterior menos afectados fueron rehabilitados y retomaron su actividad pocos meses después. Sin embargo, sobre la zona interior recae un decreto municipal (DA 237-2013) que prohíbe el uso y el acceso “mientras mantengan las actuales circunstancias” (Municipalidad de Concepción, 2013:1).

[6] <http://concehistorico.blogspot.com/2013/05/sobre-el-mercado-central.html>
 [7] <http://concehistorico.blogspot.com/2013/05/sobre-el-mercado-central.html>



Figuras 8, 9. Plano del espacio del mercado y del entorno urbano en las décadas 2010 y posteriores. Fuente: Elaboración de las autoras.

En el año 2014, tras la aparición de diversas columnas de opinión lideradas por arquitectos en diarios locales, el edificio es declarado Monumento Nacional. En 2015, el Consejo de Monumentos Nacionales emite el documento en el que se describen los criterios de intervención del MCC, ahora patrimonial. Entre ellos, destacan el mantenimiento de la estructura de la nave central, los accesos principales, la cubierta tipo *sheed* de las alas laterales y el anillo de doble altura perimetral (CNM, 2015).

Con respecto a la escala urbana, el terremoto de 2010 afectó gravemente el entorno inmediato del mercado. Cinco edificios directamente colindantes tuvieron que ser derruidos por sus daños. En la actualidad, sólo se han reconstruido dos, uno convertido en galería comercial en la calle Rengo y otro en *strip center* en la esquina de Caupolicán con Maipú. Otros dos se han convertido en estacionamientos de pago, en la esquina de Caupolicán con Freire y en Maipú. El quinto se encuentra como sitio eriazos en el único solar de la manzana no perteneciente al mercado. Todos rompen la continuidad de locales comerciales existentes hasta el momento.

ANÁLISIS DE LA DIMENSIÓN SOCIOECONÓMICA: EL MERCADO.

Época de Oro: Décadas de 1960 y 1970.

La municipalidad era, en aquellos años, la propietaria y la gestora del mercado, que se denominaba Mercado Municipal, y

los locatarios del interior y del anillo exterior eran arrendatarios. El mercado tenía el carácter simbólico de espacio de abastecimiento urbano por excelencia, de productos primarios y, sobre todo, frescos de la zona. Los locatarios se encontraban organizados por áreas en el gran espacio interior del mercado; los vendedores de frutas y verduras, en la nave central, hacia el lado de Caupolicán; los carniceros hacia Rengo; y alrededor de la pileta central, las floristas. En las alas laterales, la esquina de Freire con Rengo reunía a los vendedores de mariscos y el resto del espacio estaba ocupado por cocinerías. En el anillo exterior se ubicaban comerciantes detallistas especializados, especialmente en ropa y textiles. Existía una normativa que mantenía una unidad estética interior y exterior. De esta manera, los puestos del espacio central eran mesones y los de las alas laterales, puestos cerrados.

En cuanto al contexto urbano, previo a la construcción del mercado, los ejes comerciales Barros, Freire y Maipú poseían un carácter diferenciado entre ellas. Barros Arana constituía el límite de la zona de comercio de alto estatus del centro urbano. En Freire se habían instalado pequeños comercios especializados, principalmente zapaterías. Maipú estaba formado por comercio heterogéneo también especializado. En Maipú con Caupolicán se encontraba "Menajes Maipú" -que aún se mantiene- y, separado por dos locales, la "Importadora Inglesa" -negocio de textil de alto nivel.

El proyecto de la CRA tuvo la intención de fortalecer y vitalizar los ejes comerciales de Maipú y Freire mediante el anillo



Figura 10. Interior del mercado en 1950. Fuente: Fotografía de Luis Darmendrail.

exterior de locales. Adicionalmente, los locales ubicados en las galerías ampliaban la oferta comercial especializada de carácter heterogéneo, convirtiendo esta zona del centro en un importante núcleo comercial, diverso y complejo. El proyecto de la CRA tuvo un efecto higienista en el espacio urbano. De este modo, en Caupolicán el comercio informal -que existía entre el antiguo mercado y la Vega Monumental, en Calle Heras- se retrae hasta Maipú, despejando el frente principal del Mercado.

Declive: Décadas de 1980 y 1990.

En 1981, la Municipalidad es forzada a desprenderse del mercado como consecuencia de las políticas neoliberales de la dictadura. Por tanto, ofrece la compra a los locatarios que, agrupados en Comandita por Acciones (CPA), una sociedad privada, se convierten en propietarios del edificio y autogestores del mercado. Este fue el comienzo de complejos problemas legales sobre la propiedad (Salazar, 2018:1) y un punto de inflexión en el mercado, ya denominado "Central". El precio, pactado en Unidades de Fomento (UF), creció en mayor medida que el peso chileno, endeudando a la CPA y repercutiendo en el paro del pago de contribuciones y otros



Figura 11. Interior del mercado en 1980. Fuente: Fotografía Gonzalo Cerda.



Figura 12. Interior del mercado en 2018. Fuente: Fotografía Camila Astorga.

impuestos. Este factor también supuso una ausencia de inversión en el edificio y en su mantenimiento, lo que condujo a una degradación tanto del edificio como de su higiene. La autogestión supuso la flexibilización de las normas estéticas de los puestos y locales.

En términos del contexto socioeconómico, las políticas neoliberales y libremercadas del régimen militar facilitaron la instalación de importadoras chinas en la década de los 70 y de supermercados, en la de los 80. Ambos tipos de comercio tienden a instalarse en el centro urbano ocupando las manzanas inmediatas al Mercado. Los primeros contribuyen al declive de la industria chilena y comercio derivado, ofertando productos más baratos y de menor calidad. Los segundos ofrecen la posibilidad de realizar una compra completa en lugares más higiénicos, con estacionamiento. El resultado fue que muchos pequeños comercios de los ejes comerciales tuvieron que abocarse a productos más especializados y focalizados; así también, se trasladaron los comercios de alto nivel y se instalaron comercios de menor calidad.

En lo que se refiere a la actividad comercial del mercado en sí, la llegada de los supermercados no implicó su quiebra, debido a que el tipo de cliente que acudía a ambos lugares era diferente. Los primeros ofrecían una compra completa, higiénica y con estacionamiento a mayor coste que la que se ofrecía en el mercado, donde se seguían encontrando productos más frescos. De ahí que el mercado mantenga su carácter simbólico de espacio abastecedor urbano; lo que cambia es el tipo de cliente que lo frecuenta, el cual comienza a ser de menor poder adquisitivo. Persiste, entonces, la venta de productos frescos, a la que se suman algunos productos que, durante la dictadura, se entendían como contrabando⁸.

El comercio informal vuelve a extenderse por calle Caupolicán hasta Freire. En la zona más cercana a Maipú, vendedoras ambulantes de flores habían construido unos puestos de madera. Tras un incendio, el municipio construyó la Pérgola de las flores, formalizando este comercio.

Desaparece el uso del mercado: Década 2010 en adelante. Tras la venta del 60% del edificio del mercado a una inmobiliaria⁹ en el año 1996, a cambio del pago de las deudas, el mercado ingresa en la década de 2010 siendo propiedad de la CPA y de esta inmobiliaria, pero enfrascada en procesos judiciales, en los que la CPA trata de recuperar la propiedad total del mercado. Durante todo este tiempo la CPA ha seguido autogestionando el mercado, aumentando la deuda, la falta de manutención del edificio y la desorganización. El incendio del 28 de abril de 2013, en el que la capa plástica que cubría las goteras de la cúpula central ardió, arrasó con toda la actividad comercial de la manzana. Poco a poco ésta fue recuperándose en la galería de las Palmas y en el anillo exterior, pero se prohibió por decreto municipal el uso de la parte interior del edificio. Los locatarios del interior tuvieron que comenzar a vender en el exterior -a la intemperie- como comerciantes informales. La pérdida del flujo de clientes ha conducido al cierre de casi todos los locales de la galería de las Palmas y a un generalizado cambio de uso en los locales que se encuentran en el anillo exterior. Algunos locatarios se transformaron en vendedores informales, decidieron dejar la profesión o encontraron locales en otros lugares. Los menos, esperaron a la construcción de un nuevo mercado central que se concretó en una zona periférica en el año 2016. El Mercado Central ha dejado de ser un espacio simbólico como abastecedor de alimentos y el nuevo mercado no ha conseguido adoptar este papel, debido a la importante pérdida de locatarios y a la nueva localización del recinto, en el límite del casco histórico.

Desde la perspectiva del contexto urbano, mientras que Barros Arana mantiene su carácter de gran eje comercial de alto nivel, Freire y Maipú han disminuido considerablemente su valor simbólico como ejes comerciales, producto del deterioro mencionado.

Los comerciantes informales ocupan en la actualidad todo el perímetro del Mercado Central, concentrándose primordialmente en las calles Caupolicán y Maipú, y ofreciendo todo tipo de productos: frescos, legumbres, accesorios de telefonía, etc.

DISCUSIONES

ÉPOCA DE ORO: DÉCADAS 1960 Y 1970

A partir del análisis efectuado, se desprende que los principales valores del ambiente construido en esta época se referían a aspectos de innovación así como a cualidades espaciales y formales del edificio, asociados a principios de la arquitectura moderna. Igualmente, tanto a escala arquitectónica como urbana, el mercado se configuró como un elemento fuertemente integrado en su entorno, y como un factor vitalizador de su contexto urbano. Dos características fortalecieron esta integración: a) la ocupación de la manzana, con un gran espacio interior y un anillo perimetral de locales detallistas que vitalizaban las calles perimetrales de ejes comerciales; y, b) la existencia de diversos accesos perimetrales conectados a ejes de circulación que atravesaban el espacio interior y que, en algunos casos, generaban continuidad con la red de galerías comerciales del entorno. En tal sentido, el edificio y el entorno funcionaron de manera integrada y sinérgica potenciándose mutuamente, produciendo, además, un efecto higienista en cuanto a la eliminación del comercio informal en el espacio público.

Al analizar la gestión del mercado en esta época es posible identificar dos factores del contexto social que pueden haber contribuido a la preservación de las cualidades antes señaladas:

- En la escala arquitectónica, la existencia de una entidad unitaria (Municipalidad) encargada de la administración del mercado, cuya normativa mantenía la unidad así como las cualidades originales de la propuesta arquitectónica.
- En la escala urbana, la vigencia del Plan Regulador de 1960 que promovió la creación de galerías comerciales al interior de las manzanas del centro, conformando un circuito peatonal interior comercial al que el mercado se integró.

En resumen, y desde el punto de vista del hábitat, tanto las cualidades del medio construido como algunos aspectos de su gestión y su planificación confluyen sinérgicamente para generar un denso intercambio de flujos entre el interior y exterior de la 'célula' del mercado. Esto permite que se produzca un eco-sistema mercado-contexto caracterizado por un fluido intercambio de personas, productos y energía que posibilita el desarrollo de la función de mercar.

[8] Entrevista Agustina Torres, locataria histórica del MCC, 28 de agosto 2018. En el contexto de la dictadura, algunos productos de primera necesidad no tenían mucha accesibilidad y formaban parte de un comercio informal clandestino.

[9] Inmobiliaria 2000.

DECLIVE: DÉCADAS DE 1980 Y 1990

El cambio hacia un modelo neoliberal y libremercadista a nivel país tuvo fuertes repercusiones en la administración y gestión del mercado que, a su vez, impactaron en la esfera de lo construido¹⁰.

En la escala arquitectónica, la Municipalidad se vio obligada a cesar en su rol como ente administrador; las políticas económicas influyen en el endeudamiento de la nueva sociedad de locatarios a cargo, lo que, a su vez, incide en la falta de mantención del edificio. Finalmente, la nueva administración es incapaz de preservar los valores arquitectónicos claves para la sostenibilidad del hábitat del mercado: a) cualidades arquitectónicas; b) unidad formal del edificio y su coherente organización interior; y b) accesibilidad y permeabilidad del edificio en relación a su entorno urbano.

En la escala urbana, el contexto comercial en el cual se inserta el mercado se ve enfrentado a la competencia de las grandes superficies comerciales (supermercados y proto centros comerciales) y a las importadoras que florecen dentro del marco de las políticas de apertura al comercio exterior. Ambos agentes debilitan la actividad comercial de los pequeños locales, facilitando el declive de los ejes comerciales así como la recolonización del espacio público por parte del comercio informal¹¹.

Desde el punto de vista del hábitat, en la escala arquitectónica la 'coherencia' interna del edificio como 'célula' de mercar se debilita, a partir de una gestión que permite una serie de intervenciones fragmentadas e inconexas entre sí, sobre el medio construido. En la escala urbana, el modelo económico debilita el tejido comercial en el cual se insertaba la 'célula', siendo esta incapaz de mantener su función vitalizadora del contexto.

DESAPARECE EL USO DEL MERCADO: DÉCADA 2010 EN ADELANTE

En esta fase, la tendencia continúa agravando los cambios iniciados en la fase anterior.

En la escala arquitectónica, la frágil figura de administración del edificio, sumado a los conflictos asociados a procesos judiciales y a la precariedad de la situación económica, inciden en la degradación del medio construido. Provocan, en concreto, la falta de mantención del edificio que, a su vez, facilita la producción del incendio. Este hecho determina, en definitiva, la pérdida de la función de mercar en el interior del edificio que queda prohibida por decreto municipal. Los locatarios del interior son desplazados a una nueva ubicación en el límite del caso histórico o se transforman en comerciantes informales, ampliándose así el área de colonización del espacio público por parte de este tipo de comercio.

En la escala urbana, puede interpretarse la pérdida del valor simbólico del área como eje comercial de alto nivel. El declive general del área disminuyó su capacidad de respuesta frente al grave terremoto que afectó la zona, lo cual quedó evidenciado en la lentitud del proceso de reconstrucción, en la actual persistencia de sitios eriazos, en el cierre o cambio de uso de muchos locales del anillo perimetral y en la pérdida del flujo de clientes en el área.

CONCLUSIONES.

Para el estudio de caso del Mercado Central de Concepción (MCC) se confirma la hipótesis de que una gestión disociada de las dimensiones construida y socioeconómica, y no integrada en las escalas de edificio y urbana ha contribuido a la insostenibilidad del hábitat que constituía el MCC en su primera etapa, tras su diseño.

Del análisis realizado se pueden inducir dos grandes conclusiones que reafirman la aplicabilidad y pertinencia del concepto de hábitat sustentable para el caso de los mercados urbanos históricos. La primera, en relación a la escala de la 'célula', sugiere la importancia de fortalecer formas de gestión capaces de equilibrar las aspiraciones de los locatarios individuales con una visión integral del espacio del mercado. El caso analizado revela que dicha visión integral constituye un factor clave para la preservación de las cualidades arquitectónicas del mercado y su coherencia con el uso de mercar.

La segunda conclusión se refiere a la necesidad de mantener a escala urbana una complementariedad funcional entre el espacio arquitectónico del mercado -i.e. la 'célula'- y el tejido en el cual éste se inserta, de modo que ambos (célula y tejido) configuren un "ecosistema" comercial dinámico. La integración espacial de esta célula, a través de galerías, en el caso de Concepción, o de estrategias de peatonalización, en otros casos, permite un acercamiento y una continuidad del espacio del mercado en el entorno urbano. La política de desarrollo urbano y la planificación urbana son responsables de la salvaguarda de este ecosistema (de su diversidad y de su soporte edificado), o bien, de su regeneración.

Los cambios contextuales parecen conducir inevitablemente a la desaparición de los mercados históricos, ya sea producto del declive debido a la inacción o, en el extremo opuesto, debido a procesos de gentrificación asociados a proyectos de rehabilitación que excluyen a los locatarios. En este escenario, la aplicación del concepto del hábitat sustentable a estos espacios, contribuye a resituar el énfasis de las actuaciones de rescate, en una adaptación al contexto urbano contemporáneo, basada en la integración de su contenedor con sus locatarios y locatarias, tanto en la escala arquitectónica como en de la ciudad.

[10] Guerrero y Alarcón (2018) concuerdan en estos efectos socio-espaciales del neoliberalismo para el caso de las caletas de pescadores enfrentadas al desarrollo industrial de gran escala.

[11] La informalidad se concibe bajo lógica de la subsistencia (Canales, 2017).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMAYA, Luis; ALEXIEU, Ioannins; SUÁREZ, Gabriel; SERNA, David y RUEDA, Liliana. Diálogos con escala. Soportes urbanos, *Revista Escala*, 2004, n° 196, pp. 15-19.
- CANALES, Danilo. *Comercio informal urbano en Chile neoliberal: el caso de los vendedores ambulantes en el transporte público (Santiago, 1990-2017)*. Seminario para optar al grado de Licenciado en Historia. Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2017.
- CEHAP. CENTRO DE ESTUDIOS DEL HÁBITAT POPULAR. *Vivienda y hábitat... claves en el tejido de ciudades*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad Arquitectura, CEHAP, 1998.
- CERDA, Gonzalo. Arquitectura Moderna en Concepción 1939-1960. *Arquitecturas del Sur*, 1994, (22), 1-12.
- CONSEJO DE MONUMENTOS NACIONALES. *Criterios generales de intervención del Mercado Central de Concepción*. Santiago: Ministerio de Educación, 2015.
- DE SIMONE, Liliana. Caracoles comerciales y otras especies en peligro de extinción, *Bifurcaciones*, 2012, n° 10, p. 1.
- DELGADILLO, Víctor. Presentación, *Alteridades*, 2016, n° 51, pp. 1-9.
- DELGADILLO, Víctor. Patrimonialización de los mercados, *Ciudades*, 2017, n° 114, pp. 2-9.
- DELGADO, Gian Carlo; CAMPOS, Cristina y RENTERÍA Patricia. Cambio Climático y el Metabolismo Urbano de las Megaurbes Latinoamericanas, *Hábitat Sustentable*, 2012, vol. 2, n° 1, pp. 2-25.
- ELIASH, Humberto y MORENO, Manuel. *Arquitectura y modernidad en Chile 1925 – 1965: una realidad múltiple*. Santiago: Universidad Católica de Chile, 1989.
- GOBIERNO DE CHILE. Decreto 0322 del 31 de junio de 2014.
- GONZÁLEZ, Carmen I. y HIERNAUX, Daniel. Mercados queretanos: entre tradición y modernidad, *Ciudades*, 2017, n° 114, pp. 17-24.
- GUERRERO, Rosa y ALARCÓN, Mabel. Neoliberalismo y transformaciones socio-espaciales en caletas urbanas del Área Metropolitana de Concepción. Los casos de Caleta Los Bagres y Caleta Chocholgué, Tomé, *Revista de Urbanismo*, 2018, n° 38, pp. 1-17.
- HAMZA, Neveen; ELKERDANY, Dalila; PENDLEBURY, John; IMAM, Sahar; ALSADATY, Aliaa y ELSERAFI, Tamer. Sustained Liveability: A Framework Beyond Energy Conscious Building Conservation of Market Halls, *Archnet-IJAR*, 2017, vol. 11, n° 3, pp. 119-131.
- HERNÁNDEZ, Adrián y ANDREEVA, Stoyanka. Disputa por los mercados públicos abandonados, *Ciudades*, 2017, n° 114, pp. 25-31.
- HERRERA, Carolina. *Análisis y estudio del mercado central de Concepción como patrimonio arquitectónico moderno y su evolución: 1940 – 2011*. Seminario de investigación. Universidad del Desarrollo, Concepción, Chile, 2011.
- LACARRIEU, Mónica "Mercados tradicionales" en los procesos de gentrificación/recualificación. Consensos, disputas y conflictos, *Alteridades*, 2016, vol. 26, n° 51, pp. 29-41.
- LAMA, María Paz. Estudio de los significados del Mercado Central de Concepción para considerar en una futura recuperación patrimonial, *Arquitecturas del Sur*, 2018, vol. 26, n° 53, pp. 58-73.
- LEFF, Enrique. *Saber ambiental. Sustentabilidad, racionalidad, complejidad, poder*. 1^{era} edición. México: Siglo Veintiuno Editores, 1998.
- LÓPEZ, Karen B. Hacia un hábitat sostenible: Apuntes para una reflexión conceptual sobre hábitat, *Población y Desarrollo*, 2003, n° 24, pp. 4-11.
- MUNICIPALIDAD DE CONCEPCIÓN. Decreto Municipal N°237, de 27 de mayo de 2013, que prohíbe el ingreso al interior del inmueble Mercado Central de Concepción.
- OVALLE, Jairo H. y PÁEZ, Ángelo. Equipamiento urbano en la reconstrucción de vínculos comunitarios, *Arquitecturas del Sur*, 2017, vol. 35, n° 51, pp. 42-55.
- RODRÍGUEZ, Alejandro. La transformación de los mercados municipales de Madrid. Análisis legislativo, comercial y económico de los mercados de abastos madrileños, *Territorios en Formación*, 2014, vol. 7, pp. 86-102.
- RODRÍGUEZ, David y VALLDEORIOLA, Jordi. *Metodología de la investigación*. 1^{era} edición. Barcelona: Universitat Oberta de Catalunya, 2009.
- ROSA, Paula. Ferias y mercados en una ciudad en transformación, *Ciudades*, 2017, n° 114, pp. 32-38.
- RUIZ OLABUÉNAGA, José I. *Metodología de la investigación cualitativa*. Bilbao: Universidad de Deusto, 1996.
- SALAZAR, Camila. Cubrir la proeza constructiva, crear el espacio interior. Elementos para una historia arquitectónica del Mercado Central de Concepción, *Arquitecturas del Sur*, 2018, vol. 36, n° 53, pp. 6-21.
- SOARES, Claudio S. Mercado públicos municipales: espacios de resistencia al neoliberalismo urbano, *Ciudades*, 2017, n° 114, pp. 39-46.
- URBACT. *URBACT Markets. Thematic Guidelines* [en línea]. Unión Europea, 2013 [Consultado 3 diciembre 2018]. Disponible en: http://urbact.eu/sites/default/files/import/Projects/URBACT_Markets/outputs_media/2013-03-14_Urbact_Markets_Thematic_Guidelines.pdf.
- YIGITCANLAR, Tan; DUR, Fatih y DIZDAROGLU, Didem. Towards prosperous sustainable cities: A multiscalar urban sustainability assessment approach, *Habitat International*, 2015, vol. 45, pp. 36-46.
- ZAKARIYA, Khalilah; KAMARUDIN, Zumahiran y HARUM, Nor Z. Sustaining the Cultural Vitality of Urban Public Market. A Case Study of Pasar Payangk, Malaysia, *Archnet-IJAR*. 2016, vol. 10, n° 1, pp. 228-239.



HUELLA DE CARBONO COMO INSTRUMENTO DE DECISIÓN EN LA REHABILITACIÓN ENERGÉTICA. PELÍCULAS DE CONTROL SOLAR FRENTE A LA SUSTITUCIÓN DE VENTANAS

CARBON FOOTPRINT AS A DECISION INSTRUMENT IN ENERGY REHABILITATION: SOLAR CONTROL WINDOW FILMS VERSUS REPLACEMENT WINDOWS

CRISTINA RIVERO CAMACHO
Estudiante de Doctorado en Arquitectura
Universidad de Sevilla, Sevilla, España
<http://orcid.org/0000-0001-9411-7311>
cririvcam@gmail.com

JÚLIA PEREIRA
Estudiante de Doctorado en Ingeniería Civil
CERis, Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos.
Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal
<https://orcid.org/0000-0003-4539-8844>
julia.pereira@tecnico.ulisboa.pt

M. GLÓRIA GOMES
Doutorada em Engenharia Civil
CERis, Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos.
Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal
<https://orcid.org/0000-0003-1499-1370>
maria.gloria.gomes@tecnico.ulisboa.pt

MADÉLYN MARRERO
Doctora Ingeniera Industrial
Departamento de Construcciones Arquitectónicas II, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, Universidad de Sevilla, España
<https://orcid.org/0000-0002-9509-4374>
madelyn@us.es

RESUMEN

El objetivo de este artículo es la evaluación ambiental de dos posibles soluciones constructivas que mejoran la eficiencia energética de edificios existentes: sustitución de la ventana completa por una nueva más eficiente y uso de láminas de control solar adheridas a los vidrios actuales. Se propone una evaluación cuantitativa que ayude en la toma de decisiones para minimizar el consumo de recursos naturales, energía incorporada en los materiales, así como su impacto medioambiental, emisiones de CO₂ equivalentes. Como modelo de evaluación, se ha adaptado la metodología del grupo de investigación ARDITEC de la Universidad de Sevilla, en colaboración con el Instituto Superior Técnico de la Universidad de Lisboa, aplicándose a proyectos reales en Portugal. El modelo tiene una estructura presupuestaria donde a cada recurso se le asignan coeficientes para el cálculo de su energía incorporada y huella de carbono, en su fabricación y puesta en obra. Se presenta el estudio de dos edificios de oficinas, con un alto porcentaje de superficie vidriada en fachadas. Los resultados obtenidos muestran emisiones inferiores en un 70% si se mejoran las ventanas con películas adheridas que si se opta por sustituirlas completamente.

Palabras clave

láminas de control solar, renovación arquitectónica, fachadas, ventanas, impacto ambiental.

ABSTRACT

The objective of this research is the environmental assessment of two possible construction solutions that improve the energy efficiency of existing buildings: replacement of entire windows with new, more efficient ones, and the use of solar control window film applied to current panes. A quantitative evaluation is proposed that aids in decision making to minimize the consumption of natural resources and energy incorporated in the materials, as well as their environmental impact, as measured by equivalent CO₂ emissions. As an assessment model, the methodology of the ARDITEC research group at the University of Seville was adapted, in collaboration with the Higher Technical Institute at the University of Lisbon, and was applied to real projects in Portugal. The model has a budget structure in which each resource is assigned coefficients for the calculation of its incorporated energy and carbon footprint, in its manufacture and implementation. The study of two office buildings with a high percentage of glazed surface in facades is presented. The results obtained show 70% lower emissions if windows are improved with films compared to complete window replacement.

Keywords

solar control window films, architectural renovation, facades, windows, environmental impact.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de reducir las emisiones de CO₂ está contribuyendo a cambiar el modelo energético, lo cual implica un cambio en los hábitos del consumidor, así como cierto giro en la forma de proyectar y construir. La edificación es un sector de enorme influencia en la evolución del consumo de energía y de las emisiones de CO₂. Efectivamente, en el conjunto de la Unión Europea, los edificios son responsables del 40% del consumo total de energía (WWF, 2010) y del 36% de las emisiones de dióxido de carbono.

Optimizar el uso de la energía en los edificios existentes es un paso clave en la tarea de cumplir con los objetivos comunitarios para 2030 de al menos el 27% de mejora de la eficiencia energética y del 40% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Reglamento UE 2018/841). En ese contexto, aparecen distintos planteamientos de rehabilitación energética de edificios a nivel nacional e internacional.

Cabe agregar que el cambio de tendencias arquitectónicas en fachadas, a partir del cual se las construye más vidriadas -buscando el beneficio de la luz solar para el ahorro en iluminación artificial- produce, sin embargo, un mayor consumo energético, si se quiere mantener el confort térmico en el interior del edificio. En ese sentido, Kuchen, Plesser y Fisch (2012), llegan a la conclusión de que, aun en edificios tecnológicos desarrollados en los últimos 15 años, siguen existiendo potenciales de Eficiencia Energética (EE) y de mejoramiento del confort en general. Ante esa problemática, en las últimas décadas han surgido múltiples patentes de películas de control solar para adherir a los vidrios de estos edificios.

Las películas de control solar están diseñadas para absorber o reflejar la radiación solar incidente, a fin de disminuir las ganancias de calor solar a través del vidrio. En este marco, Rubin (1982) presentó una metodología para analizar la transferencia de calor en múltiples acristalamientos con o sin película de control solar, considerando variables ambientales tales como la temperatura y la velocidad del viento. Álvarez, Jiménez y Estrada (1998) y Álvarez, Flores y Cortina (1999), partiendo de resultados experimentales, plantean un modelo matemático para el análisis de la transferencia de calor en un vidrio con o sin película de control óptico en estado transitorio y estable. Los autores concluyeron que el uso de un vidrio con película de control solar redujo las ganancias de calor hasta en un 48%. Múltiples estudios más recientes avalan la mejora en el comportamiento térmico cuando las películas se sitúan por la cara exterior de la ventana (Rongxin, Peng y Pengyuan, 2011), lo que también se verifica en los últimos trabajos realizados en el Instituto Superior Técnico (IST) de Lisboa (Lourenço, Gomes y Moret, 2017; Lourenço, 2016; Pereira, 2015). De estos últimos, nace la pregunta acerca de si la opción de mejora de los vidrios con la adhesión de láminas de control solar es en sí misma una solución sostenible, en términos de análisis de ciclo de vida (ACV).

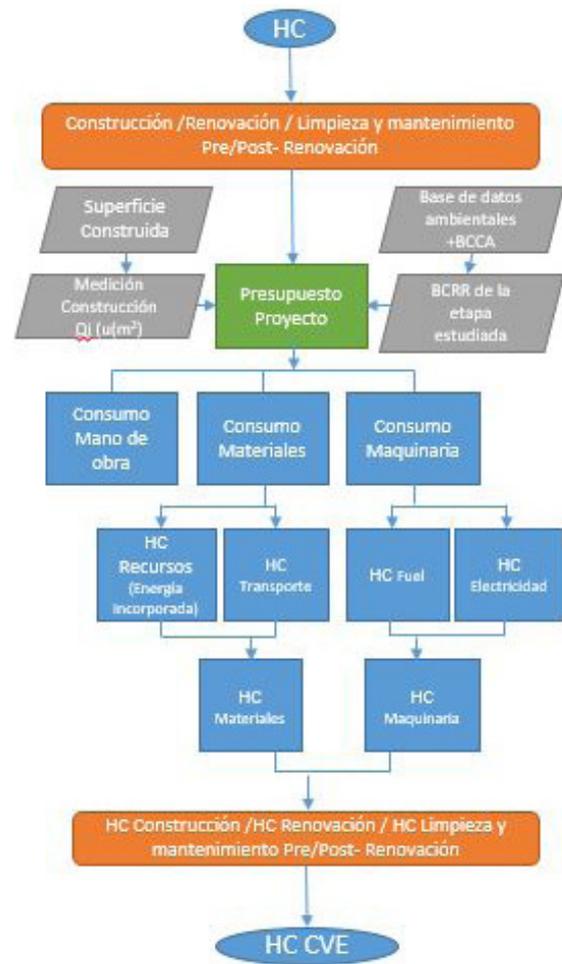


Figura 1. Esquema de la metodología ARDITEC para HC en CVE.
 Fuente: Elaboración de las autoras.

Asimismo, se debe tener presente en el momento de evaluar distintas opciones que, en casos reales, donde se han adoptado materiales alternativos, existen otras prioridades que afectan a la elección de materiales. Un estudio internacional de equipos de diseño realizado en 2012 por Ove Arup & Partners-ARUP para el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (CEMDS), demostró que a pesar de que un gran número de factores determinan la selección del material, el coste económico era el criterio de prioridad, y la sostenibilidad del material tenía menos influencia aunque existieran conocimiento y experiencias anteriores por parte del personal técnico (ARUP y CEMDS, 2012). Incluso otras soluciones basadas en arrojar sombra a las fachadas vidriadas no siempre resultan las mejores opciones para el ahorro energético, pues implican un mayor consumo en las estaciones de invierno para alcanzar el confort térmico (Jara, 2013).

El tradicional arraigo de la economía en la toma de decisiones, en este sector, fortalece la propuesta de la inclusión de la evaluación del impacto ambiental a través de los presupuestos de los proyectos de construcción, ya que el control de costes forma parte de la cultura del sector de la edificación y puede

BANCO CUANTIFICACIÓN RECURSOS (BCRR)									
NOMBRE DEL CAPÍTULO/SUBCAPÍTULO									
Nombre del apartado									
CÓDIGOS			Unidad	Descripciones	Cuantificación				Precios
PUS	PA	PB			Q _M	F _R	Q PUS	IMPORTE PUS Σ PB/PA	
Código Precio Unitario Simple (PUS)			u	Descripción PUS	Cantidad ΣQ _u (PB/PA)				
Código Precio Auxiliar(PA)			u	Descripción PA	Cantidad PA = Σ MAT, MO y MAQ				PA= Σ PB MAT. MO y MAQ
Código (PB)			u	MATERIALES	Cantidades materiales (MAT)				PB materiales (MAT)
Código (PB)			u	MANO DE OBRA	Cantidades mano de obra (MO)				PB mano de obra (MO)
Código (PB)			u	MAQUINARIA	Cantidades maquinaria (MAQ)				PB maquinaria (MAQ)

Tabla 1. Esquema de la estructura de precios del BCCA. Fuente: Rivero, Muñoz y Marrero, 2018.

servir para introducir aspectos medioambientales en los criterios de selección.

Anteriormente, se han empleado indicadores que seguían la metodología del ACV (Zabalza-Bribián, Valero y Aranda, 2011; Malmqvist y Glaumann, 2009). En la actualidad, existe una tendencia a emplear metodologías más simples que sean fácilmente entendidas por la sociedad y cuya aplicación sea más rápida y directa, como la de la Huella de Carbono (HC). Los resultados que esta produce son comprensibles por el ámbito no académico, además de que presenta una fácil aplicación en políticas medioambientales y toma de decisiones (Solís-Guzmán, Martínez-Rocamora y Marrero, 2014). En concreto, se emplea el indicador HC desde la perspectiva de un presupuesto ambiental a través de los bancos de costes de la construcción, donde se tienen en cuenta los recursos necesarios durante el ciclo de vida del edificio (CVE) (extracción de materias primas, transformación en materiales, utilización en obra, demolición y reconstrucción).

En este artículo se analizan dos casos de estudio, con diferente porcentaje de fachada acristalada, a los cuales se les realiza una comparativa a lo largo del CVE completo, siguiendo la metodología ARDITEC (*ibidem*). Para ello, se seleccionan los vidrios que aportan al edificio las mismas mejoras a nivel de eficiencia energética que la implantación de las películas de control solar estudiadas. Esto hace que ambas soluciones ahorren lo mismo, posibilitando la comparativa aislada a nivel económico y ambiental de la energía, como también de emisiones incorporadas en los materiales. El estudio quiere dar respuesta a la rentabilidad en términos de ACV, comparando dos soluciones constructivas: la colocación de láminas de control solar frente a la sustitución de ventanas; teniendo en cuenta que la renovación con películas de control solar tiene en contraposición la corta vida útil de las mismas, siendo necesario sustituirlas cada 10 años, mientras las ventanas pueden durar hasta 30 años. Finalmente, se comparten las conclusiones del análisis de CVE que, en ambos casos de estudio, arrojan resultados favorables al uso de las películas de control solar, frente a la sustitución de ventanas como medida de mejora de la eficiencia energética de edificios.

METODOLOGÍA

En el presente trabajo se utiliza la metodología del grupo ARDITEC (Arquitectura Diseño y Técnica) de la Universidad de Sevilla, para la evaluación ambiental de las soluciones constructivas estudiadas. Este grupo emplea los presupuestos de los proyectos de edificación como vehículo para la incorporación del impacto ambiental, añadiendo este aspecto a los costes del proyecto (Freire, Muñoz y Marrero, 2016). El presupuesto descompone los elementos del proyecto según las mediciones; conociendo así, a través de las partidas, los rendimientos y cantidades de recursos empleados (materiales, maquinaria y mano de obra) (Figura 1). La metodología se aproxima a un "presupuesto ambiental", facilitando su entendimiento por los técnicos del sector, lo cual incentiva su aplicación.

METODOLOGÍA ARDITEC Y USO DE LA CLASIFICACIÓN SISTEMÁTICA

Para la evaluación y cuantificación de la HC en el CVE de las soluciones, se parte de una adaptación del modelo desarrollado en Solís-Guzmán, Marrero y Ramírez (2013) y Marrero *et al.* (2014). La base de la metodología HC en edificación ha sido la cuantificación de los recursos consumidos en los proyectos (Figura 1), a través de la clasificación sistemática del Banco de Costes de la Construcción de Andalucía (BCCA) (Consejería de obra pública y vivienda de la Junta de Andalucía, 2018). El BCCA tiene una estructura piramidal (Tabla 1) mediante la cual diferencia tres tipos de precios: los Precios Básicos (PB), considerándose estos como el coste por unidad de un elemento básico en condiciones de ser aplicado en obra; los Precios Auxiliares (PA), formados por una combinación de PB en proporciones constantes que interviene como componente en el cálculo del precio de una unidad de obra; y, por último, se encuentran los Precios Unitarios Simples (PUS), conformados por una combinación de PB o PA (Ramírez-de-Arellano y Marrero 2010). Los PUS se corresponden con una unidad terminada de un elemento constructivo.

Subcapítulo 11R REPOSICIONES							
Apartado 11RV Ventanas							
Grupo 11RV5 Sustituciones				Coste económico		Coste ambiental	
11RV590230	m2	SUSTITUCION DE VENTANA DE ACERO INOX C/RPT, T. IV, M. MANUALES, CON VIDRIO BAJO EMISIVO Y CONTROL SOLAR	€/ud ref	€ total	t CO2/ud ref	t CO2 total	
Ventana de hojas abatibles, con rotura de puente térmico, ejecutada con perfiles de acero inoxidable con espesor de 1,5 mm y RPT, tipo IV (>3 m2), incluso preceso de perfil tubular conformado en frío de acero galvanizado con patillas de fijación, junquillos, junta de estanqueidad de neopreno, vierteaguas, herrajes de coigiar y cierre y p.p. de sellado de juntas con masilla elástica. La carpintería debe cumplir los parámetros de permeabilidad, estanqueidad y resistencia al viento en las zonas C o D, se incluye vidrio termoacústico doble (8+14+8+8-Argón), bajo emisivo y con control solar, construido según CTE.							
01KLV90001	1,012	m2	DEMOLICIÓN SELECTIVA M. MAN. DE VENTANA CON PERFILES DE ALUM.	5,48	5,55	0,00	0,00
11LVA00153	1	m2	VENTANA ABATIBLE ALUM. LACADO TIPO IV (> 3 m2)	101,62	101,62	0,02	0,02
06VWR80060	1,012	m2	RECIBO DE CERCOS EN CERRAM. EXTERIORES (FAB. REVESTIR)	15,35	15,53	0,01	0,01
12L TI90020	1	m2	ACRIST. TERMOACÚSTICO DOS LUNAS PULIDAS INCOLORAS CON BAJA EMISIVIDAD 6 mm	48,58	48,58	0,01	0,01
TOTAL EUR:				171,28		TOTAL HC	0,04

Tabla 2. Muestra del BCCA, ejemplo de precio con recursos desglosados. Fuente: Elaboración de las autoras a partir de Solís, Rivero y Alba (2018).

Siguiendo la metodología contenida en la Tabla1, se presenta, en la Tabla 2, un ejemplo de estimación del PUS, de sustitución de ventana medido en superficie (m²). A través de los rendimientos de los precios (Q_M), incluyéndose el porcentaje de pérdidas (F_R), se obtiene el QPUS, el total de recursos consumidos del PUS, que es equivalente a ΣQu, que constituye, a su vez, el sumatorio total de los distintos recursos: materiales consumidos (MAT), horas totales de mano de obra (MO) y maquinaria empleada (MAQ).

Para el modelo de evaluación ambiental, se sigue esta misma estructura presupuestaria, donde a cada recurso se le asignan una serie de coeficientes para el cálculo de su HC, en lugar de los euros de su coste.

Previamente, ha sido necesario analizar las soluciones constructivas de las edificaciones portuguesas, así como sus rendimientos en la puesta en obra, verificando la viabilidad de adaptación del modelo de presupuestación español, tal y como Rivero, Muñoz y Marrero (2018) hicieron para las construcciones chilenas.

PROCEDIMIENTO DETALLADO PARA LA APLICACIÓN DEL INDICADOR HC

El modelo de cálculo de HC en el CVE, se muestra en la Figura 1. Se pueden apreciar los diferentes conceptos clasificados en varios niveles (fuentes de impacto y huellas). En definitiva, el modelo de cálculo de HC determinará la huella total que, a su vez, se compone de diferentes huellas parciales: HC de la fase de construcción, HC de renovación y HC de limpieza y mantenimiento. Éstas provienen de los impactos generados por los recursos, la energía y la generación de emisiones de CO₂. Estos conceptos son catalogados en el esquema como elementos intermedios y su misión es transformar esos consumos en elementos que permitirán definir las distintas huellas parciales que componen la huella global.

Se estudiará el CVE de forma parcial: sólo la energía incorporada y sus correspondientes emisiones de los

elementos en el presupuesto de las obras en cada etapa de la vida del edificio, desde la construcción hasta la rehabilitación energética del edificio, pasando por su mantenimiento. Respecto a la fase de construcción, se obtiene la HC de los casos de estudio haciendo uso de la herramienta informática OERCO2 (Herramienta interactiva para el cálculo de emisiones de CO2 en los procesos constructivos), desarrollada por el grupo ARDITEC (Solís, Rivero y Alba, 2018). En la siguiente etapa del CVE (uso y mantenimiento), que es la de mayor extensión en el tiempo, se debe diferenciar dos periodos: uno de uso previo a las obras de renovación, hasta los 20 años de vida del edificio, y la etapa posterior a la renovación, hasta el final de su vida útil. Se tendrán en cuenta, por un lado, los consumos directos de recursos materiales y energía, requeridos en las obras de renovación (Alba-Rodríguez et al., 2017) y, por otro, aquellas actuaciones de conservación y limpieza del inmueble durante su uso (Martínez-Rocamora, Solís y Marrero, 2016b).

ELABORAR EL INVENTARIO DE RECURSOS.

El primer paso del cálculo es la elaboración de un inventario, que incluye todas las entradas del edificio y que se puede llevar a cabo mediante la generación del presupuesto del proyecto. En este documento, todos los recursos se ordenan en base a la Clasificación Sistemática (Ramírez-de-Arellano-Agudo, A., 2010), pudiéndose simplificar en tres categorías: materiales, maquinaria y mano de obra. El resumen de todas las ecuaciones empleadas para los cálculos, se recoge en la Tabla 3.

Materiales de construcción.

Para obtener la HC de cada elemento constructivo, en primer lugar, se obtiene el peso de los materiales utilizados, a estos se les aplica las bases de datos de ACV, las cuales definen las emisiones de CO₂ equivalentes (t CO₂ eq) que contiene cada kg de material. La base de datos ambiental empleada es Ecoinvent, implementada en SimaPro y desarrollada por el Swiss Center for Life Cycle Inventories, debido a su transparencia en el desarrollo de procesos, consistencia, referencias y el destacado hecho

	n° ecuación
Materiales	
HC _{MAT} : HC de materiales de construcción (tCO ₂ eq)	
HC _{MAT} = (∑ _i Cm _i x E _{MAT} _i) + (HC _{TRAN} x Cm _T)	1
Cm _i : consumo del material i (kg)	
E _{MAT} : emisiones por material (tCO ₂ eq/kg material)	
HC _{TRAN} : huella de carbono del transporte de materiales de construcción (tCO ₂ eq/kg)	
Maquinaria	
V: consumo de combustible (litros)	
V = (Pot x TU x Rend)	2
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 _{COMB} : HC consumo combustible (fósil) de maquinaria (tCO ₂ eq)	
HC _{COMB} = V x E _{COMB}	3
E _{COMB} : factor de emisión del combustible (tCO ₂ eq/litros). Dato: 2.616 kg CO ₂ /l (IDAE, 2011);	
HC _{ELEC} : HC consumo electricidad de maquinaria (tCO ₂ eq)	
HC _{ELEC} = (Pot x TU) x E _{ELEC}	4
E _{ELEC} : factor de emisión del mix energético (kg CO ₂ /kWh). Dato: 0.248 kg CO ₂ /kWh (REE 2014).	

Tabla 3. Resumen de ecuaciones para el cálculo de HC. Fuente: Elaboración de las autoras a partir de Alba-Rodríguez et al., 2017.

de que fusiona información de varias bases de datos internacionales de la industria de la construcción (Martínez-Rocamora Solís y Marrero, 2016a). Con el fin de obtener las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en t CO₂ eq, se analiza el Inventario de Ciclo de Vida de los materiales, empleando la metodología IPCC 100a incluida en la herramienta Simapro, la cual estima la cantidad de GEI para 100 años de ciclo de vida (Figura 1); y para estimar la HC se aplica la ecuación 1 expuesta en la Tabla 3. Esta metodología para el cálculo del impacto del material toma en cuenta la energía y las emisiones durante el ciclo de vida, desde la cuna hasta el sitio de construcción respectivo, lo que, por tanto, incluye su transporte. Este último se define para las distancias promedio recorridas por cada familia de materiales.

Maquinaria.

Se analiza, en ese punto, la HC provocada por la utilización de maquinaria, concretamente por su consumo de energía (tanto de combustible como eléctrica), vinculándola con la potencia de su motor. Por un lado, se calcula el consumo con la ecuación 2 y, por otro, la HC del consumo de combustible fósil a partir de la ecuación 3 (Tabla 3).

Para determinar el consumo de la maquinaria eléctrica utilizada en obra se sigue un camino similar, analizando la

potencia de motor y las horas de utilización, lo que permite definir los kWh totales consumidos. A este dato se le aplica el coeficiente que indica las emisiones de CO₂eq generadas para la producción de un kWh de energía por el sistema eléctrico del país (ecuación 4) (Marrero, y Freire, 2015).

Residuos de construcción y demolición (RCD).

Los RCD son los restos, desperdicios o productos de demolición de los materiales de la obra. En consecuencia, no tendrán HC por sí mismos ya que esta fue contabilizada en la entrada de materiales. En su lugar, sí será necesario un gasto imputable a los RCD, de horas de maquinaria y mano de obra, necesarias para el acopio y retirada al vertedero.

ESTUDIO DE CASOS

DESCRIPCIÓN DE LOS EDIFICIOS ESTUDIADOS

Se presenta el estudio de dos casos prácticos para edificios de uso público con altos porcentajes de huecos en sus fachadas. Ambos casos se sitúan en la ciudad de Lisboa, Portugal. El primero de ellos (Figura 2) corresponde a un edificio de oficinas administrativas y el segundo (Figura 3) es un edificio destinado a aulas de estudios y gabinetes; ambos de uso público. Las características de los inmuebles analizados, se recogen en la Tabla 4.



Figura 2. Edificio público de Lisboa, caso de estudio 1. Fuente: Elaboración de las autoras.



Figura 3. Edificio de gabinetes y aulas de Lisboa, caso de estudio 2. Fuente: Elaboración de las autoras y fotos aéreas de Google Maps.

	Caso de estudio 1	Caso de estudio 2
Superficie construida	17.400 m ²	4.677,8 m ²
Plantas	4	2
Sótanos	1	2
Superficie de vidrios	1.731,95 m ²	444,6 m ²
Marcos de ventanas	Acero inox. Con RPT	Aluminio lacado sin RPT
Vidrios iniciales	8+14+5+5AR bajo emisivo y control solar; U=1,1 W/m ² °K.	6+12+4 Climalit; U=2,82 W/m ² °K.
Vidrios mejorados equivalentes	8+14+8+8AR bajo emisivo y control solar; U=1,0 W/m ² °K.	6+14+6 Climalit U=2,7 W/m ² °K.
Películas de control solar del estudio	Lámina exterior A	Lámina interior B

Tabla 4. Características de los casos de estudio. Fuente: Elaboración de las autoras.

Con respecto al examen de la energía operativa, se realizó un análisis del rendimiento energético de ambos edificios, con y sin película de control solar, a través de modelos numéricos calibrados en el programa de simulación energética EnergyPlus. Los resultados obtenidos revelaron que las películas de control solar aplicadas por el exterior y por el interior del acristalamiento reducen las necesidades útiles con refrigeración durante el período de verano y aumentan las necesidades útiles con calefacción y las necesidades de energía primaria con iluminación durante el invierno. La película de aplicación por el exterior (caso de estudio 1) y por el interior (caso de estudio 2), redujo las necesidades de energía útil sobre un 54-59% y un 25-46%, respectivamente.

El uso de películas de control solar disminuye el pico de temperatura de espacios interiores con acristalamiento orientado al sur, localización de mayor incomodidad térmica, en ambos casos entre 12,4°C y 11,2°C, respectivamente, en el día de temperatura media diaria más elevada en la estación de verano.

FASES ESTUDIADAS Y DURACIÓN DE LAS MISMAS

Se establece la hipótesis de que la duración de las obras de construcción para ambos edificios será de un año. La fase de uso se inicia en el año siguiente. Para la estimación de la HC en la fase del uso del edificio, se tendrá en cuenta los consumos de recursos producidos por las tareas de limpieza y mantenimiento (Martínez-Rocamora, Solís y Marrero, 2016b). En la fase de uso, se diferencian dos períodos: el pre-renovación y el post-renovación. En este estudio, ya que el objetivo es llevar a cabo una comparativa entre la mejora de los vidrios con la implantación de películas de control solar frente a la sustitución de ventanas, las obras de renovación que se plantean en el CVE son exclusivamente las referentes a los huecos, con el fin de eliminar otras variables que pudieran distorsionar los resultados. Además de ello, y teniendo en cuenta que la vida útil de las ventanas

rondan los 30-50 años, el periodo a analizar será de 50 años, puesto que se entiende que después del transcurso de los mismos, la funcionalidad de las ventanas entrarían en obsolescencia, motivando la sustitución de las mismas. Llegados a esta etapa de la vida del edificio, y una vez que se plantea la sustitución de las ventanas, el uso continuado de las películas no estaría justificado, porque obviamente en la renovación de los huecos se instalarían unas ventanas que proporcionarían la eficiencia energética necesaria para el edificio. En cuanto a la vida útil de las películas de control solar, los fabricantes la establecen en 10 años, por lo que las reposiciones serán realizadas 3 veces durante el periodo estudiado. En la Figura 4, se muestra de forma esquemática dicho periodo.



Figura 4: Línea de tiempo: fases e intervenciones en el periodo estudiado. Fuente: Elaboración de las autoras.

RECURSOS ANALIZADOS

En los análisis efectuados, para eliminar la variante de mejora en la eficiencia energética del edificio por el cambio de ventanas y, por ende, del ahorro de emisiones que se podría generar al medioambiente, se opta por calcular la ventana equivalente (según las propiedades térmicas y lumínicas) a las que se obtienen al implantar las películas de control solar a las ventanas existentes. Es decir, que las condiciones lumínicas y térmicas en el interior del edificio serán las mismas si se colocan las películas de control solar que si se ejecutan las obras de sustitución de las ventanas. Los recursos tenidos en cuenta para cada propuesta de

colocación de láminas		sustitución de ventanas	
0,356 h	Personal colocador	1,02 m2	Demolición de ventana existente
3 m2	Alquiler de andamio en fachada	0,3 h	Personal colocador
1 m2	Limpieza de ventana	1 m2	Ventana abatible RPT
1 m2	Lámina de control solar	1,02 m2	Recibido de cercos
2 u	Material complementario	1 m2	Acristalamiento B.E y C. Solar

Tabla 5. Recursos por m2 para las propuestas de renovación. Fuente: Elaboración de las autoras a partir de BCCA y datos de fabricantes.

		CASO DE ESTUDIO 1	CASO DE ESTUDIO 2
Construcción (Solís, Rivero y Alba, 2018)	HC (t CO ₂ eq) Año 1	10431,30	2578,60
	Maquinaria (h/m ²)	9,48E-05	9,59E-05
	HC (t CO ₂ eq/m ²)	0,6	0,55
	Presupuesto (€/m ²)	903,5	775,04
Limpieza y mantenimiento (Alba-Rodríguez et al., 2017), y (Martínez-Rocamora Solís y Marrero, 2016b),	HC (t CO ₂ eq) Años 2-50	6367,17	1711,74
	HC (t CO ₂ eq/año)	127,34	34,23
	HC (t CO ₂ eq/m ² /año)	0,007	0,007
	Presupuesto (€/m ² /año)	146,31	146,31
Renovación A (sustitución de ventanas)	HC (t CO ₂ eq) Año 20	75,00	17,44
	HC (t CO ₂ eq/renovación)	75,00	17,44
	HC (t CO ₂ eq/m ² /renovación)	0,0043	0,0037
	Presupuesto (€/m ² /renovación)	210,31	171,28
Renovación B (mejora con películas de c. solar)	HC (t CO ₂ eq) Años 20, 30 y 40	22,01	5,09
	HC (t CO ₂ eq/renovación)	7,336	1,70
	HC (t CO ₂ eq/m ² /renovación)	0,00042	0,00036
	Presupuesto (€/m ² /renovación)	62,75	57,50

Tabla 6. Comparativa de HC resultante del estudio. Fuente: Elaboración de las autoras.

renovación en el cálculo del impacto ambiental con HC, según el modelo descrito anteriormente, se exponen en la Tabla 5.

RESULTADOS

La Tabla 6 muestra los resultados de HC y el presupuesto económico para tres de las fases del CVE, focalizándose en las partidas de obras y actividades que mayor impacto ocasionan. Todos los valores son extrapolados a la superficie edificada con el fin de poder comparar los resultados, lo cual facilitará su gestión y control. Los datos obtenidos del impacto de la fase de construcción han sido obtenidos a través de la herramienta OERCO2 (Solís, Rivero y Alba, 2018); y, para la fase de limpieza y mantenimiento, se han

extrapolado los valores obtenidos en Alba-Rodríguez et al. (2017) y Martínez-Rocamora, Solís y Marrero (2016b) -trabajos previos del grupo ARDITEC-, debido a que, según los objetivos fijados en esta investigación, no existen diferencias entre los recursos necesarios para la limpieza y el mantenimiento de ventanas con o sin láminas adheridas. Los impactos resultantes de los análisis de ambas renovaciones se muestran en la Tabla 6.

Centrándose en el objetivo principal de la investigación, es posible evidenciar que la propuesta de colocación de películas de control solar con respecto a la de ventanas, en ambos casos de estudio, representa una disminución de emisiones de alrededor de un 70% respecto a la sustitución de las ventanas (ver Figura 5). Aunque la propuesta de la mejora con películas de control solar precise de mayor

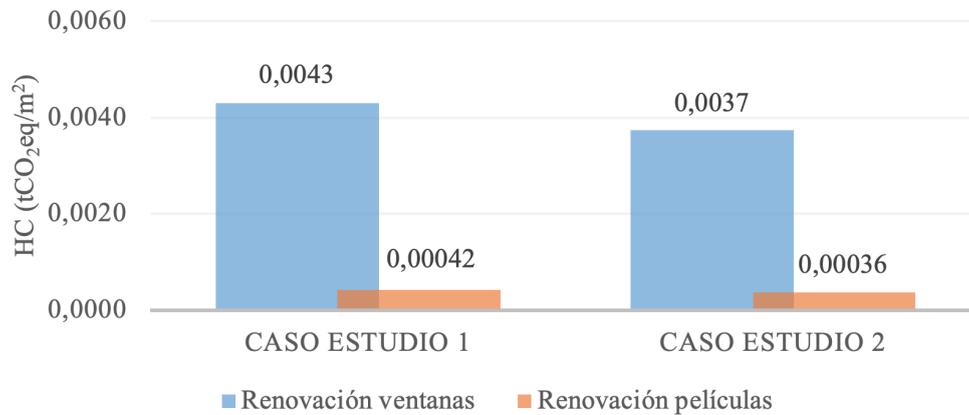


Figura 5. Comparativa del impacto ambiental de las propuestas de renovación energética estudiada. Fuente: Elaboración de las autoras.

frecuencia en las reposiciones de su mantenimiento por tener una vida útil menor a las ventanas, esto se ve compensado por el bajo impacto de las mismas por superficie instalada. Por lo tanto, se puede afirmar que, para el caso planteado, la propuesta de la renovación con películas de control solar, logra aportar mejoras en la eficiencia energética y en el confort interior del edificio, optimizando así el impacto ambiental y económico.

Dado que el análisis se realiza para la mitad del CVE (50 años), el impacto de la construcción es el de mayor en HC, representando este sobre el 60% de tal impacto, y el 40% restante estaría motivado por las labores necesarias en la fase de uso (Figura 6).

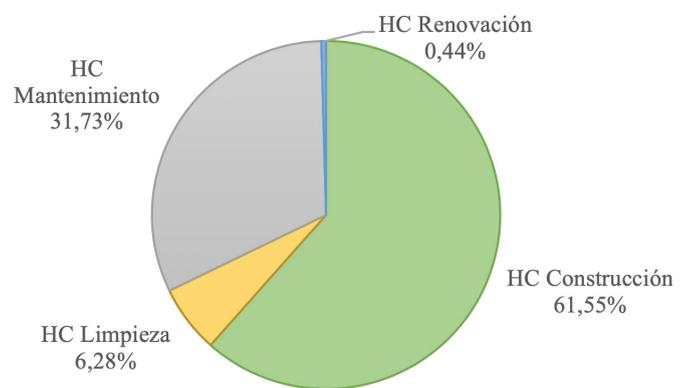


Figura 6. Distribución del impacto ambiental en el periodo de CVE analizado. Fuente: Elaboración de las autoras.

CONCLUSIONES

A partir de la investigación aquí expuesta, se ha podido comprobar la viabilidad del modelo desarrollado para su uso en análisis comparativos para la selección de propuestas en las obras de rehabilitación energética de edificios, desde la perspectiva de la energía y emisiones incorporadas en las soluciones constructivas, así como su adaptación internacional.

La diferencia de superficie vidriada de fachada, en los estudios de casos, no es significativa en los resultados. Los análisis de CVE efectuados arrojan resultados favorables en cuanto a la mejora de las ventanas con las películas de control solar, frente a la sustitución de ventanas, desde el punto de vista de impacto ambiental de los materiales y la maquinaria empleados en las actuaciones de renovación.

Asimismo, los resultados en el análisis de CVE, en ambos casos de estudio, arrojan resultados favorables en el uso de las películas de control solar frente a la sustitución de ventanas, como medida de mejora de la eficiencia

energética de edificios: efectivamente, las emisiones son inferiores en un 70% con respecto a las que generan la sustitución de las ventanas.

El modelo y la metodología planteados dan respuesta sobre cuál es la mejor opción, tanto a nivel económico como ambiental, cuando se trata de optimizar las características térmicas y lumínicas las ventanas. La implantación con películas de control solar, aun precisando más reposiciones durante la vida del edificio, representa un ahorro en emisiones incorporadas en comparación con la sustitución de la ventana completa. En el presente análisis de ACV, la colocación de las películas por el interior o exterior no influye significativamente. Esto es debido a que la cantidad de recursos materiales y de maquinaria empleados para la colocación no varía, hallándose la diferencia en el tiempo de mano de obra necesaria (mayor para la instalación por el exterior). De igual modo, el ítem de mano de obra no es cuantificado en la metodología, ya que así se indica en la normativa UNE-EN ISO 15798 de ACV en los edificios

(Asociación Española de Normalización y Certificación, 2012). Por el contrario, las simulaciones energéticas realizadas en los casos de estudio, devuelven mejores resultados cuando las láminas son colocadas por el exterior. Será necesario continuar con los trabajos de simulaciones energéticas en ambos casos de estudio y seguir experimentando en investigaciones futuras, para determinar las mejoras en la eficiencia energética en distintas orientaciones y colocación de diversas láminas, así como monitorizar los espacios con el propósito de obtener las diferencias reales de consumos.

La metodología establecida en el presente estudio proporciona directrices para los diseñadores y constructores de proyectos que busquen el equilibrio entre la influencia del presupuesto económico y el ambiental en el CVE; y, consecuentemente, la incorporación en la toma de decisiones del impacto ambiental que las diversas soluciones generan.

AGRADECIMIENTOS

La autora Cristina Rivero agradece la ayuda recibida para la realización de la estancia que ha posibilitado los análisis presentados, siendo financiada por una beca del V Plan propio de la Universidad de Sevilla. La autora Júlia Pereira desea agradecer el apoyo de FCT (Fundación para la Ciencia y la Tecnología) PhD Grant FCT PD / BD / 127848/2016.

Se agradece también al Instituto Superior Técnico de la Universidade de Lisboa, por la acogida para el desarrollo del trabajo, y a las empresas colaboradoras de vidrios y películas de control solar que han cedido los datos de sus productos para este estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBA RODRÍGUEZ, M^a Desirée; GONZÁLEZ VALLEJO, Patricia; MARTÍNEZ ROCAMORA, Alejandro; FERREIRA SÁNCHEZ, Antonio y MARRERO, Madelyn. Building Rehabilitation Versus Demolition and New Construction: Economic and Environmental Assessment, *Environmental Impact Assessment Review*, 2017, vol. 66, pp. 115-126.

ÁLVAREZ, G., JIMÉNEZ, D. y C. ESTRADA, C. Thermal performance of solar control coatings: a mathematical model and its experimental verification, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1998, vol. 31, pp. 2249-2257.

ÁLVAREZ, G., FLORES, J. y CORTINA, C. Heat transfer through a duovent glass with chemically deposited solar control coating. En: *ISES Solar World Congress*, II, 1999, pp. 199-204.

ARUP y CONSEJO EMPRESARIAL MUNDIAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE (CEMDS): *Material choice for green buildings*, 2012.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. *Sostenibilidad de las obras de construcción. Evaluación del desempeño ambiental de los edificios. Método de cálculo*. UNE-EN 15978, 2012.

CONSEJERÍA DE OBRA PÚBLICA Y VIVIENDA DE LA JUNTA DE ANDALUCÍA. *Base de Costes de la Construcción en Andalucía. BCC* [en línea]. [Consultado 17 julio 2018]. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/fomentoyvivienda/portal-web/web/areas/vivienda/texto/7a0899c8-0038-11e4-8cc4-27ee69a25823>

FREIRE GUERRERO, Antonio; MUÑOZ MARTÍN, Javier y MARRERO MELÉNDEZ, Madelyn. Incorporación de huella de carbono y huella ecológica en las bases de costes de construcción. Estudio de caso de un proyecto de urbanización en Écija, España, *Hábitat Sustentable*, 2016, vol. 6, n.º 1, pp. 6-17.

INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA - IDAE. *Factores de conversión a Energía Primaria y factores de emisión de CO2*, 2011. Madrid: IDAE, 2011.

JARA, Jazmín. Protecciones solares y su implicancia en la demanda energética: caso edificio público en Concepción, Chile, *Hábitat Sustentable*, 2013, vol. 3, n.º 1, pp. 47-61.

KUCHEN, Ernesto; PLESSER, Stefan y FISCH, Manfred Norbert. Eficiencia Energética y Confort en Edificios de Oficina: el Caso Alemán, *Hábitat Sustentable*, 2012, vol. 2, n.º 2, pp. 34-44.

LOURENÇO, David. Estudo experimental do desempenho de envidraçados com películas de controlo solar. dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil intitulada – DECivil, IST, 2016.

LOURENÇO, David; GOMES, M. Gloria; MORET RODRIGUES, A. Monitorização do desempenho de envidraçados com películas de controlo solar num período de inverno/meia estação, *Revista TechITT*, 2017, vol. 15, n.º 40, pp.4-14.

MALMQVIST, Tove y GLAUMANN, Mauritz. Environmental efficiency in residential buildings - A simplified communication approach, *Building and Environment*, 2009, vol. 44, n.º 5, pp. 937-947.

MARRERO, Madelyn; FONSECA, Antonio; FALCON GANFORNINA, Raúl Manuel y RAMÍREZ DE ARELLANO AGUDO, Antonio. Schedule and Cost Control in Dwelling Construction Using Control Charts, *The Open Construction and Building Technology Journal*, 2014, vol. 8, pp. 63-79.

MARRERO, Madelyn y FREIRE GUERRERO, Antonio. Evaluación a través del presupuesto de la energía incorporada al proyecto de edificación, *Hábitat Sustentable*, 2015, vol. 5, n.º 1, pp. 54-63.

MARTÍNEZ ROCAMORA, Alejandro; SOLÍS GUZMÁN, Jaime y MARRERO, Madelyn. Toward the Ecological Footprint of the use and maintenance phase of buildings: Utility consumption and cleaning tasks, *Ecological Indicators* [en línea], 2016a, vol. 69, pp. 66-77. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.04.007

MARTÍNEZ ROCAMORA, Alejandro; SOLÍS GUZMÁN, Jaime y MARRERO, Madelyn. LCA databases focused on construction materials: A review, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016b, vol. 58, pp. 565-573.

PEREIRA J. *Simulação energética de películas em envidraçados*. dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil intitulada – DECivil, IST, 2015.

RAMÍREZ-DE-ARELLANO AGUDO, Antonio. *Presupuestación de obras*. Sevilla: Secretariado de la Universidad de Sevilla, 2010.

RAMÍREZ-DE-ARELLANO AGUDO, Antonio y MARRERO, Madelyn. The building cost system in Andalusia: application to construction and demolition waste management, *Construction Management and Economics*, 2010, vol. 8, n° 5, pp.495-507.

RED ELÉCTRICA ESPAÑOLA - REE. *El sistema eléctrico español*. Madrid: REE, 2014.

REGLAMENTO UE 2018/841 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO DE 30 de mayo de 2018, sobre la inclusión de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero resultantes del uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra y la silvicultura en el marco de actuación en materia de clima y energía hasta 2030, y por el que se modifican el Reglamento (UE) n.º 525/2013 y la Decisión n.º 529/2013/UE.

RIVERO CAMACHO, Cristina; MUÑOZ SANGUINETTI, Claudia y MARRERO, Madelyn. Cálculo de la Huella Ecológica en el ciclo de vida para la fase de urbanización de un conjunto habitacional en Chile, bajo el modelo ARDITEC. *Intersecciones 2017. II Congreso Interdisciplinario de Investigación en Arquitectura, Diseño, Ciudad y Territorio*. Santiago de Chile: ARQ Ediciones, Universidad Católica, 2018, pp. 82-99.

RONGXIN Yin; PENG Xu y PENGYUAN Shen. Case study: Energy savings from solar window film in two commercial buildings in Shanghai. *Energy and Buildings*, 2011, vol. 45, pp. 132-140.

RUBIN, Michael. Calculating heat transfer through Windows, *Energy Research*, 1982, vol. 6, pp. 341-349.

SOLÍS-GUZMÁN, Jaime; MARRERO, Madelyn y RAMÍREZ-DE-ARELLANO, Antonio. Methodology for Determining the Ecological Footprint of the Construction of Residential Buildings in Andalusia (Spain), *Ecological Indicators*, 2013, vol. 25, pp. 239-249.

SOLÍS-GUZMÁN, Jaime; MARTÍNEZ-ROCAMORA, Alejandro y MARRERO, Madelyn. Methodology for determining the carbon footprint of the construction of residential buildings. *Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors*, Springer, 2014, vol. 1, pp. 49-83.

SOLÍS-GUZMÁN, Jaime; RIVERO CAMACHO, Cristina; ALBA RODRÍGUEZ, Mª Desirée y MARTÍNEZ ROCAMORA, Alejandro. Carbon Footprint Estimation Tool for Residential Buildings for Non-Specialized Users: OERCO2 Project, *Sustainability* [en línea], 2018, vol. 10, n° 1359. DOI: 10.3390/su10051359

WORLD WIDE FUND NATURE - WWF, 2010. *Comparecencia de la Ministra de Vivienda en la Comisión Mixta de Cambio Climático el 22 de septiembre de 2009. Potencial de ahorro energético y de reducción de emisiones de CO2 del parque residencial existente en España en 2020*. Informe WWF, diciembre, 2010.

ZABALZA-BRIBIÁN, Ignacio; VALERO-CAPILLA, Antonio y ARANDA-USÓN, Alfonso. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential, *Building and Environment*, 2011, vol. 46, n° 5, pp. 1133-1140.



HERRAMIENTA PARA LA ESTIMACIÓN DE COSTES ECONÓMICOS Y AMBIENTALES EN EL CICLO DE VIDA DE EDIFICIOS RESIDENCIALES. FASE DE CONSTRUCCIÓN

A TOOL FOR ESTIMATING ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL COSTS
IN THE LIFE CYCLE OF RESIDENTIAL BUILDINGS: THE CONSTRUCTION
STAGE.

PATRICIA GONZÁLEZ VALLEJO

Doctora

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación (ETSIE),

Universidad de Sevilla. Sevilla, España

<https://orcid.org/0000-0002-3106-0837>

patriciagonzalezvallejo@gmail.com

RESUMEN

Este trabajo presenta una herramienta para predecir los impactos económicos y ambientales del ciclo de vida de edificios de tipo residencial en fase de diseño, partiendo de un proyecto arquitectónico, del presupuesto del proyecto, de las bases de costes de la construcción, en particular, las de Andalucía y del indicador huella ecológica. La herramienta propone alternativas en el uso de recursos (materiales, mano de obra y maquinaria) y sistemas constructivos, pudiendo formar parte en la toma de decisiones para mejorar el impacto del ciclo de vida del edificio. Se analiza un caso concreto de edificio residencial de diez plantas sobre rasante y se obtienen los recursos empleados y su impacto económico y ambiental a nivel global y de forma pormenorizada, según las fases del proyecto. Los materiales son el recurso de mayor importancia y, específicamente, el hormigón o el cerámico son los que producen mayor impacto. Se realiza un análisis de sensibilidad, en el que se proponen diferentes alternativas de materiales para una solución constructiva y se obtienen los datos para decidir la opción más viable económica y ambientalmente. La herramienta es de fácil manejo para el usuario y puede ser base para la certificación de edificios y el desarrollo de valores estándares a emplear en políticas gubernamentales.

Palabras clave

herramienta, ciclo de vida del edificio, impacto económico, impacto ambiental, huella ecológica, bases de costes de la construcción, edificios residenciales.

ABSTRACT

This article presents a tool to predict the economic and environmental impacts of the life cycle of residential buildings in the design phase based on an architectural project; the project's budget; construction costs databases, in particular those of Andalucía, Spain; and the ecological footprint indicator. The tool proposes alternatives in resource use (materials, manpower and machinery) and construction systems, as these can be used in decision making to improve the impact of the building's life cycle. The case of a specific ten-floor residential building is analyzed, including the resources used and their general and specific economic and environmental impacts according to the stages of the project. The materials were found to be the resource of greatest importance, with the concrete or ceramic in particular producing the greatest impact. A sensitivity analysis was carried out in which different material alternatives were proposed for a building solution, and data was obtained to decide on the most economically and environmentally viable option. The tool is easy to use and can be the basis for building certification and the development of standard values for use in government policies.

Keywords

tool, building life cycle, economic impact, environmental impact, ecological footprint, construction cost databases, residential buildings.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento resultante de la gran cantidad de estudios sobre el impacto ambiental se refleja finalmente en la generación de herramientas de cálculo, normalmente orientadas a la certificación ambiental de edificios. El desarrollo de este tipo de herramientas se ha visto reforzado en los últimos años debido a la necesidad de crear políticas medioambientales para los edificios que permitan medir esa sostenibilidad. Actualmente, hay una serie de herramientas en España creadas a partir de proyectos de investigación que calculan la huella de carbono de los edificios. LEED y BREEAM son los instrumentos internacionales más utilizados y en España están gestionados por el Spain Green Building Council («SpainGBC VERDE tool website Available online» 2018) y BREEAM Spain («BREEAM.ES website Available online» 2018), respectivamente. Estos evalúan varios aspectos con el fin de obtener un puntaje final, como el de las emisiones de CO₂ generadas por la fabricación de los materiales de construcción empleados y la energía consumida en la fase operativa del edificio. A nivel nacional, SpainGBC presenta la herramienta VERDE que asigna el porcentaje de puntaje más alto (~ 25%) a las emisiones de gases de efecto invernadero. Por otro lado, están las herramientas de certificación energética, como CE3, CE3X, CERMA («Ministerio de energía turismo y agenda digital. Certificación eficiencia energética de edificios (Ministry of energy, tourism and digital agenda. Energy efficiency certification of buildings).» 2018) y la unificada LIDER-CALENER («Spain MPW Unified Tool LIDER-CALENER Available online» 2018), desarrolladas por asociaciones y universidades españolas. También existen varias plataformas más especializadas que permiten el cálculo detallado de las emisiones de CO₂ de los recursos, en función de la relación de cantidades definidas por un proyecto, como la base de datos de costes BEDEC («ITeC BEDEC website Available online» 2013), desarrollada por el Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña y cuyos datos medioambientales provienen de la base de datos Ecoinvent ACV (Ecoinvent centre 2016), conocida, a su vez, por ser una de las más completas a nivel europeo [63] y por su integración con el software Simapro ACV («PRé Sustainability SimaPro 8 Available online» 2018).

Para determinar el impacto ambiental, se pueden aplicar diversas metodologías al sector de la construcción; actualmente, la tendencia es la de usar las más simples. Así, las huellas ecológica (HE) (Wackernagel y Rees, 1996) y la de carbono (HC) (Weidema *et al.*, 2008) son las más empleadas: los resultados que producen son entendibles por la sociedad no científica y son de fácil aplicación para la toma de decisiones y en políticas medioambientales (Bare *et al.* 2000). El indicador HE se usa cada vez más para cuantificar el crecimiento de las ciudades y controlar sus efectos, y cada vez más investigadores desarrollan modelos para ello (Lu y Chen, 2017; Yang y Hu, 2018). Destacan, en tal sentido, los estudios de Bastianoni *et al.* (2007), Li y Cheng (2010), Solís Guzmán, Marrero y Ramírez de Arellano (2013) y Teng y Wu (2014), que han elegido el

indicador HE para evaluar las peculiaridades del sector de la construcción.

Algunos autores evalúan los materiales empleados en la construcción de los edificios a través de indicadores que generalmente siguen la metodología del ACV (S. Lasvaux, N. Schiopu, J. Chevalier 2012; «UNE-EN ISO 14020 Environmental labels and declarations - General principles» 2002; F. García-Erviti, J. Armengot-Paradinas 2015), así como la de emisiones de CO₂ o de energía del ciclo de vida del edificio (CVE) (Chau, Leung y Ng, 2015) (cuyas conclusiones sobre las fases suelen coincidir). La fase de construcción se concentra en un corto período de tiempo (1-2 años), sin embargo, las decisiones tomadas durante la misma influyen en gran medida en los resultados para el resto del CVE. La fase de operación es habitualmente responsable del 80% al 90% de las emisiones de CO₂ generadas durante el CVE (Radhi y Sharples, 2013), y casi el 60% de la cual es causada por la demanda de energía para calefacción y aire acondicionado (You *et al.*, 2011). El presente trabajo expone una herramienta para evaluar el impacto económico y ambiental en el CVE, centrado en las fases de fabricación de materiales y construcción, a partir de los datos del presupuesto del proyecto, de las bases de costes de la construcción y del indicador HE. Se pretende que la herramienta sea robusta, flexible y de fácil manejo, de manera que se el indicador HE pueda ser incluido en la certificación de edificios, ya que ninguno de los instrumentos certificadores se lo considera.

Para obtener el impacto económico en cuestión, se utilizan las bases de costes de la construcción las cuales emplean Sistemas de clasificación de la información de la construcción (SCIC) (Marrero y Ramírez de Arellano Agudo, 2010). En España, existen varias bases de costes de la construcción, generalmente desarrolladas según las comunidades autónomas, como son PREOC de Madrid, ITEC de Cataluña, PRECIOCENTRO de Guadalajara o BCCA de Andalucía. La herramienta aquí propuesta utiliza la de Andalucía (BCCA), la cual tiene una estructura estable, flexible y consolidada. La fortaleza de los SCIC y la BCCA radica en que son capaces de dividir en partes una unidad compleja, como es la construcción de un edificio, para luego ir agregándolas y conformar el total. Otros autores llevan a cabo el ACV y el análisis del coste del ciclo de vida (CCV), y, a partir de ambos, efectúan un estudio completo de la edificación. Recientemente, se están desarrollando diversas herramientas y webs con este enfoque de análisis económico y ambiental (Khan *et al.* 2018; Sesana y Salvalai 2013; Vasquez Palacios y Quesada Molina 2017) it is essential to fetch investor's attention towards more development of green buildings through automated tools for the construction projects. Though, historical dearth is found on the automation of green building rating tools that brings up an essential gap to develop an automated analog computerized programming tool. This paper present a proposed research aim to develop an integrated web-based automated analog computerized programming that applies green building rating assessment tool, green

technology and life cycle cost analysis. It also emphasizes to identify variables of MyCrest and LCC to be integrated and developed in a framework then transformed into automated analog computerized programming. A mix methodology of qualitative and quantitative survey and its development portray the planned to carry MyCrest-LCC integration to an automated level. In this study, the preliminary literature review enriches better understanding of Green Building Rating Tools (GBRT, destacando la importancia de su empleo en la fase de diseño para proyectar edificios más eficientes según el impacto económico y ambiental, y desmitificando el aumento de coste de un edificio más ecológico. Islam, Jollands y Setunge (2015), por ejemplo, realizan una revisión evaluando y comparando el ACV y CCV de edificios residenciales, para después aplicar dicho análisis a un caso en Australia. Con ese propósito, emplean la base de datos Ecoinvent (Ecoinvent Centre, 2016), el programa Simapro (PRé Sustainability SimaPro 8 Available online, 2018) y una base de costes de construcción australiana, la que no está disponible de forma abierta y gratuita (Rawlinson, 2009). Al concluir destacan la importancia de ambos análisis, así como de la definición clara de límites y de las hipótesis. También son determinantes la tipología edificatoria, las tecnologías empleadas y el clima.

El presente documento explica, en primer lugar, el funcionamiento de la herramienta planteada, según el análisis del inventario y la evaluación impactos. A continuación, se aplica a un caso concreto: un edificio residencial de diez plantas sobre rasante. Finalmente, se exponen los resultados y conclusiones obtenidos según los diferentes análisis propuestos, que sirven para la toma de decisiones en fase de diseño del edificio y para definir estrategias en torno a la mejora de los impactos económicos y ambientales.

METODOLOGÍA

Para explicar el desarrollo y funcionamiento de la herramienta de evaluación de costes, se sigue la metodología del ACV de los edificios (UNE-EN ISO 14040 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework 2006; UNE-EN ISO 14044 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines, 2006): definición de objetivos y del ámbito de aplicación, análisis de inventario, evaluación de los impactos e interpretación de resultados.

En la presente investigación se actualiza la metodología inicial de HE para la evaluación de la construcción de viviendas desarrollada por Solís-Guzmán, Marrero y Ramírez de Arellano (2013) y por González-Vallejo, Marrero y Solís-Guzmán (2015). La principal diferencia con respecto a la metodología inicial es que los impactos producidos por los recursos (materiales, mano de obra, maquinaria, electricidad y agua) se calculan utilizando

directamente las emisiones de CO₂ en lugar de los datos de energía incorporados (MJ). En el caso de los residuos de construcción y demolición (RCD), se incluye su transporte a la planta de reciclaje, para lo cual se incluyen las hipótesis de transporte de material. La movilidad de los trabajadores se elimina al adaptarse a los estándares de costo del ciclo de vida LCA (UNE-EN ISO 14020 Etiquetas y declaraciones ambientales - Principios generales, 2002). Para el impacto producido por los alimentos de los trabajadores, se aplica la metodología de la GFN (Lazarus et al., 2014). Para los residuos sólidos municipales (RSU), se aplican los datos por persona por año en el país en estudio y las emisiones correspondientes, en lugar de hacer suposiciones sobre el tipo de RSU generado en el sitio de construcción. Con el objetivo de obtener el consumo de energía en la obra, se emplean datos empíricos. Finalmente, el impacto del agua se asume como generado por la energía necesaria para su suministro (antes se contabilizaba como HE de los bosques y ahora es HE de energía). Además, la metodología ha sido refinada y sistematizada, lo que permite el desarrollo de estándares de construcción eco-eficientes capaces de lograr la certificación de sostenibilidad.

DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ÁMBITO DE APLICACIÓN.

El objetivo principal es obtener una herramienta para predecir los impactos económicos y ambientales del CVE en fase de diseño, planteando alternativas de mejora en la gestión de recursos: materiales más ecológicos, maquinaria más eficiente, optimización de la mano de obra y planificación de RCD generados.

Como objetivos secundarios, se plantea que la herramienta desarrollada sirva para cuantificar recursos, residuos y emisiones generados y para evaluar el proyecto de forma pormenorizada desde la fase de diseño.

La herramienta se centra en edificios residenciales, en las fases de extracción y fabricación de materiales y en la construcción del edificio. Se considera que la parcela está preparada para ejecutar la obra, por lo que no se contabilizan las obras de urbanización. Se tendrán en cuenta las instalaciones provisionales de acometidas de agua, saneamiento y electricidad. Se incluye el transporte del material de la fábrica a la obra y de los residuos de construcción y demolición (RCD) a la planta gestora. En la fase de construcción, se evalúa el impacto de los trabajadores según el consumo de alimentos y la producción de residuos sólidos urbanos (RSU), el impacto producido por la maquinaria empleada, alimentada por combustible o electricidad, el consumo de electricidad y agua durante la obra y la superficie ocupada. Los impactos según el indicador HE se contabilizan por año.

Se evalúan, asimismo, los impactos producidos tanto por los recursos incluidos en el presupuesto de ejecución material de la obra (PEM) o costes directos (CD), como por los procedentes de datos generales o costes indirectos (CI),

Selección de proyecto					
Características	Opciones				
Núm. plantas sobre rasante:	1	2	3	4	5 o más
Núm. plantas bajo rasante:	0		1		2
Cimentación:	Zapatillas aisladas		Zanja corrida	Losa armada	Pilotes
Estructura:	Muros de carga de fábrica de ladrillo			Hormigón armado	
Cubierta:	Horizontal			Inclinada	
Uso en planta baja:	Viviendas			Locales comerciales	

Tabla 1. Selección de tipología de proyecto en la herramienta según tipología y características principales. Fuente: González-Vallejo et al. (2015).

que son aquellos recursos de la obra que no se atribuyen a una tarea en concreto (grúa, andamios, técnicos de obra, etc.); y se incluyen los datos de instalaciones provisionales como son las acometidas de instalaciones, casetas de obra y consumos de recursos (energía, agua y personal) asociados a ellas (Marrero y Ramírez de Arellano Agudo, 2010).

ANÁLISIS DE INVENTARIO

- En este punto, se cuantifican todos los flujos energéticos y materiales entrantes y salientes del sistema durante toda su vida útil, los cuales son extraídos o emitidos hacia el medioambiente, para lo cual se emplea el presupuesto de cada proyecto realizado a partir de bases de costes de la construcción.
- Base de costes de la construcción: Se emplea para redactar el presupuesto PEM del proyecto, que incluye un estudio pormenorizado de los recursos empleados y el análisis del inventario propuesto en el ACV para determinar los impactos del edificio. La BCCA (Consejería de Fomento y Vivienda 2016), cuya estructura y clasificación sistemática organiza los precios y sus descompuestos en recursos de materiales, mano de obra y maquinaria (Marrero y Ramírez de Arellano Agudo, 2010; Ramírez de Arellano Agudo, 2004), lo que es utilizado como base del modelo que desarrolla la herramienta.

Proyecto edificatorio: La herramienta cuenta con una base de datos de más de cien proyectos (Ramírez de Arellano Agudo, 1988), los cuales se actualizan a las normativas vigentes (CTE (Ministerio de Vivienda de España, 2006; Gobierno de España, 2008) y RCD) y cuyas principales características se presentan en la Tabla 1. Se trata de la primera selección de datos que se propone en la herramienta.

Mediciones del proyecto: Para la definición del proyecto y estimación de su impacto se necesita cuantificar los recursos empleados a partir de las mediciones que definen el presupuesto. La herramienta propone una medición tipo

Q_i , que se obtiene gracias a métodos estadísticos (Ramírez de Arellano Agudo, 1988) en función de las tipologías de proyectos (González-Vallejo, Marrero y Solís-Guzmán, 2015). Se organizan según la clasificación sistemática de la BCCA, como se define en la Tabla 2, en capítulos, subcapítulos, apartados, grupos y precios unitarios simples, agrupándose de acuerdo a características similares. Los capítulos son el primer nivel de la clasificación (02 Excavaciones, 03 Cimentaciones, 04 Saneamiento, etc.) que, a su vez, se subdividen en subcapítulos (en el caso del capítulo 04: 04C. Redes colgadas; 04E. Redes enterradas, etc.); a continuación, en apartados (en el caso de 04E: 04EA. Arquetas; 04EC. Colectores; 04B. Bajantes, etc.); y, finalmente, en grupos (en el caso de 04EC: 04ECF. Colectores de fibrocemento; 04ECH. Colectores de hormigón; 04ECP. Colectores de PVC, etc.), que son los que incluyen los precios unitarios simples (PUS) (en el caso de 04ECH: 04ECH90002. m. Colector enterrado de hormigón de diámetro 200 mm con recalce, en tierras). Los PUS se componen, a su vez, de precios auxiliares (PA) y precios básicos (PB), que son los correspondientes a la mano de obra, materiales y maquinaria necesarios para ejecutar dicho PUS (Consejería de Fomento y Vivienda, 2016).

Para la actualización de los proyectos, se calculan nuevos Q_i para climatización (en el capítulo 08. Instalaciones: 08CA u. Aparatos climatización y 08CR, m². Radiadores), energía solar (08N: acumuladores, estructuras portantes y captadores solares) y gestión de residuos (capítulo 17), comprendidos en la Tabla 2.

Una de las novedades de la herramienta es la de introducir una serie de desplegables para definir sistemas constructivos, materiales o tipo de maquinaria a emplear, en función de las opciones planteadas, como se especifica en la Tabla 2.

Con el fin de obtener la medición específica del proyecto a evaluar, se aplica la superficie real del caso de estudio a cada Q_i y, así, obtener las cantidades de los recursos totales necesarios (Q), según la ecuación 1:

$$Q = \sum Q_i \cdot S \quad (1)$$

ESTRUCTURA DE LA MEDICIÓN DEL PROYECTO			
Código	Unidad	Concepto	Opciones en despleables
CAPÍTULO 02 EXCAVACIONES			
02E	m ³	Excavaciones	Pala Retroexcavadora
02R	m ³	Rellenos	Medios manuales Medios mecánicos
02T	m ³	Transporte tierras	Medios manuales Medios mecánicos
CAPÍTULO 03 CIMENTACIONES			
03A	kg	Armaduras	-
03P	m	Pilotes	-
03E	m ²	Encofrados	Madera Metálico
03HA	m ³	Hormigones armados zapatas	Vertido manual Vertido grúa Vertido bomba
03HM	m ³	Hormigones masa	-
03H	m ³	Hormigones zunchos	-
CAPÍTULO 04 SANEAMIENTO			
04A	u	Arquetas	In situ (fáb. ladrillo) Prefabricadas
04C	m	Colectores	PVC Hormigón Fibro cemento
04B	m	Bajantes	PVC Cinc Acero Acero galvanizado
CAPÍTULO 05 ESTRUCTURAS			
05AE	kg	Acero estructuras metálicas	-
05F	m ²	Forjados	Bovedillas cemento Bovedillas cerámicas
05HA	kg	Armaduras	-
05HE	m ²	Encofrados	Madera Metálico
05HA	m ³	Hormigones armados	-
CAPÍTULO 06 ALBAÑILERÍA			
06FB	m ²	Fábricas. de bloques	-
06DC	m ²	Distribución tabiquería (cámaras)	-
06DT	m ²	Distribución tabiquería (particiones)	-
06LE	m ²	Fábricas exteriores de ladrillo	-
06LI	m ²	Fábricas interiores de ladrillo	-

CAPÍTULO 07		CUBIERTAS	
07H	m ²	Cubiertas horizontales	Transitables No transitables
07I	m ²	Cubiertas inclinadas	Teja cerámica Teja mortero cemento
CAPÍTULO 08		INSTALACIONES	
08CA	u	Aparatos climatización	-
08CC	m	Conductos	-
08CR	m ²	Radiadores	-
08EC	m	Circuitos	-
08ED	m	Líneas y derivaciones	Bajo tubo: PVC En fábrica ladrillo
08EL	u	Puntos de luz	-
08ET	u	Toma de corriente	-
08EP	m	Conductor de puesta a tierra	-
08FC	m	Canalizaciones agua caliente	Cobre Acero galvanizado
08FD	u	Desagües	-
08FF	m	Canalizaciones agua fría	Cobre Acero galvanizado
08FG	u	Griferías	-
08FS	u	Aparatos Sanitarios	Porcelana Acero
08FT	u	Termos/calentadores	Eléctrico Gas
08NA	u	Acumuladores	-
08NE	u	Estructuras portantes	-
08NO	u	Captadores solares	-
08NP	m	Circuito primario	-
CAPÍTULO 09		AISLAMIENTOS	
09A	m ²	Aislamientos acústicos	Fibra de Vidrio Poliestireno Poliétileno Sintético de alta densidad
09T	m ²	Aislamientos térmicos	Fibra de vidrio Poliuretano Poliestireno Lana mineral

CAPÍTULO 10		REVESTIMIENTOS	
10AA	m ²	Alicatados	Con adhesivo Con mortero
10AC	m ²	Chapados	Piedra artificial Piedra caliza Granito Mármol
10CE	m ²	Enfoscados	-
10CG	m ²	Guarnecidos	Yeso Escayola
10S	m ²	Solados	Cerámico Gres Baldosa hidráulica Tarima madera Mármol Piedra caliza Granito Terrazo
10SS	m ²	Soleras	-
10T	m ²	Techos	Fijación con cañas Fijación metálica
10R	m	Remates	Piedra caliza Madera Baldosa cerámica Mármol
CAPÍTULO 11		CARPINTERÍA Y ELEM. DE SEG. Y PROTECCIÓN	
11CA	m ²	Carpintería acero	-
11CL	m ²	Carpintería ligera	-
11M	m ²	Carpintería madera	-
11MA	m ²	Armarios	-
11MP	m ²	Puertas madera	-
11B	m ²	Barandillas	Acero Alum. Anodizado
11P	m ²	Persianas	-
11R	m ²	Rejas	-
CAPÍTULO 12		VIDRIOS	
12A	m ²	Acrilamientos	-
CAPÍTULO 13		PINTURAS	
13PE	m ²	Pinturas exteriores	Elastómera lisa A la cal
13PI	m ²	Pinturas interiores	Plástica lisa Al temple liso

CAPÍTULO 17 GESTIÓN DE RESIDUOS			
17AH	t	Hierro y acero	-
17HA	m ³	Áridos y piedras naturales	-
17HC	m ³	Cerámicos	-
17HH	m ³	Hormigón, cemento y cal	-
17MM	t	Madera	-
17MP	t	Plásticos y sintéticos	-
17RR	m ³	Residuos mezclados	-

Tabla 2. Definición del proyecto: Clasificación sistemática según criterios de la BCCA y opciones de la herramienta para seleccionar tipo de recursos o sistemas constructivos. Fuente: González-Vallejo (2017).

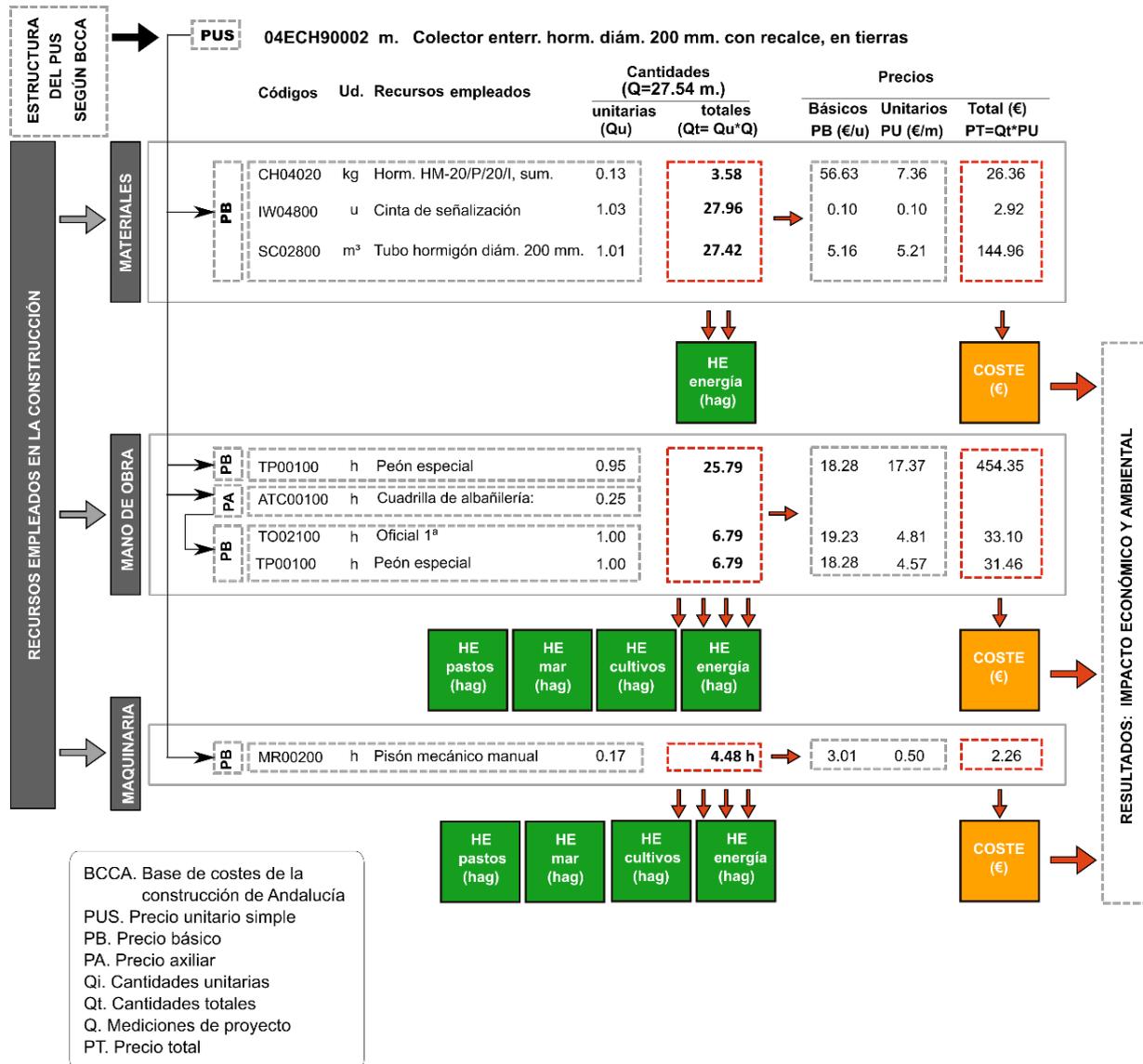


Figura 1. Funcionamiento interno de la herramienta para obtener recursos y definir los impactos. Fuente: González-Vallejo, Muñoz-Sanguinetti y Marrero (2019).

Donde:

Q: medición total de una partida del proyecto

Q_i: medición unitaria de cada partida (u/m²) (unidad de medida de la partida/m² de superficie construida)

S: superficie del proyecto

Cada Q_i va asociado a un precio unitario simple (PUS), del que se obtendrán los recursos totales, en función de la descomposición en PB y PA, los cuales se recopilan para calcular cada una de las huellas parciales que conforman la HE total. Cada recurso produce uno o varios impactos, los que se van agregando para calcular el impacto ambiental total del proyecto. Por otro lado, para definir el impacto económico, se aplica a cada recurso el PB, después se realiza el sumatorio de PB y PA y así se obtiene, en primer lugar, el precio unitario de la partida -04ECH90002, en este caso- y, al aplicar la superficie del proyecto, el total del PUS para ese proyecto. Finalmente, al sumar todas las partidas (PUS) resulta el presupuesto total, como se muestra en la Figura 1.

EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS

Se realiza una clasificación y evaluación de los resultados del inventario, relacionando sus resultados con efectos ambientales observables por medio de un conjunto de categorías de impactos (HE, emisiones de CO₂). La herramienta desarrollada evalúa los impactos ambientales a través de los indicadores HE y HC, siguiendo la metodología HE (Lazarus et al., 2014; Mancini et al., 2016) actualizada por la Global Footprint Network (Global Footprint Network (GFN), 2014) y aplicada a la construcción (Solís-Guzmán, Marrero y Ramírez de Arellano, 2013; González-Vallejo, Marrero y Solís-Guzmán, 2015). Este método se ha ido implementando a las distintas fases del CV del edificio (Alba-Rodríguez et al. 2017; Martínez-Rocamora, Solís-Guzmán y Marrero 2017; González-Vallejo et al., 2015a) y se resume a continuación:

- Metodología HE para la construcción edificios

Como se ha definido al inicio del trabajo, la metodología HE se ha actualizado para adaptarse a los criterios del ACV(UNE-EN ISO 14040 Environmental management, 2006) y de la GFN (Global Footprint Network, 2014).

La metodología define las fuentes de impactos de los recursos y consumos de energía del CV del edificio definiendo cada una de las huellas parciales que estos producen. Se ilustran, en la Tabla 3, los factores de equivalencia de cada tipo de terreno productivo y de absorción de emisiones de CO₂ específicos de la metodología HE (Lazarus et al., 2014), que se emplean en cada una de las huellas parciales.

Electricidad y agua consumida en obra: en la estimación del consumo de electricidad, se necesita los datos de consumos previstos C_{me} para la obra.

Símbolo	Descripción
A _b	Factor de absorción de bosques (3.59 t CO ₂ /ha/año)
A _o	Reducción de emisiones por la CO ₂ absorción de los océanos 0.28 (28%)
FE _b	Factor de equivalencia de los bosques (1,26 hag/ha)
FE _{ac}	Factor de equivalencia de tierra de absorción de carbono (1.26 hag/ham)
FE _s	Factor de equivalencia de superficie consumida (1,26 hag/ha)

Tabla 3. Factores específicos de la metodología HE (Global Footprint Network (GFN), 2014).

Las fuentes de impactos son: para la electricidad según el cálculo de los CI (Ecuación 2): casetas de obra, iluminación, maquinaria y prueba de instalaciones (Freire Guerrero y Marrero 2015). De igual modo, se requieren las emisiones de CO₂ de la electricidad (CO₂/kW) que dependen del mix energético del país de estudio. Para el agua se considera el impacto generado por la energía empleada en las infraestructuras necesarias para que el agua llegue al punto de consumo, lo que se estima según la ecuación 3.

La huella producida es de energía y se calcula según la expresión 2:

$$HE_{me} = C_{me} \cdot E_{elect} \cdot \left(\frac{1 - A_o}{A_b} \right) \cdot FE_{ac} \quad (2)$$

Donde:

HE_{me}: HE de electricidad (hag/año)

C_{me}: consumo eléctrico (kWh)

E_{elec}: Factor de emisión de la electricidad: España (0.000248 tCO₂/kWh) (REE. Red Eléctrica Española, 2015)

En aras de determinar el impacto que produce el agua, se necesita el consumo de esta (C_{agua}) calculado según la tipología de proyecto (m³ de agua/m² construidos) (González-Vallejo, Marrero y Solís-Guzmán 2015).

La huella del agua se considera, por tanto, huella energética estimada según la ecuación 3:

$$HE_{agua} = C_{agua} \cdot IE_{agua} \cdot E_{elect} \cdot \left(\frac{1 - A_o}{A_b} \right) \cdot FE_{ac} \quad (3)$$

Donde:

C_{agua}: consumo de agua (m³)

IE_{agua}: intensidad energética para el consumo de agua (0.44 kWh/m³) (EMASESA, 2005).

Superficie consumida: se necesita la superficie ocupada por el edificio, que se obtiene de los datos generales de la obra. La huella que produce es de superficie ocupada y su impacto se calcula a partir de la expresión 4:

$$HE_{sup} = S \cdot FE_s \quad (4)$$

Donde:

HE_{sup} : HE de la superficie consumida (hag/año)
 S: Superficie consumida (ha)

Materiales: son necesarios los datos de consumo de materiales del presupuesto expresados en kg (a partir de las densidades).

Las fuentes de impacto son:

Fabricación y extracción de materiales (ecuación 5), con cálculo específico para la madera (Ec.6).

Transporte de materiales y RCD, de fábrica a la obra y de la obra a la planta gestora respectivamente (EC.7). Se requieren las cantidades de materiales y RCD generados que se van a transportar, así como las distancias de los trayectos.

Las huellas parciales que producen son: energía en todos los casos, y de bosques en el caso de la madera.

La fabricación de materiales se define en la ecuación 5:

$$HE_{mat} = \sum_i (C_{mi} \cdot Fe_{mi}) \cdot \left(\frac{1 - A_b}{A_f} \right) \cdot FE_{ac} \quad (5)$$

Donde:

HE_{mat} : HE de fabricación de materiales (hag/año)
 C_{mi} : Consumo de material i (kg)
 Fe_{mi} : Factor de emisión del material i (kg CO₂/kg) (Ecoinvent Centre, 2016)

La extracción y transformación de la madera se calcula según la ecuación 6. La productividad de los materiales de madera (P_{madi}) es de 0.98 m³/ham, excepto para los paneles de virutas, que es de 1.28 m³/ham (Kitzes et al., 2009).

$$HE_{mad} = \sum \left(\frac{C_{madi}}{P_{madi}} \right) \cdot FE_b \quad (6)$$

Donde:

HE_{mad} : HE de materiales de madera (hag/año)
 C_{madi} : consumo de madera i por año (t o m³/año)
 P_{madi} : productividad de la madera i (m³ ó t/ha) (Kitzes et al., 2009)

Para el transporte de materiales y de RCD se emplea la ecuación 7 y se consideran las distancias de ida y vuelta del vehículo.

$$HE_{tr} = \sum \left(\frac{P_{mi}}{V_{cam}} \cdot D_m \right) \cdot C_{cam} \cdot E_g \cdot \left(\frac{1 - A_b}{A_f} \right) \cdot FE_{ac} \quad (7)$$

Donde:

P_{mi} : peso del consumo de materiales i (t/año)
 D_m : distancia media (km), considerando 500 km (Andalucía) y 15 km, para materiales y RCD, respectivamente.
 V_{cam} : capacidad del camión (t)
 C_{cam} : consumo del camión (l/100 km)
 E_g : factor de emisión del combustible (gasóil) de camiones o maquinaria i, (0.0026 tCO₂/l)

En el caso del transporte del RCD (ecuación 4), P_{mi} es la cantidad de RCD generado y se obtiene aplicando el porcentaje de residuo (Solís-Guzmán et al., 2009) a la cantidad de material empleado.

Mano de obra: se precisan datos de cantidad de mano de obra en horas del presupuesto.

Las fuentes de impacto son:

- **Alimentación.** Se requiere el consumo de alimentos, extraídos de la Organización Mundial de las Naciones Unidas de la Alimentación y la Agricultura (FAO) (Organization of the United Nations 2014). Para obtener el consumo de cada país, se tienen en cuenta los alimentos producidos, importados y exportados: España consume 3,86 kg alimento/persona/día. A cada uno de ellos se les calcula el impacto que producen: tanto la energía necesaria para su manufactura como el terreno productivo del que proceden (cultivo, mar o pastos), aplicando la ecuación 8, según la metodología de la GFN (Global Footprint Network, 2014; Borucke et al., 2013). Así, se obtiene el impacto del alimento consumido por persona/año en el país de estudio, de forma total y por huellas parciales, en el caso de España la HE_{alimC} generada es de 1,43 hag/persona/año. Para aplicarlo a la mano de obra (HE_{alim}) se utiliza la expresión 9 en cada tipo de huella.
- **Residuos sólidos urbanos (RSU) generados.** Una vez que se dispone del consumo de RSU/persona/año del país, se calcula la cantidad generada por hora y se obtiene el impacto según la expresión 10.

Las huellas parciales que producen son: energía, en ambos casos, y cultivos, mar y pastos, en la alimentación.

Para obtener la huella del consumo de alimentos se utiliza la expresión 8:

$$HE_{alimC} = HE_{alimP} + HE_{alimI} - HE_{alimE} \quad (8)$$

Donde:

HE_{alimC} ; HE_{alimP} ; HE_{alimE} ; HE_{alimI} : HE del consumo; producción; exportación e importación de alimentos en el país de estudio
 El impacto del consumo de alimentos en obra se obtiene con la expresión 9:

$$HE_{alim} = \frac{H_t}{H_d} \cdot F_{calim} \cdot \frac{HE_{alimC}}{D} \quad (9)$$

Donde:

HE_{alim} : HE del consumo de alimentos total de la mano de obra (hag/año)
 HE_{alimC} : HE de la comida consumida por persona al año según las categorías de HE parciales i (hag/persona/año)
 F_{calim} : factor consumo alimentos en obra, 0,61, correspondiente al desayuno y almuerzo sobre el total de alimentos ingeridos diariamente por una persona adulta en España (61%) (Moreno Rojas et al., 2015)
 H_d : horas por jornada laboral (8h/día)
 H_t : horas totales trabajadas por la mano de obra anualmente (h/año)
 D: días por año (365)

El impacto de los RSU se calcula según la expresión 10:

$$HE_{RSU} = H_t \cdot G_{RSU} \cdot E_{RSU} \cdot \left(\frac{1 - A_b}{A_f} \right) \cdot FE_{ac} \quad (10)$$

Donde:

HE_{RSU} : HE de RSU (hag/año)

E_{RSU} : Factor de emisiones de los RSU (0.244 tCO₂/t) (European Environment Agency, 2013)

G_{RSU} : RSU generado por hora (0.000077 t/h) (EUROSTAT, 2015)

Maquinaria: se necesita los datos de cantidad de maquinaria empleada del presupuesto en horas.

Las fuentes de impactos son: el combustible (gasolina o gasoil) o la electricidad con los cuales se alimenta la maquinaria; y se calcula, según la ecuación 11 y la ecuación 2, respectivamente (Freire Guerrero y Marrero 2015).

En ambos casos, se necesitan los datos de rendimiento del motor para obtener los litros de combustible (ecuación 12) o los kW de electricidad (ecuación 13), además de las emisiones del combustible y de la electricidad, de acuerdo al mix energético del país de estudio. La huella parcial que producen es de energía.

El impacto de la maquinaria de combustible se calcula con las expresiones 11 y 12:

$$HE_{mc} = C_{comb} \cdot E_g \cdot \left(\frac{1 - A_v}{A_b} \right) \cdot FE_{ac} \quad (11)$$

Donde:

HE_{mc} : HE del consumo de combustible (gasoil) para maquinaria (hag/año)

E_g : Factor de emisión del combustible (gasoil) de camiones o maquinaria i, (0.0026 tCO₂/l)

C_{comb} : Consumo del camión (l/100 km)

$$C_{comb} = P \cdot T_u \cdot R \quad (12)$$

Donde:

P: Potencia del motor de la maquinaria (kW)

T_u: Tiempo de uso de la maquinaria en los trabajos de obra (h)

R: rendimiento del motor diesel o gasolina (l/kWh): 0.15-0.20 diesel o 0.30-0.40 gasolina.

Para calcular el impacto de la maquinaria eléctrica se utiliza la expresión 2, siendo C_{me} el consumo de la maquinaria calculado según la ecuación 13:

$$C_{me} = P \cdot T_u \quad (13)$$

ESTUDIO DE CASO

La tipología que aquí se estudia corresponde a una de diez plantas sobre rasante, con sótano, de cimentación con zapatas aisladas, estructura de hormigón armado, cubierta de plana transitable y viviendas en planta baja. El edificio es de planta cuadrada y cuenta con cuatro viviendas por planta. El espacio de cada vivienda se divide en cocina, salón-comedor, dos dormitorios y dos baños, además de los pasillos de distribución, los que suma una superficie útil de 72 m².

El resto de características constructivas se definen en la Tabla 4, donde se indican las opciones seleccionadas de materiales, sistemas constructivos y maquinaria.

CONCEPTO	Desplegables
CAPÍTULO 02. EXCAVACIONES	
Excavaciones	Pala
Rellenos	Medios mecánicos
Transporte Tierras	Medios mecánicos
CAPÍTULO 03. CIMENTACIONES	
Encofrados	Madera
Hormigones armados zapatas	Vertido grúa
CAPÍTULO 04. SANEAMIENTO	
Arquetas	In situ
Colectores	PVC
Bajantes	PVC
CAPÍTULO 05. ESTRUCTURAS	
Forjados	Bovedillas cerámicas
Encofrados	Madera
CAPÍTULO 07. CUBIERTAS	
Cubiertas horizontales	Transitable
Cubiertas inclinadas	Teja cerámica
CAPÍTULO 08. INSTALACIONES	
Líneas y derivaciones	PVC
Canalizaciones agua caliente	Cobre
Canalizaciones agua fría	Cobre
Aparatos Sanitarios	Porcelana
Termos/calentadores	Eléctrico
CAPÍTULO 09. AISLAMIENTOS	
Aislamientos acústicos	Polietileno
Aislamientos térmicos	Poliuretano
CAPÍTULO 10. REVESTIMIENTOS	
Alicatados	Con adhesivo
Chapados	Piedra caliza
Guarnecidos	Escayola
Solados	Cerámica
Techos	Fij. Metálica
Remates	Piedra caliza
CAPÍTULO 11. CARPINT. Y ELEM. DE SEG. Y PROT.	
Barandillas	Acero
CAPÍTULO 13. PINTURAS	
Pinturas exteriores	Elastómera lisa
Pinturas interiores	Plástica lisa

Tabla 4. Opciones de los desplegados seleccionadas para el caso de estudio. Fuente: González-Vallejo (2017).

Recursos obra	Cantidades	Porcentajes
Materiales	kg/m ²	(%)
Acero	18,37	0,99
Áridos	241,14	12,95
Cemento	28,56	1,53
Cerámico	379,65	20,38
Hormigón	1112,22	59,71
Pintura	3,76	0,20
Total materiales	1783,70	95,76
Mano de obra	(h/m ²)	(%)
CD	8,65	48,36
CD Maquinaria combustible	0,12	0,66
CD Maquinaria eléctrica	0,17	0,97
CI	8,94	50,00
Total mano de obra	17,88	100,00
Maquinaria	(h/m ²)	(%)
CD Combustible	0,12	11,70
CD Eléctrica	0,17	17,17
CI Eléctrica	0,72	71,13
Total maquinaria	1,01	100,00
RCD	t/m ²	(%)
Total metales	2,23	0,18
Total áridos y piedras naturales	29,45	2,39
Total cerámicos	274,73	22,32
Total madera	9,53	0,77
Total plásticos y sintéticos	1,21	0,10
Total hormigón, cemento y cales	873,13	70,95
Total mezclados	40,42	3,28
Total RCD	1230,70	100,00
Alimentos	kg alimento/m ²	-
Total alimentos	3,04	-
RSU	t/m ²	-
Total RSU	7,95E-04	-
Electricidad	kWh/m ²	%
Casetas de obra	4,33	62,47
Iluminación obra y pruebas instalaciones	2,60	37,53
Total electricidad	6,93	100,00
Agua	m ³ /m ²	-
Total agua	0,0677	-
Superficie ocupada	m ² sup. ocupada/ m ² sup. construida	-
Total superficie ocupada	0.01	-

Tabla 5. Cuantificación y porcentaje de recursos del proyecto. Fuente: González-Vallejo (2017).

Impacto	Tipo de huella (hag/m ²)					
	Energía	Bosques	Pastos	Mar	Cultivos	Superficie consumida
Maquinaria combustible	3,06E-03	-	5,36E-06	8,57E-06	2,01E-06	-
Maquinaria eléctrica	1,11E-04	-	7,86E-06	1,26E-05	2,94E-05	-
Mano de obra alimentos	2,14E-04	-	4,95E-04	7,92E-04	1,85E-03	-
Mano de obra RSU	4,90E-05	-	-	-	-	-
Mat. fabricación	8,00E-02	2,92E-02	-	-	-	-
Mat. transporte	2,91E-03	-	-	-	-	-
Mat. RCD	2,35E-05	-	-	-	-	-
Agua	1,87E-06	-	-	-	-	-
Electricidad	4,34E-04	-	-	-	-	-
Ocup. directa	-	-	-	-	-	2,28E-05
HE total (hag/m ²)	0,12					
HE parcial (hag/m ²)	0,09	2,92E-02	5,09E-04	8,13E-04	1,89E-03	2,28E-05

Tabla 6. Huella ecológica total y huellas parciales. Fuente: González-Vallejo (2017).

RESULTADOS

RECURSOS DEL PROYECTO.

Los recursos necesarios para la construcción del proyecto se exponen en la Tabla 5.

- **Materiales:** Se clasifican en familias y en la Tabla 5 se incluyen las de mayor peso e impacto. Los materiales de mayor peso son, en primer lugar, el hormigón, seguido del cerámico y los áridos. El acero tiene muy poca presencia en peso.
- **Mano de obra:** Aquí se considera aquella que maneja la maquinaria de combustible y la eléctrica, además de la mano de obra procedente de los CI, que es de gran importancia puesto que corresponde a la mitad de la mano de obra del proyecto, según la Tabla 5.
- **Maquinaria:** El rendimiento de toda la maquinaria de combustible empleada es de 0,20 l/kWh, para obtener el consumo total de combustible (litros), que es de 4,66 l/m². La maquinaria eléctrica consume 1,72 kWh/m², recogidos en la Tabla 5. La maquinaria procedente de los CI corresponde a: grúa, manipulador telescópico, plataforma elevadora, montacargas, hormigonera y cortadora; todos de gran magnitud en el proyecto ya que suponen más del 71,13% del total de la maquinaria requerida.

HUELLA ECOLÓGICA TOTAL Y HUELLAS PARCIALES

En la Tabla 6 se incluyen los valores de HE según las fuentes de impacto y los tipos de huellas por unidad de superficie construida. La huella parcial que produce mayor impacto es la de la energía y, en particular, la fabricación de materiales. Los resultados de HE total del caso de estudio propuesto se pueden comparar con los resultados anteriormente publicados para edificios de la misma tipología evaluados con la metodología inicial, para los cuales se cuantifica su impacto en 0,235 hag/m² (González-Vallejo, Marrero y Solís-Guzmán, 2015) y en 0,237 hag/m² (González-Vallejo et al., 2015).

ANÁLISIS DEL IMPACTO ECONÓMICO Y AMBIENTAL.

En esta parte del trabajo, se realiza la comparativa entre el impacto económico y ambiental de todo el proyecto (Figura 2) y se desglosa en los capítulos según la clasificación sistemática de la BCCA. Se observa, por tanto, que no hay coincidencia entre los capítulos de mayor huella y los de mayor PEM, siendo las instalaciones el capítulo de mayor importe, seguido de los revestimientos y, en tercer lugar, de las estructuras y la albañilería. Sin embargo, las fases con mayor impacto ambiental son: estructuras, albañilería y cimentaciones.

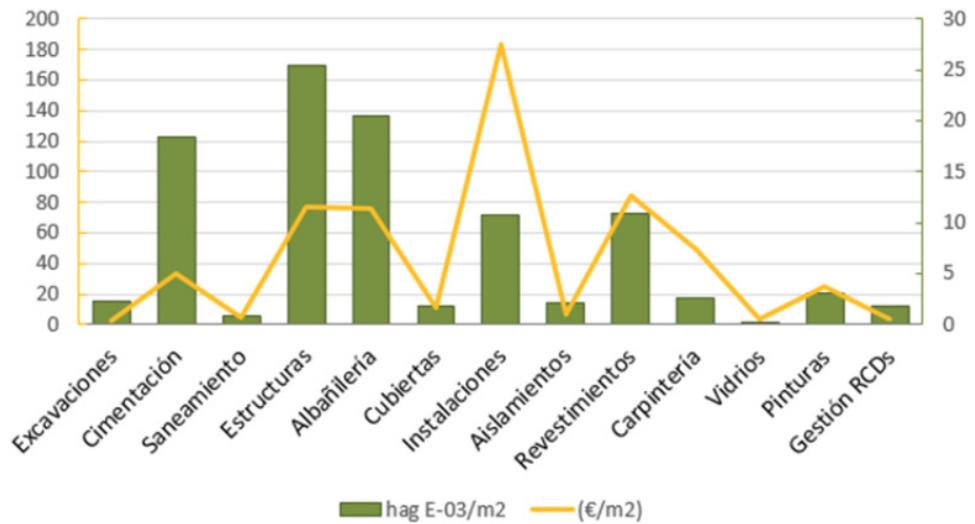


Figura 2. Comparativa impacto económico y ambiental. Desglose por capítulos de proyecto según criterios de la BCCA. Fuente: González-Vallejo (2017).

05HA		m3. Hormigones Armados: 05HHJ00003. m3. Hormigón para armar HA-25/P/20/IIa en vigas (según BCCA)					
Código	Ud	Descompuesto	Cantidades		Precios	Importe (€)	Total
			Unitarias	Totales	€	80,01	96.368,97 €
MATERIALES							
CH02920	m3	Hormigón HA-25/P/20/IIa, suministrado	1,03	1221,10	60,26	60,26	73.583,30 €
MANO DE OBRA							
TO02100	h	Oficial 1ª	0,20	244,22	19,23	3,85	4.696,34 €
TP00100	h	Peón especial	0,60	732,66	18,28	10,97	13.392,99 €
MAQUINARIA							
MV00100	h	Vibrador	0,30	244,22	19,23	3,85	4.696,34 €

Tabla 7. Ejemplo de cuantificación de recursos en la herramienta. Capítulo 05 de estructuras, vigas de hormigón armado. Fuente: González-Vallejo (2017).

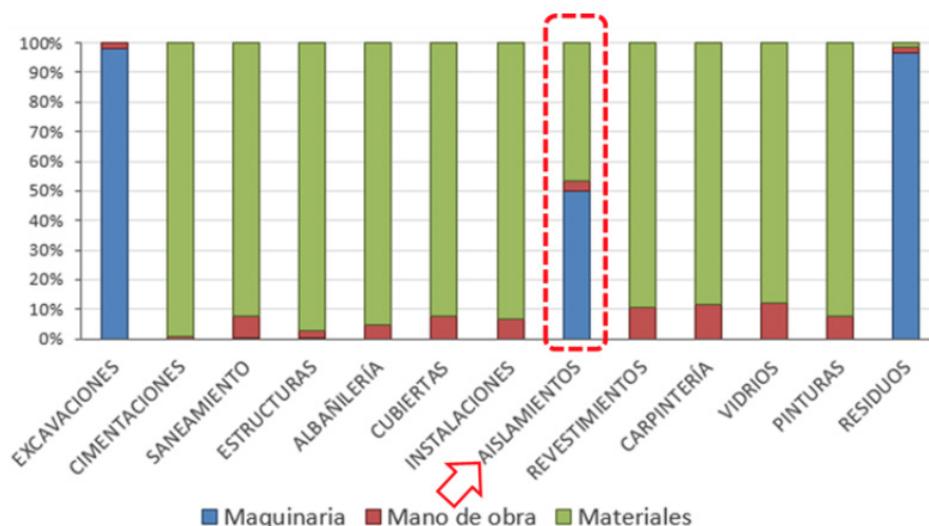


Figura 3. Descomposición en recursos del proyecto: materiales, mano de obra y maquinaria. Desglose por capítulos de proyecto y BCCA. Fuente: González-Vallejo (2017).

Familias	Emisiones	Porcent.	HE	Porcentaje	Importe	Porcentaje
de materiales	unitarias (kgCO ₂ /m ²)	sobre emisiones total (%)	energía (hag/m ²)	sobre HE de materiales (%)	de materiales (€/m ²)	sobre importe (%)
Acero	44,70	14,12	1,13E-02	10,80	72,46 €	29,73
Áridos	0,48	0,15	1,22E-04	0,12	0,93 €	0,38
Cemento	21,89	6,92	5,53E-03	5,29	2,68 €	1,10
Cerámico	96,02	30,34	2,43E-02	23,20	31,59 €	12,96
Cobre	5,56	1,76	1,41E-03	1,34	35,24 €	14,46
Hormigón	122,98	38,85	3,11E-02	29,71	32,06 €	13,16
Madera	-18,04	-5,70	2,00E-02	19,16	15,42 €	6,33
Pintura	12,42	3,92	3,14E-03	3,00	10,38 €	4,26
Total	286,02	90,36	9,69E-02	92,63	200,78 €	82,39
Total proyecto	316,52	100	1,05E-01	100	243,71 €	100

Tabla 8. Familias de materiales de mayor impacto del proyecto. Fuente: González-Vallejo (2017).

El PEM total del proyecto es de 500,01€/m² y tiene una HE de 0,12 hag/m², y el HE correspondientes sólo a los recursos (materiales, mano de obra y maquinaria) es de 0,10 hag/m². Es decir, el impacto ambiental del proyecto corresponde en un 83% a los recursos y en un 17% a electricidad, agua y superficie consumida.

ANÁLISIS PORMENORIZADO DE RECURSOS

En la Tabla 7 se ejemplifica la cuantificación de recursos en la base de datos de la herramienta para determinar los impactos, según datos extraídos de la BCCA. Cada recurso produce uno o varios impactos, como se refleja en la Figura 1.

Después de estudiar la importancia de los recursos (materiales, mano de obra y maquinaria) en cada capítulo (Figura 3), se advierte que predomina el empleo de materiales, a excepción de las fases de excavaciones y gestión de RCD donde prevalece el uso de maquinaria y, en menor proporción, la mano de obra (en todos los casos). A diferencia del resto de las actividades, en aislamientos, un 50% de los recursos empleados corresponde a la maquinaria, un 45%, a materiales y un 5%, a mano de obra. A continuación, se analiza en mayor detalle los materiales y la maquinaria, al ser los recursos que definen los impactos del proyecto.

Maquinaria: En las excavaciones se emplea pala cargadora y camión basculante; en los aislamientos de fachadas, la maquinaria eléctrica (compresor para proyectar) empleada para colocar el aislamiento térmico de poliuretano proyectado. En la gestión de RCD, se utiliza pala cargadora, retroexcavadora, camión basculante y carretilla mecánica basculante para transporte interior. Se puede reducir el impacto empleando maquinaria más eficiente con mejor

rendimiento. En la labor de aislamiento es posible probar con otras alternativas de materiales que no necesiten maquinaria y comprobar si, de ese modo, disminuye el impacto.

Materiales: En la medida en que los materiales son responsables, en casi todos los capítulos, del 90% del impacto, estos se analizan a nivel de proyecto y, en particular, en cada capítulo, para determinar de dónde proceden los impactos.

El proyecto consume un total de materiales de 1862,61 kg/m², los que producen unas emisiones de 316,52 kgCO₂/m².

La HE de materiales es 0,011 hag/m², siendo 0,08 hag/m² HE de energía y 0,03 hag/m² HE de bosques (madera).

Prosiguiendo, se seleccionan las familias con mayor impacto y se analizan las emisiones de CO₂, HE y el importe, incluyendo los porcentajes sobre los totales (Tabla 8). Cabe subrayar que los materiales cerámicos y hormigón representan los de mayor significancia en peso, además de un alto impacto económico y ambiental. El acero tiene gran importancia en peso y menor impacto ambiental en relación con el resto de los materiales, sin embargo es el que genera mayor impacto económico. Por otro lado, la madera destaca por su gran cantidad de HE, al contrario de sus emisiones de CO₂, que son negativas. En cuanto al impacto económico, son el acero, cobre, hormigón y la cerámica los materiales de mayor coste.

Los capítulos de mayor impacto son: cimentaciones, estructuras, albañilería, instalaciones y revestimientos (Figura 4).

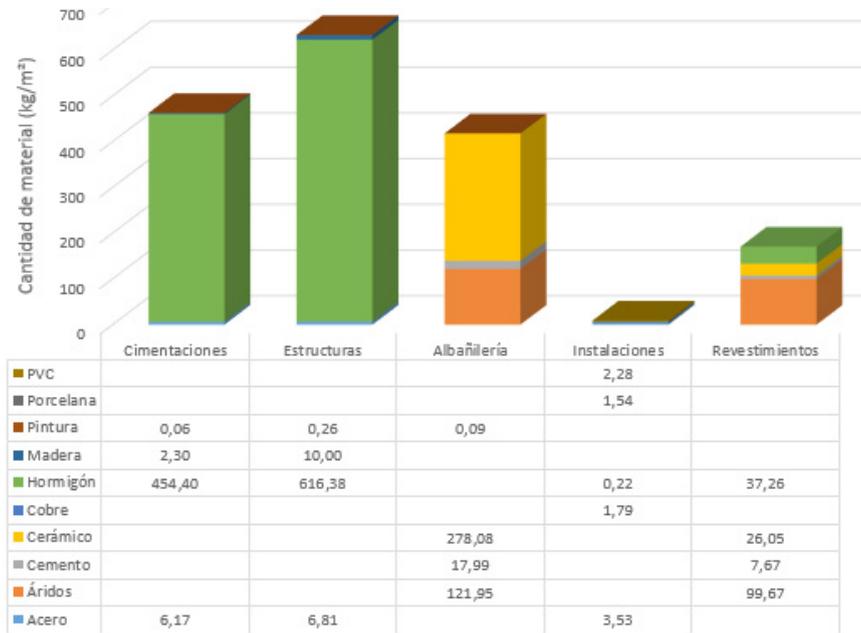


Figura 4. Materiales utilizados (kg/m²) en los capítulos de mayor impacto del proyecto. Fuente: González-Vallejo (2017).

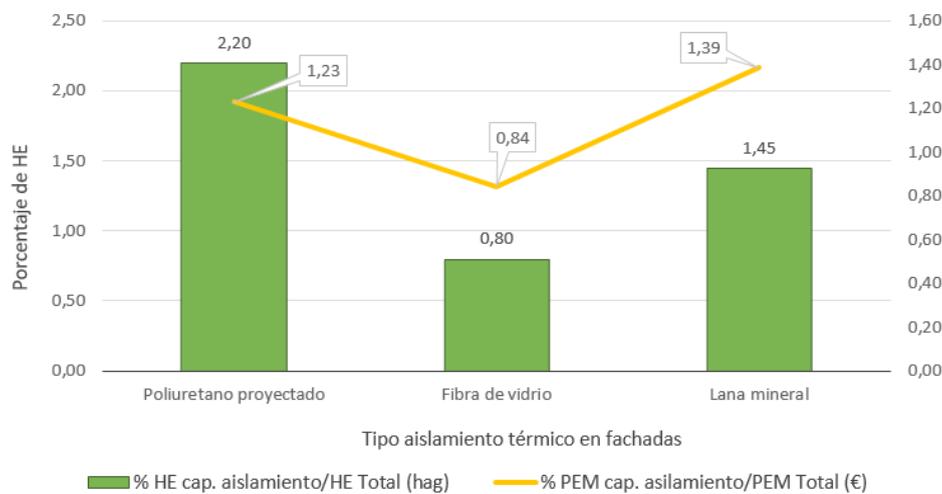


Figura 5. Comparativa económica y ambiental del capítulo de aislamientos sobre el total del proyecto. Fuente: González-Vallejo (2017).

En estructura y cimentación se emplean los materiales con mayor peso e impacto (kg/m²), debido a la presencia del hormigón, seguido de la albañilería, que utiliza sobre todo material cerámico. Los áridos también se usan en gran cantidad, en algunas fases, como son albañilería y revestimientos, pero al ser elementos naturales tienen mucho menor impacto. En instalaciones y revestimientos, los impactos están más repartidos debido a la gran variedad de partidas y materiales que incluyen estas fases, no obstante, tienen un alto coste, siendo efectivamente los dos capítulos de mayor impacto económico.

PROPUESTAS PARA MEJORAR EL IMPACTO ECONÓMICO Y AMBIENTAL DEL PROYECTO.

Para comprobar la sensibilidad de la herramienta, se plantea cambiar el material de aislamiento térmico de las fachadas en el proyecto del estudio de caso. Las propuestas según los datos de la BCCA son: poliuretano proyectado, aislamiento propuesto inicialmente (PUS 09TPP90037), fibra de vidrio (PUS 09TPP00110) y lana mineral (PUS 09TPP90221). En la Figura 5, se observa como varían los recursos según el tipo de aislamiento. Las nuevas opciones no utilizan maquinaria y el impacto es producido principalmente por el material y, en menor proporción, por la mano de obra.

Se analiza el impacto económico y ambiental de las tres propuestas y se realiza la comparativa en la Figura 5. El aislamiento de fibra de vidrio es la opción más viable desde el punto de vista económico y ambiental y la propuesta inicial de poliuretano proyectado es la peor, ya que produce mayor impacto tanto económico como ambiental.

CONCLUSIONES

Partiendo del presupuesto del caso de estudio y de la metodología del indicador HE, se estiman los impactos económicos y ambientales, y se infiere que la herramienta es muy pertinente para su empleo en la fase de diseño de edificios. Las conclusiones que se indican en seguida, relativas al estudio de caso, serían aplicables a cualquier edificio que se evalúe desde estos criterios de economía y sostenibilidad.

Así, es posible determinar las fases de proyecto de mayor impacto económico y ambiental para el caso de estudio que, en términos generales, son: excavaciones, cimentaciones, estructuras, albañilería, instalaciones y revestimientos; en las cuales, sin embargo, no suele coincidir su nivel de impacto económico con el ambiental, lo que obliga a tomar decisiones en este sentido. Por tanto, en la etapa de diseño, se debe cuantificar, de forma pormenorizada, los impactos de estas fases y de los materiales empleados y así se pueden proponer otras soluciones de menor impacto ambiental y decidir si se opta por cambiarlas aunque tengan mayor coste. Los materiales de hormigón y cerámica son los que tienen mayor peso en el total del proyecto, siendo ambos los que producen mayor impacto, lo cual habría que tenerlo en cuenta en el diseño del edificio e intentar disminuir su empleo o utilizar alternativas más ecológicas como hormigón reciclado o cerámica que involucre fuentes de energía de fabricación más eficientes (pellets, por ejemplo). El acero tiene poca presencia en peso y, sin embargo, su impacto es muy alto, de modo que sería igualmente mejorable el impacto global del proyecto si se optara por acero reciclado.

Los resultados de HE, según la metodología actual, son menores al compararlos con los obtenidos en edificios de similares características de investigaciones previas. Ello se debe fundamentalmente a la actualización en el cálculo de energía en la fabricación de materiales, consumo de energía y agua, y del impacto producido por la mano de obra.

Se demuestra, por consiguiente, la sensibilidad de la herramienta en cuanto a las diferentes alternativas de materiales e igualmente que la fibra de vidrio es el aislamiento más adecuado. Este estudio se completaría analizando la fase de operación del edificio con cada una de las tres alternativas y así disponer de la visión del ACV completa y poder tomar la decisión más acertada.

La herramienta aquí propuesta incluye las características constructivas más empleadas en España, en los últimos años

para edificios residenciales; la metodología es replicable y, dada su versatilidad, permite su ampliación incluyendo materiales tradicionales de otros climas, nuevas propuestas más sostenibles, además de otros tipos de cimentaciones, estructuras metálicas o de maderas, diferentes tipos de fachadas y acabados, etc.

La herramienta es muy flexible en cuanto a la posibilidad de ampliación e inclusión de nuevas tipologías, sistemas constructivos y materiales, y de fácil manejo para el usuario. El empleo de la BCCA proporciona un sistema estable y robusto que garantiza su viabilidad y favorece dicha flexibilidad. Se considera que es un instrumento imprescindible en la toma de decisiones a la hora de elaborar un proyecto desde la fase de diseño, ya que permite estudiar diferentes alternativas de recursos y sistemas constructivos, según los puntos de vista económicos y ambientales.

Con respecto a las debilidades, se plantea la dificultad de acceso a alguna de la información específica del indicador HE, como los datos de consumos, o emisiones específicas de los recursos de materiales, energía o agua, para el sector constructivo de cada país.

En futuras investigaciones pueden ampliarse tanto las tipologías edificatorias como las alternativas de recursos, los sistemas estructurales y detalles constructivos propuestos, e incluir otros análisis ambientales como la energía incorporada o la huella hídrica. Además, los datos empleados se pueden aplicar a herramientas de certificación energética y determinar así el impacto de la fase de operación del edificio, completando el ACV, para facilitar la toma de decisiones en la fase de diseño con miras a mejorar los niveles de impacto del CVE. Igualmente, se puede conectar con herramientas BIM, lo que facilitaría la obtención de los datos de proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ministerio de Innovación y Ciencia, por la concesión del proyecto I+D+i: Evaluación de la huella ecológica de la edificación del sector residencial en España (EVALHED) (BIA2011-25812) y al grupo de investigación Arquitectura, Diseño y Técnica, (ARDITEC-TEP 172) de la Universidad de Sevilla.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBA-RODRÍGUEZ, M.D., MARTÍNEZ-ROCAMORA, A., GONZÁLEZ-VALLEJO, P., FERREIRA-SÁNCHEZ, A. y MARRERO, M. 2017. Building rehabilitation versus demolition and new construction: Economic and environmental assessment, *Environmental Impact Assessment Review* [en línea], 2016, vol. 66, n.º, pp. 115-126. DOI 10.1016/j.eiar.2017.06.002.

BARE, Jane C.; HOFSTETTER, Patrick; PENNINGTON, David W. y HAES, Helias. Midpoints versus endpoints: The sacrifices and

benefits. *Int. J. Life Cycle Assess, The International Journal of Life Cycle Assessment* [en línea], 2000, vol. 5, pp. 319–326. DOI 10.1007/BF02978665.

BORUCKE, Michael; MOORE, David; CRANSTON, Gemma; GRACEY, Kyle; IHA, Katsunori; LARSON, Joy; LAZARUS, Elias; MORALES, Juan Carlos; WACKERNAGEL, Mathis y GALLI, Alessandro. Accounting for demand and supply of the biosphere's regenerative capacity: The National Footprint Accounts' underlying methodology and framework. *Ecological Indicators* [en línea], 2013, vol. 24, pp. 518-533. DOI: 10.1016/j.ecolind.2012.08.005.

BREEAM.ES website Available online [en línea], 2018. [Consulta: 9 agosto 2018]. Disponible en: <http://www.breeam.es/>.

CHAU, C. K.; LEUNG, T. M.; NG, W.Y. A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings, *Appl. Energy* [en línea], 2015, vol. 143, pp. 395-413. DOI 10.1016/j.apenergy.2015.01.023.

CONSEJERÍA DE FOMENTO Y VIVIENDA. Junta de Andalucía. Consejería de Fomento y Vivienda. *Base de costes de la Construcción de Andalucía (BCCA) 201. Banco de precios* [en línea]. 2016. [Consultado 3 junio 2017]. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/organismos/fomentoyvivienda/areas/vivienda-rehabilitacion/planes-instrumentos/paginas/bcca-abr-2016.html>.

ECOINVENT CENTRE. *Ecoinvent database* [en línea]. 2016. [Consultado 15 julio 2016]. Disponible en: <http://www.ecoinvent.org/database/>.

EMASESA. Así éramos así somos. 1975-2005. *EMASESA* [en línea]. 2005. [Consultado 12 enero 2017]. Disponible en: http://www.emasesa.com/wp-content/uploads/2014/03/Asi_eramos_asi_somos.pdf.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. *Municipal waste management in Spain EEA project manager Almut Reichel*. 2013.

EUROSTAT 2015. *Municipal waste generated by country in selected years (kg per capita)* [en línea]. [Consultado 12 enero 2017]. Disponible en: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Municipal_waste_generated_by_country_in_selected_years_%28kg_per_capita%29_new.png.

GARCÍA-ERVITI, Federico; ARMENGOT-PARADINAS, Jaime y RAMÍREZ PACHECO, Gema. El análisis del coste del ciclo de vida como herramienta para la evaluación económica de la edificación sostenible. Estado de la cuestión, *Informes de la Construcción* [en línea], 2015, vol. 67, n.º 537, pp. 56-2015. DOI: 10.3989/ic.12.119.

FREIRE GUERRERO, Antonio y MARRERO, Madelyn. Evaluación a través del presupuesto de la energía incorporada al proyecto de edificación, *Hábitat sustentable*, 2015, vol. 5, n.º 1, pp. 54-63.

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. Global Footprint Network: Learning Package of National Footprint Accounts 2014 edition. *National Footprint Accounts 2014 edition* [en línea]. [Consultado 5 septiembre 2016]. Disponible en: <http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN>.

GOBIERNO DE ESPAÑA. Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. *Boletín Oficial del Estado*

[en línea], 2008, n.º 38, de 13 febrero, pp. 7724-7730. [Consultado 5 septiembre 2016]. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2008/02/13/pdfs/A07724-07730.pdf>.

GONZÁLEZ-VALLEJO, Patricia. *Evaluación económica y ambiental de la construcción de edificios de tipo residencial. Aplicación a España y Chile*. Tesis Doctoral. S.I.: Universidad de Sevilla, 2017.

GONZÁLEZ-VALLEJO, Patricia; MARRERO, Madelyn y SOLÍS-GUZMÁN, Jaime. The ecological footprint of dwelling construction in Spain, *Ecological Indicators* [en línea], 2015, vol. 52, pp. 75-84. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.11.016.

GONZÁLEZ-VALLEJO, Patricia; SOLÍS-GUZMÁN, Jaime; LLÁCER, Rafael y MARRERO, Madelyn. La construcción de edificios residenciales en España en el período 2007-2010 y su impacto según el indicador Huella Ecológica, *Informes de la Construcción* [en línea], 2015, vol. 67, no. 539, pp. e111. DOI: 10.3989/ic.14.017.

GONZÁLEZ-VALLEJO, Patricia; MUÑOZ-SANGUINETTI, Claudia y MARRERO, Madelyn. Environmental and economic assessment of dwelling construction in Spain and Chile. A comparative analysis of two representative case studies, *Journal of Cleaner Production* [en línea], 2019, vol. 208, pp. 621-635. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.063.

ITeC BEDEC website Available online [en línea], 2013. [Consultado 9 abril 2018]. Disponible en: <http://www.itec.es/nouBedec/e/bedec.aspx>.

KHAN, Jam S.; ZAKARIA, Rozana; AMINUDDIN, Eeydzah; ABIDIN, Nur I.; SAHAMIR, Shaza; ROSLI, Ahmad y ABAS, Darul N. Web-based automation of green building rating index and life cycle cost analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* [en línea], 2018 vol. 143, n.º 1. DOI: 10.1088/1755-1315/143/1/012062.

KITZES, Justin; GALLI, Alessandro; BAGLIANI, Marco; BARRETT, John; DIGE, Gorm; EDE, Sharon; ERB, Karlheinz; GILJUM, Stefan; HABERL, Helmut; HAILS, Chris; JOLIA-FERRIER, Laurent; JUNGWIRTH, Sally; LENZEN, Manfred; LEWIS, Kevin; LOH, Jonathan; MARCHETTINI, Nadia; MESSINGER, Hans; MILNE, Krista; MOLES, Richard; MONFREDI, Chad; MORAN, Daniel; NAKANO, Katsura; PYHALA, aili; REES, William; SIMMONS, Craig; WACKERNAGEL, Mathis; WADA, Yoshihiko; WALSH, Connor; WIEDMANN, Thomas. A research agenda for improving national Ecological Footprint accounts. En: Methodological Advancements in the Footprint Analysis, *Ecological Economics* [en línea], 2009, vol. 68, no. 7, pp. 1991-2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.06.022>.

LAZARUS, Elía; ZOKAI, Golnar; BORUCKE, Michael; PANDA, Dharashree; IHA, Katsunori; MORALES, Juan Carlos; WACKERNAGEL, Mathis; GALLI, Alessandro y GUPTA, Naina. Working Guidebook to the National Footprint Accounts 2014. *Global Footprint Network report* [en línea], 2014, n.º June, pp. 127. Disponible en: http://www.footprintnetwork.org/images/article_uploads/NFA_2014_Guidebook_7-14-14.pdf.

LI, B. y CHENG, D. J. Hotel ecological footprint model: Its construction and application, *Chinese Journal of Ecology*, 2010, vol. 29, no. 7, pp. 1463-1468.

LU, YI y CHEN, BIN. Urban ecological footprint prediction based on the Markov chain. *Journal of Cleaner Production* [en línea], 2017, vol. 163, pp. 146-153. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.034.

- MANCINI, M. Serena; GALLI, Alessandro; NICCOLUCCI, Valentina; LIN, David; BASTIANONI, Simone; WACKERNAGEL, Mathis y MARCHETTINI, Nadia. Ecological Footprint: Refining the carbon Footprint calculation, *Ecological Indicators* [en línea], 2016, vol. 61, pp. 390-403. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.09.040.
- MARRERO, Madelyn y RAMÍREZ DE ARELLANO AGUDO, Antonio. The building cost system in Andalusia: Application to construction and demolition waste management, *Construction Management and Economics*, 2010, vol. 28, pp. 495-507.
- MARTÍNEZ-ROCAMORA, Alejandro; SOLÍS-GUZMÁN, Jaime y MARRERO, Madelyn. Ecological footprint of the use and maintenance phase of buildings: Maintenance tasks and final results, *Energy & Buildings* [en línea], 2017, vol. 155, pp. 339-351. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.09.038.
- MINISTERIO DE ENERGÍA TURISMO Y AGENDA DIGITAL. *Certificación eficiencia energética de edificios* [en línea]. 2018. [Consultado 21 diciembre 2014]. Disponible en: <http://www.minetad.gob.es/energia/desarrollo/eficienciaenergetica/certificacionenergetica/documentosreconocidos/paginas/documentosreconocidos.aspx>.
- MINISTERIO DE VIVIENDA DE ESPAÑA. *Código Técnico de la Edificación*. Madrid: s.n, 2006.
- ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT). *Statistic division of the Food and Agriculture Organization of the United Nations* [en línea]. 2014. [Consultado 21 diciembre 2014]. Disponible en: <http://faostat3.fao.org/home/E>.
- PRé Sustainability SimaPro 8 Available online [en línea]. 2018. [Consultado 9 agosto 2018]. Disponible en: <https://simapro.com/>.
- RADHI, H. y SHARPLES, S. Global warming implications of facade parameters: A life cycle assessment of residential buildings in Bahrain, *Environ. Impact Assess. Rev.* [en línea], 2013, vol. 38, pp. 99-108. DOI: 10.1016/j.eiar.2012.06.009.
- RAMÍREZ DE ARELLANO AGUDO, ANTONIO. *La teoría de sistemas al servicio del análisis de presupuestos de obras*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla, 1988.
- RAMÍREZ DE ARELLANO AGUDO, ANTONIO. *Presupuestación de obras. Manual universitario*. S.l., 2004.
- RAWLINSON. *Rawlinson's Australian construction handbook*. Perth, Western Australia.: Rawlinson's Publishing, 2009.
- REE. RED ELÉCTRICA ESPAÑOLA. *Avance 2015*.
- SESANA, Marta y SALVALAI, Graziano. Overview on life cycle methodologies and economic feasibility for nZEBs, *Building and Environment* [en línea], 2013, vol. 67, n° 4, pp. 211-216. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.05.022.
- SOLÍS-GUZMÁN, Jaime; MARRERO, Madelyn; MONTES-DELGADO, M.Victoria y RAMÍREZ DE ARELLANO, Antonio. A Spanish model for quantification and management of construction waste, *Waste Management* [en línea], 2009, vol. 29, n° 9, pp. 2542-2548. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.05.009.
- SOLÍS-GUZMÁN, Jaime; MARRERO, Madelyn y RAMÍREZ DE ARELLANO, Antonio. Methodology for determining the ecological footprint of the construction of residential buildings in Andalusia (Spain), *Ecological Indicators*, 2013, vol. 25, n° 9, pp. 239-249.
- Spain MPW Unified Tool LIDER-CALENER Available online [en línea]. 2018. [Consultado 9 agosto 2018]. Disponible en: <http://www.codigotecnico.org/index.php/menu-recursos/menu-aplicaciones/282-herramienta-unificada-lider-calener>.
- SpainGBC VERDE tool website Available online [en línea]. 2018. [Consultado 22 agosto 2018]. Disponible en: <http://www.gbce.es/es/pagina/herramientas-de-evaluacion-de-edificios>.
- UNE-EN ISO 14020 *Environmental labels and declarations - General principles*, 2002. 2002. S.l.: s.n.
- UNE-EN ISO 14040 *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*, 2006. 2006. S.l.: s.n.
- UNE-EN ISO 14044 *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*, 2006. 2006. S.l.: s.n.
- VÁSQUEZ PALACIOS, Jorge R. y QUESADA MOLINA, Juan F. Determinación del costo de construcción de las diferentes clasificaciones para una vivienda sustentable en la ciudad de cuenca, Ecuador, *Hábitat Sustentable*, 2017, vol. 91, pp. 399-404.
- WACKERNAGEL, Mathis y REES, William. *Our Ecological Footprint Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola Island, Canada: New Society Publishers, 1996.
- WEIDEMA, Bo. P.; THRANE, Mikkel; CHRISTENSEN, Per; SCHMIDT, J. y LØKKE, S. Carbon Footprint. A Catalyst for Life Cycle Assessment?, *Journal of Industrial Ecology*, 2008, vol. 12, n° 1, pp. 3-6.
- YANG, Yi y HU, Die. Natural capital utilization based on a three-dimensional ecological footprint model: A case study in northern Shaanxi, China. *Ecological Indicators* [en línea], 2018, vol. 87, n° November 2017, pp. 178-188. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.12.010.
- YOU, Fang; HU, Dan; ZHANG, Haitao; GUO, Zhen; ZHAO, Yanhua; WANG, Bennan y YUAN, Ye. Carbon emissions in the life cycle of urban building system in China-A case study of residential buildings, *Ecol. Complex.* [en línea], 2011, vol. 8, pp. 201-212. DOI: 10.1016/j.ecocom.2011.02.003.



MATRIZ DE REFERENCIA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL CICLO DE VIDA DE LOS MATERIALES CONSTRUCTIVOS DE LA VIVIENDA SOCIAL EN ZONAS ÁRIDO-SÍSMICAS

A REFERENCE MATRIX FOR THE OPTIMIZATION OF THE LIFE CYCLE OF SOCIAL HOUSING CONSTRUCTION MATERIALS IN ARID SEISMIC ZONES.

ANALIA ALEJANDRA ALVAREZ

Doctora Arquitecta

Instituto de Estudios en Arquitectura Ambiental (INEAA);
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño (FAUD);
Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), San Juan, Argentina
<https://orcid.org/0000-0003-0069-8173>
ana_alv023@hotmail.com

VERONICA RIPOLL MEYER

Arquitecta

Instituto de Estudios en Arquitectura Ambiental (INEAA);
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño (FAUD);
Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), San Juan, Argentina
veronicaripoll@yahoo.com

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es contribuir con la sustentabilidad ambiental en el árido a través del desarrollo de un sistema de apoyo a la toma de decisiones en las distintas fases que intervienen en el ciclo de vida (ACV) de los edificios. Para ello, se analizan los materiales característicos de los sistemas constructivos racionalizados propios de zonas árido-sísmicas en relación con las emisiones de dióxido de carbono asociadas a los mismos durante su producción, uso y disposición final. Los resultados alcanzados permiten determinar el nivel de sustentabilidad de los materiales analizados de acuerdo con su importancia relativa en la cadena de valor de la construcción de un país emergente como Argentina. Con base en ello, puede realizarse la estimación temprana del comportamiento energético de la vivienda social, así como la optimización de dichos materiales conforme a una mirada integral de la problemática habitacional en términos de ciclo de vida. Por tanto, la herramienta desarrollada permite empoderar a los usuarios de dichas viviendas, para que puedan ejercer su derecho a una vivienda digna y a un ambiente sano, equilibrado y apto para el desarrollo humano, tal como lo establecen los artículos 14bis y 41 de la Constitución Nacional Argentina.

Palabras clave

ciclo de vida, materiales constructivos, vivienda social, zonas árido-sísmicas.

ABSTRACT

The objective of this research is to contribute to environmental sustainability in arid zones through the development of a support system for decision making in the different stages in the life cycle (LC) of buildings. To this end, the materials characteristic of the streamlined construction systems of arid seismic zones were analyzed in relation to the associated carbon dioxide emissions during their production, use and final disposal. The results made it possible to determine the level of sustainability of the materials analyzed according to their relative importance in the value chain of construction in an emerging country such as Argentina. Based on this, an early estimation of the energy behavior of social housing can be made, as well as the optimization of said materials according to a comprehensive view of the housing problem in terms of life cycle. Therefore, the tool developed empowers the users of these dwellings, so that they can exercise their right to decent housing and a healthy, balanced and suitable environment for human development, as established in Articles 14bis and 41 of the Argentinian National Constitution.

Keywords

life cycle, construction materials, social housing, arid seismic zones

INTRODUCCIÓN

Las transformaciones vinculadas al cambio en el uso del suelo han dado lugar al incremento de las emisiones de dióxido de carbono y, en consecuencia, al cambio climático (Carpinetti y Esponda, 2013). Garrido Piñero (2015) destaca que la incorporación de la dimensión urbana dentro de la construcción del paradigma del desarrollo sustentable ha cobrado importancia como resultado de las amenazas ambientales asociadas a la alta densidad poblacional y sus respectivos patrones de consumo.

En este contexto, Zabalza Bribián *et al.* (2014) expone que el uso masivo de materiales generalizados a nivel mundial ha causado un incremento notable de los costes energéticos y ambientales de cualquier tipología edilicia. Es decir, el impacto ambiental global del edificio depende de la elección de los materiales para su construcción. Por ello, Carabaño *et al.* (2017) considera necesaria la caracterización de dichos materiales a nivel medioambiental. En este sentido, Corona Bellostas (2016) sugiere que contar con herramientas que permitan cuantificar el nivel de sustentabilidad de los productos y servicios es fundamental para que la actividad humana se desarrolle beneficiosamente, tanto para la sociedad como para la preservación del ambiente.

El análisis del ciclo de vida (ACV) aplicado a productos de construcción y edificios, proporciona información imprescindible para la evaluación de la sustentabilidad ambiental de los mismos. Si bien la fase de uso tiene un gran peso en términos de impacto energético y de emisiones de gases de efecto invernadero, existen grandes oportunidades para la reducción de impactos en las fases anteriores del ciclo de vida (Villar-Burke, 2014). Basbagill *et al.* (2013) y Röck *et al.* (2018) sostienen, en tal sentido, que la realización del ACV en etapas iniciales de diseño permite alcanzar un panorama completo de los impactos ambientales vinculados a la construcción.

Con base en lo antedicho, resulta fundamental garantizar la renovación económica y medioambiental de las viviendas sociales, para alcanzar los compromisos internacionales relativos al cambio climático (López-Mesa *et al.*, 2013). En esa dirección, implementar el *Cradle to Cradle* como paradigma de desarrollo socioeconómico de diseño, implica considerar todos los materiales involucrados en el proceso como nutrientes (Ros García y Sanglier, 2017). Para ello, es preciso incorporar sistemas de "logística inversa", cuyo objetivo sea la recuperación de los materiales de una manera efectiva y eficiente. Por consiguiente,

es ineludible que gobiernos y agencias ambientales elaboren directrices o códigos de construcción y políticas ambientales idóneas (Carabaño, Bedoya y Ruiz, 2014).

Desde este enfoque, se espera que los resultados obtenidos hagan posible optimizar, a partir de la estimación temprana del impacto en el cambio climático de la solución constructiva adoptada, los procesos que intervienen en los modelos de ciclo de vida de los distintos materiales que conforman los sistemas constructivos racionalizados de la oferta edilicia característica de la vivienda social, en zonas árido-sísmicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se define como material sustentable aquel cuyo proceso de extracción, manufactura, operación y disposición final tiene un impacto ambiental bajo o inexistente (sustentabilidad ambiental). Asimismo, su elaboración y distribución es económicamente viable (sustentabilidad económica), en tanto su vida útil no compromete la calidad de vida de los seres vivos que están de alguna manera relacionados con él (sustentabilidad social) (Delgado Castillo y Velázquez Flores, 2012). La Tabla 1 muestra el nivel de sustentabilidad de los distintos componentes arquitectónicos seleccionados para el análisis. Se pone en valor su uso en la materialización de la vivienda de interés social, su importancia relativa en la cadena de valor de los materiales de la construcción en un país en vías de desarrollo como Argentina y los impactos generados durante su producción. Como resultado, se obtiene que los materiales típicos de un sistema constructivo tradicional racionalizado en una zona árida como la ciudad de San Juan presenten un nivel medio de sustentabilidad.

Con base en las normas ISO 14040/2006¹, ISO 14044/2006² e IRAM 21931-1/12, en los siguientes apartados A, B, C y D se expone la forma en que la metodología del ACV es abordada en esta investigación.

A) OBJETIVO Y ALCANCE. Muñoz y Quiroz (2014) señalan que las características del sector de la construcción dificultan la elaboración de un análisis completo de los productos que intervienen en su materialización. Marrero *et al.* (2013), por su parte, exponen que, tanto el impacto energético como las emisiones de CO₂ asociadas a algunas soluciones constructivas, pueden valorarse a partir de la cantidad de energía utilizada para su generación. Para Ali *et al.* (2015), el calentamiento global es uno de los impactos

[1] <https://web.stanford.edu/class/cee214/Readings/ISOLCA.pdf>

[2] <http://wap.sciencenet.cn/home.php?mod=attachment&id=4637>

[3] De acuerdo con Chacón y D'amelio (2015), se entiende por huella de carbono a la cantidad de CO₂ que se genera de tal compuesto en un determinado proceso o actividad.

Componente arquitectónico		Tipo	Espesor (m)	Nivel de sustentabilidad						
				Social	Económica	Ambiental	Valoración			
							Baja	Media	Alta	
PARED		Ladrillo cerámico hueco	0.20		■					
		Ladrillo macizo	0.15	■	■					
		Ladrillón macizo	0.20	■	■					
		Block de hormigón	0.20		■					
		Muro de hormigón	0.20		■					
TECHO		Losa cerámica	0.20		■					
		Maciza (H°A°)	0.12	■	■					
		Liviana (madera)	0.23		■	■				
		Liviana (metálica)	0.15		■					
PISO		Contrapiso y cerámico	0.12	■	■					
		Contrapiso y granítico	0.14		■					
		Contrapiso alisado	0.10	■	■					
		Contrapiso y madera	0.14		■					

Referencias: ■ Sustentabilidad asociada ■ Valoración baja ■ Valoración media ■ Valoración alta

Tabla 1. Materiales característicos de sistemas constructivos tradicionales racionalizados en zonas áridas. Fuente: Elaboración de las autoras.

con mayor influencia negativa sobre el ambiente. En este contexto, se propone la realización de un análisis del ciclo de vida simplificado. De esta forma, se circunscribe el estudio a la cuantificación de la huella de carbono⁴ de los materiales involucrados en la concreción de viviendas sociales en zonas árido-sísmicas, a partir de la adopción de los siguientes criterios de alcance:

- **Límite espacial:** viviendas sociales del Área Metropolitana de San Juan (AMSJ) desarrolladas por el Instituto Provincial de la Vivienda repartición San Juan entre 2010 y 2015.
- **Límite temporal:** de acuerdo con la IRAM 21931-1/12, el ACV propuesto corresponde a una mirada denominada: “de la fábrica a la tumba”.
- **Unidad funcional:** se adopta el metro cuadrado (m²), se considera una vida útil de 50 años y se orienta el estudio a aquellos actores (decisores y ocupantes) que intervienen en el proceso de construcción del hábitat social.
- **Limitaciones:** quedan fuera del análisis la etapa de extracción y procesamiento de la materia prima. Para

el cálculo de la energía incorporada por elemento y de acuerdo con el material que se adopte, se considera que:

1. El transporte (puesto de venta – obra) es realizado por un camión eje simple 4x2, cuya carga útil es de 7 toneladas y consumo estimado, de 6 km/l de gasoil.
2. La distancia promedio desde el punto de venta a la obra es de 4,34 km. La misma se estima considerando las características de la trama urbana AMSJ.
3. Los consumos de energía durante la etapa previa a la entrega se obtienen de fuentes primarias de información.
4. Los consumos de energía en la etapa posterior a la entrega, para climatización, se calculan conforme a las normas IRAM 11604 (calefacción) e IRAM 11659-1 y 2 (refrigeración). Con base en las características urbanas del AMSJ, para la estimación de las emisiones resultantes de transporte en fase de uso, se contempla que, mínimamente, se realizan cuatro viajes al centro de la ciudad por día.

Usuarios: determinación, participación y propósito se detallan en la Tabla 2.

[4] De acuerdo con Chacón y D’amelio (2015), se entiende por huella de carbono a la cantidad

Tipo de usuario	Participación		Propósito del ACV						
	Planificación y diseño esquemático	Diseño detallado y construcción	Operación, reparación y mantenimiento	Demolición	Comparación de diferentes opciones de diseño	Evaluación por comparación de valores de referencia	Comunicación entre las partes interesadas en relación a la inversión/operación del edificio	Mejora continua de la operación	
Inversor/ Cliente/Propietario	■	■	■	■	■	■	■	■	
Diseñador	■	■	■	■	■	■	■	■	
Constructor	■	■			■	■			
Proveedor	■	■			■	■			
Organismo gubernamental	■	■	■	■	■	■	■	■	
Organizaciones no gubernamentales	■	■	■	■	■	■	■	■	
Administrador de instalaciones		■	■			■	■		
Administrador y operador del edificio		■	■			■	■		
Promotor/Agente inmobiliario		■	■			■	■		
Vecino		■	■	■		■	■	■	

Referencias: ■ variable asociada al actor

Tabla 2. Usuarios del ACV – Participación y Propósito Fuente: Elaboración de las autoras.

B) ANÁLISIS DEL INVENTARIO. De acuerdo con el apartado A, esta investigación se corresponde con la cuantificación del CO₂ generado durante la fabricación de los distintos materiales de uso generalizado en la construcción de la vivienda social en zonas árido-sísmico, así como también las emisiones asociadas a la etapa de uso y fin de vida de la misma.

Desde esa perspectiva, se coteja lo que Quispe Gamboa (2016) denomina la “energía incorporada” (“EI”) (etapa previa) y la “energía operativa” (“EO”) (etapa de uso). La energía incorporada corresponde con la energía consumida para el transporte y fabricación de los componentes arquitectónicos por cada metro cuadrado de construcción de los mismos. La energía operativa se extrae de la consideración conjunta de energía necesaria para calefacción y refrigeración y de las emisiones asociadas al transporte durante la vida útil de la vivienda. La etapa de fin de vida se mide a partir de las emisiones asociadas al transporte de los residuos de la construcción y demolición, desde la obra hasta el vertedero.

Con base en lo anterior, la cuantificación del CO₂ se obtiene de:

$$\text{Emisiones totales de vivienda} = EI_T + EO + T_{DF} \text{ [Kg CO}_2 \text{ eq/kWh]}$$

$$EI_T = (EI_{TPM} * FE) + (EI_{TTM} * FE) \text{ [kg CO}_2 \text{ eq/kWh]}$$

$$EO = (E_r * FE) + (E_c * FC * FE) + T \text{ [kg CO}_2 \text{ eq/kWh]}$$

$$T_{DF} = (C_{cc} * FC * FE) * C_{VFD} \text{ [kg CO}_2 \text{ eq/kWh]} EI_{TPM} = \sum EI_i * m_i \text{ [kWh]}$$

$$EI_{TTM} = Com_{nec} * FC \text{ [kWh]}$$

$$T = [(C_{ca} * C_{vd}) * V_{UJ}] * FC * FE \text{ [kg CO}_2 \text{ eq/kWh]}$$

$$Com_{nec} = C_{cc} * C_v \text{ [l]}$$

$$C_v = Cap_{CT} / Sup_{MT}$$

$$C_{VFD} = \text{volumen vivienda/volumen contenedor}$$

$$Cap_{CT} = C_{cac} / (\text{masa} * Sup_{MT}) \text{ [m}^2\text{]}$$

$$C_{ca} = Dc / A_a \text{ [l]}$$

$$C_{cc} = D / A_c \text{ [l]}$$

$$C_{vd} = D_L * V_{dp}$$

Donde:

- A_a: Autonomía automóvil familiar (0.734km/l⁵).
- A_c: Autonomía camión (6 km/l).
- C_{ca}: Consumo combustible automóvil familiar.
- C_{cc}: Consumo combustible camión.
- C_{cac}: Capacidad de carga admisible del camión (7000 kg).
- Cap_{CT}: Capacidad de carga del camión en m² a transportar.
- Com_{nec}: Combustible necesario para el transporte de materiales al punto de venta/obra.
- C_v: Cantidad de viajes necesarios para transportar el material a la obra.
- C_{vd}: Cantidad de viajes diarios.
- C_{VFD}: Cantidad de viajes necesarios para transportar el material al vertedero⁶.
- D: Distancia para transportar el material a la obra/vertedero.

[5] Corresponde al promedio de la autonomía de los vehículos familiares más vendidos. Fuente: <http://www.lavoz.com.ar/autos/los-que-gastan-menos>.

[6] Volumen aproximado contenedor 5m3.

Combustible	Unidades de medida física	Factor de conversión		Factor de emisión CO2 eq/kWh (Kg de	
Gas natural	Nm3	10,7056	kWh/Nm3	0,2016	Kg de CO2 eq/kWh
Gasóleo	Litros	10,6	kWh/l	0,2628	Kg de CO2 eq/kWh
Electricidad	kWh	-	-	0.385	Kg de CO2 eq/kWh

Tabla 3. Factores de conversión y emisión utilizados en el estudio. Fuente: Elaboración de las autoras con base en datos del Fondo Europeo de Desarrollo Regional⁷.

D_c: Distancia de la obra al centro de la ciudad en km.
 D_L: Días laborales anuales (aproximadamente 246).
 E_c: Energía necesaria calefacción. Se obtiene al aplicar la norma IRAM 11604 (Q)
 E_r: Energía necesaria refrigeración. Surge al aplicar la norma IRAM 11659 (Q_R)
 E_i: Energía incorporada de los elementos que componen los distintos paquetes constructivos⁸.
 E_T: Energía incorporada total.
 E_{TPM}: Energía incorporada total para la producción de materiales.
 E_{TTM}: Energía incorporada total para el transporte de materiales.
 EO: Energía operativa.
 FC: Factor de conversión.
 FE: Factor de emisión.
 Sup_{MT}: Superficie del material a transportar.
 T_{DF}: Transporte disposición final.
 V_{dp}: Viajes diarios promedio de una familia tipo (aproximadamente 4).
 V_U: Vida útil de la vivienda (50 años).

La Tabla 3 sintetiza los factores de emisión utilizados en cada caso.

C) EVALUACIÓN DE IMPACTOS. El cálculo de los impactos respectivos se realiza conforme a la siguiente expresión:

$$CCI = \sum GWP_i \times m_i \text{ [Kg CO}_2\text{]}$$

Donde:

CCI⁹: Indicador de cambio climático.
 GWP_i: Potencial de calentamiento global= 1 (horizonte temporal de 100 años)¹⁰

m_i: Masa de la substancia i.
 Peso Unitario¹²: su valor se obtiene del CIRSOC 101-Reglamento Argentino de Cargas Permanentes y Sobrecargas Mínimas de Diseño para Edificios y Otras Estructuras (2005)¹³.

D) INTERPRETACIÓN. La Tabla 4 expone los componentes arquitectónicos clasificados de acuerdo con su transmitancia térmica (K). Se entiende por "recomendable" aquellas combinaciones de materiales cuyo K corresponde al nivel C de las normas IRAM 11603, 11604 y 11605. La opción "aceptable" es aquella que se relaciona con la práctica constructiva habitual de una ciudad de clima árido como San Juan. Al incluir la transmitancia térmica del componente se hace referencia a la etapa de uso de la vivienda, como también a la etapa previa.

MATRIZ DE OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO

Para Quispe Loyola (2017), el proceso de toma de decisiones comienza con la identificación y definición del problema y culmina con la elección de una alternativa. Cuando el número de alternativas es infinito el problema es calificado como "decisión multiobjetivo". Por el contrario, cuando el conjunto de alternativas es finito se trata de una "decisión multicriterio discreta" (Hurtado, 2005). Dentro de estos últimos se encuentra el llamado "proceso analítico jerárquico" (PAJ).

Celemín (2014) destaca que el PAJ divide una decisión compleja en un conjunto de decisiones simples, como resultado de crear una matriz cuadrada, en la que el número

[7] <https://www.camarazaragoza.com/wp-content/uploads/2012/10/calculoemisiones.xls>

[8] Su valor se obtiene de Quispe Gamboa (2016).

[9] Véase: Antón Vallejo (2004).

[10] IPCC (2014).

[11] El factor de conversión utilizado es: 1kN/m³= 102kN/m². Fuente: <https://www.convert-me.com/es/convert/pressure/knmsq.html?u=knmsq&v=1>

[11] Fuente: <https://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/101/reglamento/Reglamento-cirsoc101-completo.pdf>

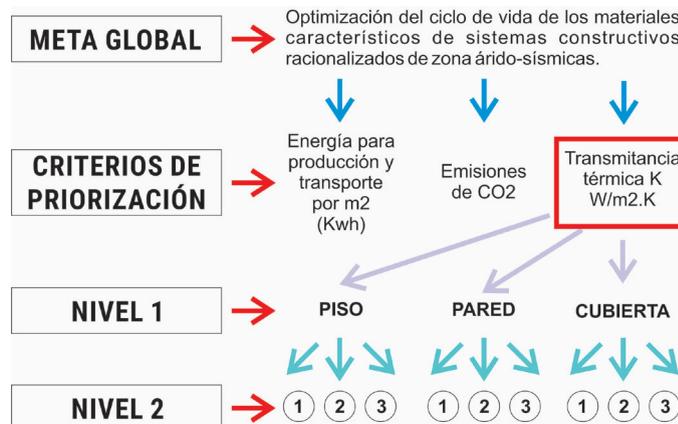
[12] El factor de conversión utilizado es: 1kN/m³= 102kN/m². Fuente: <https://www.convert-me.com/es/convert/pressure/knmsq.html?u=knmsq&v=1>

[13] Fuente: <https://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/101/reglamento/Reglamento-cirsoc101-completo.pdf>

Caracterización de los recursos materiales							Energía incorporada							Indicadores térmicos				
Componente	Tipo	Espesor (m)	Superficie (m ²)	Peso Unitario		Masa (kg)	CCI (kg CO ₂)	E _i (kWh/kg)	E _{ITPM} (kWh)	Cap.ct (m ²)	Distancia al punto de venta (km)	Viajes necesarios	Com _{Nec.} (l)	E _{ITM} (kWh)	E _{IT} (kg CO ₂ eq)	Resistencia térmica m ² C/W	Transmitancia térmica K/W.m ² .K	IRAM 11605 Zona bioambiental III
				kN/m ³	kN/m ²													
Pared	Ladrillo Cerámico Hueco	0.20	1	12	2.4	244.8	244.8	1	244.8	28.6	8.6	0.035	0.0501	0.53	94.4	0.69	1.45	Nivel C - Mínimo
	Ladrillón macizo	0.20	1	17	3.4	346.8	346.8	1	346.8	20.2	8.6	0.0495	0.071	0.75	133.7	0.39	2.59	
	Block de hormigón	0.20	1	15	3	306	306	0.55	168.3	22.9	8.6	0.0437	0.0627	0.66	65.0	0.39	2.54	No verifica
	Muro de hormigón	0.20	1	25	5	510	510	0.5	255	13.7	8.6	0.0729	0.1044	1.11	98.5	0.32	3.12	
Cubierta	Losas cerámica	0.08	1	22	1.76	179.52	434.52	33.7	14643	16.1	8.6	0.0621	0.089	0.94	5637.9	0.89	1.13	No verifica
		0.20		-	-	255												
	Losas macizas (H°A°)	0.08	1	22	1.76	179.52	460.02	33.1	15227	15.2	8.6	0.0657	0.0942	1.00	5862.5	0.59	1.69	No verifica
		0.11		25	2.75	280.5												
Madera y tejas	0.28	1	-	0.9	0.9	0.9	4.92	4.428	7777.8	8.6	0.0001	0.0002	0.00	1.7	1.49	0.67	Nivel C - Mínimo	
Metálica	0.15	1	-	0.04	0.04	0.04	19.4	0.776	175000	8.6	6E-06	8E-06	0.00	0.3	0.35	2.87	No verifica	
Pisos	Contrapiso alisado	0.10	1	17	1.04	106.08	106.08	0.2	21.216	66.0	8.6	0.0152	0.0217	0.23	8.2	0.32	3.12	No corresponde según IRAM 11605
	+ Granítico	0.04	1	-	0.6	106.68	106.68	0.5	74.556	65.6	8.6	0.0152	0.0218	0.23	28.8	0.45	2.22	
	+ Cerámico	0.02	1	-	0.2	106.28	106.28	3.2	361.31	65.9	8.6	0.0152	0.0218	0.23	139.2	0.25	4.05	
	+ Madera	0.04	1	-	0.25	106.33	106.33	4.22	469.93	65.8	8.6	0.0152	0.0218	0.23	181.0	0.44	2.29	

Referencias: ■ Recomendable ■ Aceptable ■ No Sustentable

Tabla 4. Valoración de los componentes arquitectónicos en relación con las emisiones de CO2 generadas, CCI y la Norma IRAM 11603, 11604 y 11605. Fuente: Elaboración de las autoras.



La MOM permite obtener el impacto de la vivienda social de zona árido-sísmica en relación con el cambio climático. Para ello, deberán completarse los ítems que se indican en rojo, lo cual requiere conocer las características constructivas y geométricas de la vivienda, además de su ubicación. El criterio para el llenado de la matriz es el siguiente:

- Coeficiente de validez: completar con 1 la opción que corresponda al componente constructivo considerado.
- Ponderación nivel 2: ponderaciones obtenidas en el PAJ y estandarizadas en relación con el nivel 1.
- Puntaje obtenido: sumatoria de las ponderaciones correspondientes a cada nivel.
- Tipo: este dato debe ser completado por el evaluador a partir de lo expuesto en la Tabla 7.
- Emisiones totales del barrio: surge del producto entre las emisiones de CO₂ de la vivienda por la cantidad de viviendas contempladas dentro del emprendimiento urbano.

TIPO	PUNTAJE OBTENIDO	
Recomendable	≥ 66.93	
Aceptable o habitual	≤ 66.92	≥ 5.14
No sustentable	≤ 5.13	

Tabla 7. Ponderación por tipo. Fuente: Elaboración de las autoras.

Dado que los puntajes están estandarizados al nivel 1, en ningún caso se obtienen valores superiores a 66.93 (Tabla 7). Ello se debe a que ninguna de las opciones posibles para los distintos componentes constructivos analizados corresponde al nivel A de la norma IRAM 11601 y 11605 (100% del nivel). Dicha situación hace posible incorporar soluciones constructivas más sustentables. Consecuentemente, se puede afirmar que la MOM es dinámica y permite una valoración rápida del comportamiento ambiental de la vivienda desde la etapa de diseño.

RESULTADOS

Para la aplicación de la MOM, se toma como caso de estudio cuatro viviendas desarrolladas en el AMSJ (Figura 2). Dichas viviendas fueron ejecutadas por el IPV – San Juan entre 2010 – 2015, en los barrios Valle Grande (Rivadavia), Los Horcones (Rawson), El Prado (Chimbas) y Huarpes (Rawson). La Tabla 8 sintetiza los resultados alcanzados en la evaluación.

La Tabla 8 expone las emisiones de CO₂ totales a lo largo de toda la vida útil de las viviendas evaluadas, así como



Figura 2. Distribución espacial de los Barrios analizados. Fuente: Elaboración de las autoras con base en Google Maps.

también las del emprendimiento urbano al que pertenecen. Como resultado, se obtiene que las emisiones de CO₂ del hábitat social de una zona árido-sísmica son de 683.704,79 kgCO₂eq/kWh. La materialización de las viviendas analizadas corresponde a la práctica constructiva generalizada, por tanto, si bien dista de ser una resolución sustentable, se la clasifica como “aceptable”.

De los valores promedio, se extrae que el mayor porcentaje de emisiones se vincula con la EO. Si se correlaciona dicho valor con el de EI_T, se obtiene que EI_T se corresponde con un 94,13% de EO, en tanto para “fin de vida” la relación se establece en el orden del 0,04%. Si se consideran las emisiones totales por vivienda, tendríamos que la EO posee una incidencia sobre el resultado final del 51.5%, en tanto a la EI_T corresponde el 48,48% y al “fin de vida”, el 0,02%.

A los efectos de direccionar las estrategias de mejora y optimizar el ciclo de vida de los materiales constructivos de la vivienda social en zonas árido-sísmicas, se plantean cinco escenarios posibles: muy favorable, favorable, base, desfavorable y muy desfavorable. Al escenario “base” corresponden los valores promedio alcanzados en la MOM, mientras que los escenarios “muy favorable” y “favorable” presentan reducciones en las emisiones totales en el orden del 50¹⁵ y 25%, respectivamente. Los escenarios “desfavorable” y “muy desfavorable” implican incrementos de CO₂ del 25 y el 50%. La Tabla 9 muestra los resultados obtenidos en cada caso.

[15] Esto, en coherencia con el objetivo propuesto para 2050 en el Acuerdo de París. Fuente: <https://www.europapress.es/sociedad/medio-ambiente-00647/noticia-28-pactan-defender-reduccion-global-co2-50-cumbre-clima-paris-20150918140207.html>

Barrio	Cantidad de viviendas	CCI	EI _T	Puntaje	EO	Fin de vida	Emisiones totales vivienda (kg CO ₂ e _q)	Emisiones totales barrio (kg CO ₂ e _q)	Tipo
Los Horcones	110	73693.66	340724.1	11.2	333227.8	125.99	674077.86	74148564.9	2
Valle Grande	1000	73013.71	347373.5	11.2	405905.56	46.1011	753325.13	753325132.8	2
Huarpes	286	65190.47	301126.5	11.2	345535.9	86.5906	646749	184970214.4	2
El Prado	48	70996.17	336617.8	11.2	323778.6	270.808	660667.16	31712023.8	2
Valores promedio		70723.5	331460.5	11.2	352112	132.373	683704.79	261038984	2

Tabla 8. Síntesis de los resultados por barrio. Fuente: Elaboración de las autoras.

	Escenarios					
	Muy favorable	Favorable	Base	Desfavorable	Muy desfavorable	
Emisiones totales	100	341852,4	512778,6	683704,8	1025557	1025557
EO	51,5	176056	264084	352112	528167,9	528167,9
EIT	48,5	165730,2	248595,3	331460,5	497190,7	497190,7
Fin de vida	0,02	66,18626	99,27939	132,3725	198,5588	198,5588

Tabla 9. Síntesis de los resultados por escenarios. Fuente: Elaboración de las autoras.

La MOM se ha diseñado con el fin de ser utilizada como una herramienta de apoyo a la decisión en instancias iniciales del proyecto arquitectónico, ya que su uso facilita la estimación rápida y expeditiva del perfil ambiental de la vivienda a lo largo de toda su vida útil. La manipulación predictiva de los datos de entrada de la MOM permite la selección de soluciones constructivas y de emplazamiento con menores impactos ambientales. Al respecto, la Tabla 9 establece la línea base de la práctica constructiva habitual del hábitat social en zona árido-sísmica, al tiempo que direcciona las modificaciones proyectuales, o bien, las estrategias de mejora, conforme a los valores límites establecidos para cada escenario.

CONCLUSIONES

La MOM se basa en la estimación temprana, a lo largo de su ciclo de vida, de las emisiones de CO₂ asociadas a la materialización y emplazamiento de la vivienda social en zona árido-sísmica. A los efectos de facilitar la evaluación en etapa de diseño, se excluye la influencia en el análisis de carpinterías y revoques, dado que su inclusión excede los alcances de este estudio. No obstante, la MOM permite incorporar a futuro, el análisis de dichos parámetros, así como también otras opciones constructivas que resulten apropiadas y sean generalizables a zonas árido-sísmicas. Desde ese punto de vista, su uso aporta a la mejora continua de dichos sistemas constructivos.

En relación con los resultados alcanzados para los distintos casos de estudio analizados, se concluye que los criterios que sustentan la materialización de la vivienda social en la actualidad se encuentran fuertemente enraizados en variables de índole económica que desestiman parámetros ambientales y de confort higrotérmico. En este sentido, se observa que las soluciones constructivas son monótonas, reiterativas y generalizadas. Es decir, que distintos emplazamientos urbanos presentan las mismas resoluciones tecnológicas y funcionales, de manera que el perfil ambiental de las viviendas estudiadas no se corresponde con los avances normativos en sustentabilidad edilicia desarrollados tanto a nivel mundial como nacional. Así, optimizar los materiales constructivos en zonas árido-sísmicas implica una mirada integral de la problemática habitacional en términos de ciclo de vida.

De igual forma, se detecta que dentro del hábitat social existente las estrategias de mejora posibles son de tipo comportamentales, o bien, de sistemas con mayor eficiencia energética. Al respecto, educar al usuario en materia de uso racional de la energía, eficiencia energética y ciclo de vida constituye un camino para empoderar a los mismos, en aras de que puedan ejercer su derecho a una vivienda digna y a un ambiente sano, equilibrado y apto para el desarrollo humano, tal como lo establecen los artículos 14bis y 41 de la Constitución Nacional Argentina.

FUTURAS INVESTIGACIONES

Los resultados obtenidos se contrastarán, a futuro, con softwares específicos de LCA, tales como OPEN LCA y de análisis multiobjetivo. La aplicación de los mismos requiere de conocimientos cuya profundidad escapan a los alcances de esta investigación, además de requerir de bases de datos en relación con los impactos ambientales asociados a la edificación que, hasta el momento, no se han desarrollado para Argentina.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se enmarca en el proyecto titulado "Optimización del Ciclo de Vida de los Materiales Constructivos de zonas árido-sísmicas" 1° Etapa, Convocatoria 2016-2017, Res. N°86/16-CD-FAUD y 2° Etapa, Convocatoria 2017-2018, Res. N°058/17-CD-FAUD. Se agradece al Instituto de Estudios en Arquitectura Ambiental (INEAA) por ser la institución en que se realizó la investigación y a la Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño (FAUD) de la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), por financiar la misma.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, Ahmed; NEGM, Adbelazim; BADY, Mahmoud e IBRAHIM, Mona. Environmental life cycle assessment of a residential building in Egypt: A case study, *Procedia Technology* [en línea], 2015, vol. 19, pp. 349-356. [Consultado 8 de agosto 2018]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/82527681.pdf>

ANTÓN VALLEJO, Asunción. *Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo*. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) (España), 2004.

BASBAGILL, John; FLAGER, Forest; LEPECH, Michel y FISCHER, Martin. Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts, *Building and Environment*, 2013, vol. 60, pp. 81-92.

CARABAÑO, Rocío; BEDOYA, César y RUIZ, Diego. La metodología del análisis de ciclo de vida para la evaluación del impacto ambiental en el sector de la construcción: Estado del arte [en línea]. En: *I Congreso Internacional sobre investigación en Construcción y Tecnología Arquitectónicas*. Universidad Politécnica de Madrid. ETSAM. [Consultado 8 de octubre de 2018]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/263357247_La_metodologia_del_analisis_de_ciclo_de_vida_para_la_evaluacion_del_impacto_ambiental_en_el_sector_de_la_construccion_Estado_del_arte. 2014.

CARABAÑO, Rocío; HERNANDO, Susana; RUIZ, Diego y BEDOYA, César. Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de los materiales de construcción para la evaluación de la sostenibilidad en la edificación: el caso de los materiales de aislamiento térmico, *Revista de la Construcción* [en línea], 2017, vol. 16, n° 1, pp. 22-32. DOI: <http://dx.doi.org/10.7764/RDLC.16.1.22>.

CARPINETTI Bruno y ESPONDA, Alejandra. *Introducción al desarrollo sustentable*. 2a ed. Buenos Aires: Universidad Nacional Arturo Jauretche, 2013.

CELEMÍN, Juan Pablo. El proceso analítico jerárquico en el marco de la evaluación multicriterio: un análisis comparativo, *Geografía y Sistemas de Información Geográfica* (GEOSIG), 2014, año 6, n° 6, pp. 47-63.

CHACÓN, Mercedes Andrea y D'AMELIO, Aldana Florencia. Estudio comparativo del impacto ambiental de una vivienda convencional y de una vivienda sustentable en la etapa de la construcción. Avances y estado de situación en análisis de ciclo de vida y huellas ambientales en argentina. En: *Actas del IV Encuentro Argentino de Ciclo de Vida y III Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica – ENARCIV*, 2015, pp. 73-75.

CORONA BELLOSTAS, Blanca. *Análisis de Sostenibilidad del Ciclo de Vida de una Configuración innovadora de Tecnología Termosolar* [en línea]. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Ingeniería Química Industrial y Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. [Consultado 8 de agosto 2018]. Disponible en: http://oa.upm.es/43813/1/BLANCA_CARMEN_CORONA_BELLOSTAS.pdf. 2016.

DELGADO CASTILLO, Carlos y VELÁZQUEZ FLORES, Gerardo. *Materiales de Construcción Sustentables en México: Políticas Públicas y Desempeño Ambiental*. En: *X Seminario Itinerante del Campo Estratégico de Acción en Pobreza y Exclusión del Sistema Universitario Jesuita*. México: Universidad Iberoamericana, 2012, pp. 1-53.

GARRIDO PIÑERO, Julia. *Metodología de Evaluación y Minimización del Impacto Medioambiental de tipologías residenciales de vivienda colectiva en la ciudad de Sevilla*. Tesis Doctoral. Departamento de Construcciones arquitectónicas. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad de Sevilla, 2015.

HURTADO TOSKANO, Bruno. *El proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la Selección de Proveedores* [en línea]. Tesis Digitales UNMSM. [Consultado 8 de agosto 2018]. Disponible en: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/monografias/basic/toskano_hg/contenido.htm. 2005.

IPCC. Fifth Assessment Report. *Global Warming Potential Values* [en línea], 2014. [Consultado 8 de agosto 2018]. Disponible en: http://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf.

IRAM 11601. *Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario*. UNSJ. Biblioteca de la Facultad de Ingeniería. Instituto de Mecánica Aplicada. Norma. Argentina, 2002.

IRAM 11603. *Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina*. UNSJ. Biblioteca de la Facultad de Ingeniería. Instituto de Mecánica Aplicada. Norma. Argentina, 2012.

IRAM 11604. *Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en calefacción. Coeficiente volumétrico G de pérdidas de calor. Cálculo y valores límites*. UNSJ. Biblioteca de la Facultad de Ingeniería. Instituto de Mecánica Aplicada. Norma. Argentina, 2001.

IRAM 11605. *Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos.* UNSJ. Biblioteca de la Facultad de Ingeniería. Instituto de Mecánica Aplicada. Norma. Argentina, 1996.

IRAM 11659-1. *Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración. Parte 1: Vocabulario, definiciones, tablas y datos para determinar la carga térmica de refrigeración.* UNSJ. Biblioteca de la Facultad de Ingeniería. Instituto de Mecánica Aplicada. Norma. Argentina, 2004.

IRAM 11659-2. *Acondicionamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración. Parte 2: Edificios para viviendas.* UNSJ. Biblioteca de la Facultad de Ingeniería. Instituto de Mecánica Aplicada. Norma. Argentina, 2007.

IRAM 21931-1/12. *Construcción sostenible. Marco de referencia para los métodos de evaluación del desempeño ambiental de las obras de construcción. Parte 1- Edificios.* UNSJ. Biblioteca de la Facultad de Ingeniería. Instituto de Mecánica Aplicada. Norma. Argentina, 2012.

LÓPEZ-MESA, Belinda; PALOMERO CÁMARA, José; ORTEGA ZAPATA, Agustín y DEL AMO SANCHO, Alejandro. La rehabilitación y la mejora de la eficiencia energética de la vivienda social a examen, *Monografías de la Revista Aragonesa de Administración Pública*, 2013, vol. XV, pp. 283-319.

MARRERO, Madelyn; MARTÍNEZ-ESCOBAR, Luna; MERCADER, Pilar y LEIVA, Carlos. Minimización del impacto ambiental en la ejecución de fachadas mediante el empleo de materiales reciclados, *Informes de la Construcción* [en línea], 2013, vol. 65, n° 529, pp. 89-97. DOI: 10.3989/ic.11.034.

MUÑOZ SANGUINETTI, Claudia y QUIROZ ORTIZ, Francisco. Análisis de Ciclo de Vida en la determinación de la energía contenida y la huella de carbono en el proceso de fabricación del hormigón premezclado. Caso estudio planta productora Región del Bío-Bío, Chile, *Revista Hábitat Sustentable*, 2014, vol. 4, n° 2, pp. 16-25.

QUISPE GAMBOA, Claudia N. *Análisis de la Energía Incorporada y Emisiones de CO₂ aplicado a viviendas unifamiliares de eficiencia energética* [en línea]. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Cataluña Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona Máster en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente, 2016. [Consultado 8 de agosto 2018]. Disponible en: <https://www.aie.webs.upc.edu/maema/wp-content/uploads/2016/10/Quispe-Gamboa-Claudia-Nataly.pdf>

QUISPE LOYOLA, César. *Aplicación del proceso analítico jerárquico (AHP) en la selección de un marco de referencia para gestionar los proyectos de una empresa consultora.* Tesina. Universidad Nacional Mayor de San Marcos Facultad de Ciencias Matemáticas E.A.P. de Investigación Operativa. Lima, Perú, 2017.

ROS GARCÍA, Juan y SANGLIER CONTRERAS, Gastón. Análisis del Ciclo de Vida de una Unidad Prototipo de Vivienda de Emergencia. La búsqueda del impacto nulo. *Informes de la Construcción* [en línea], 2017, vol. 69, n° 547, p. e211. DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.16.035>. 2017.

RÖCK, Martin; HOLLBERG, Alexander; HABERT, Guillaume y PASSER, Alexander. LCA and BIM: Integrated assessment and visualization of building elements' embodied impacts for design guidance in early stages. En: *25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference, 2018, Copenhagen, Denmark Procedia CIRP 69* [en línea], 2018, pp. 218-223. [Consultado 8 de agosto 2018]. Disponible en: https://ac.els-cdn.com/S2212827117308636/1-s2.0-S2212827117308636-main.pdf?_tid=61036bbc-08a3-4bc0-902a



MÉTODOS DE EVALUACIÓN OPTO-TÉRMICA DE MATERIALES Y COMPONENTES DE LA ENVOLVENTE EDILICIA. SITUACIÓN EN ARGENTINA

OPTO-THERMAL METHODS FOR EVALUATING BUILDING ENVELOPE MATERIALS AND COMPONENTS: THE SITUATION IN ARGENTINA.

AYELÉN MARÍA VILLALBA

Doctora en Medio Ambiente Visual e Iluminación Eficiente
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) -
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE), Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-6401-7085>
avillalba@mendoza-conicet.gob.ar

NOELIA LILIANA ALCHAPAR

Doctora en Ciencias. Área Energías Renovables.
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0003-2682-316>
nalchapar@mendoza-conicet.gob.ar

ERICA NORMA CORREA

Doctora en Ciencias. Área Energías Renovables
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0003-1690-076X>
ecorrea@mendoza-conicet.gob.ar

ANDREA ELVIRA PATTINI

Doctora en Medio Ambiente Visual e Iluminación Eficiente
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0001-6305-1268>
apattini@mendoza-conicet.gob.ar

LEONARDO SANTONI

Ingeniero Agrónomo
Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina
lejsantoni@gmail.com

RESUMEN

La Agencia Internacional de Energía, en su informe de fachadas energéticamente eficientes, sostiene que las envolventes edilicias tienen un rol fundamental en la tarea de determinar los niveles de confort térmico y visual, y los consumos de energía para el acondicionamiento termo-lumínico de los espacios habitables. En este marco, el presente trabajo tiene por objeto realizar una revisión del estado de la evaluación opto-térmica de materiales y componentes de la envolvente edilicia, con relación al contexto de transferencia y a las posibilidades de desarrollo tecnológico en Argentina, para la estimación de propiedades e indicadores energéticos de la envolvente edilicia.

La revisión muestra que, para efectivizar el ahorro energético derivado de la implementación de programas de certificación energética, es imperativo contar con bases de datos del comportamiento opto-térmico de materiales y tecnologías locales; y que, en el contexto socio-económico de los países en vías de desarrollo, esto demanda la exploración de metodologías de bajo costo.

Palabras clave

materiales, fachadas, metodología, índices, entorno

ABSTRACT

The International Energy Agency, in its report on energy efficient building facades, maintains that building envelopes play a fundamental role in determining thermal and visual comfort and energy consumption for indoor lighting and thermal conditioning. Within this framework, the goal of this article is to conduct a review of the opto-thermal evaluation of building envelope materials and components, regarding the state of transfer and possibilities for technology development in Argentina, in order to estimate the thermal and optical properties and energy indicators of building envelopes. This review shows that for energy-savings resulting from the implementation of energy certification programs to be effective, it is imperative to have databases on the opto-thermal behavior of local materials and technologies. It also demonstrates that in the socioeconomic context of developing countries, this requires the study of low-cost methods.

Keywords

materials, facades, methodology, indices, environment

INTRODUCCIÓN

El sector de la energía está actualmente en un periodo de cambio y reflexión. Las fuentes de energía convencionales son contaminantes y limitadas, por ello se hace imprescindible el rápido desarrollo de sistemas limpios y sostenibles. El aumento en la demanda de combustibles fósiles empleados para generar energía es cada vez mayor, lo que resulta en emisiones de dióxido de carbono y otras partículas contaminantes. En los últimos veinte años, el consumo mundial de energías primarias creció un 45% (BP, 2011) y las emisiones de dióxido de carbono se incrementaron, entre 1993 y 2011, en un 44% (World Energy Resources, 2013). En el año 2017, el consumo de energía primaria aumentó un 2.2%, frente al 1.2% de 2016, y fue el más importante desde 2013. En la más reciente década, el promedio del crecimiento anual fue de 1,7%, mientras que solo el año 2017, las emisiones de dióxido de carbono registraron un aumento del 1,6%, después de un reducido crecimiento observado entre 2014 y 2016 (BP, 2018). La excesiva presencia de estas partículas en la atmósfera terrestre intensifica el efecto invernadero, generando un aumento en la temperatura terrestre que conlleva al calentamiento global y al cambio climático. Aunque el sector edilicio consume entre el 30 y el 40% del total de energía a nivel mundial y genera una significativa cantidad de las emisiones de dióxido de carbono (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007; Pérez-Lombard, Ortiz y Pout, 2008), representa una de las áreas con mayor potencial de ahorro energético (International Energy Agency, 2011).

La IEA (Agencia Internacional de Energía), en su informe de fachadas energéticamente eficientes, sostiene que las envolventes edilicias -parte del edificio que conforma la barrera térmica y lumínica primaria entre el exterior y el interior- tienen un rol fundamental en la labor de determinar los niveles de confort térmico y visual, y los consumos de energía para el acondicionamiento termo-lumínico de los espacios habitables. Siendo uno de los puntos fundamentales avanzar en la disminución del consumo energético edilicio, es evidente la necesidad de disponer indicadores energéticos precisos que caractericen el comportamiento termo-lumínico de los materiales y componentes de la envolvente edilicia (IEA, 2013).

Desde los gobiernos centrales, regionales y locales se está legislando para incentivar el uso de energías renovables a nivel edilicio y urbano. Este esfuerzo inversor, cuando está bien canalizado, lleva a las empresas a recurrir a la investigación para el desarrollo de materiales, componentes o sistemas que hagan viable económicamente el uso de estas nuevas tecnologías que contribuyen a la mejora de la eficiencia edilicia.

En este marco, el presente trabajo propone como objetivo general realizar una revisión del estado de la evaluación opto-térmica de materiales y componentes de la envolvente edilicia, en relación al contexto de transferencia

y a las posibilidades de desarrollo tecnológico en la Argentina, para la estimación de propiedades e indicadores energéticos de la envolvente edilicia. La hipótesis postula que el conocimiento y la adaptación de metodologías, con rigurosidad técnica, ajustadas al contexto tecnológico, productivo, económico y social nacional, permiten efectivamente avanzar sobre la caracterización local de materiales de la envolvente, fomentando el desarrollo de tecnologías y mejorando su eficiencia energética.

Este estudio se enmarca en una línea de investigación en desarrollo dentro del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE), que desde hace 10 años trabaja intensamente en la caracterización de materiales de construcción y sistemas de fachadas con el objetivo de alcanzar la eficiencia energética edilicia (Alchapar y Correa, 2015; Alchapar, Correa y Cantón, 2014; Alchapar y Correa, 2016; Villalba et al., 2017; Pattini et al., 2015; Mercado et al., 2013).

CONTEXTO DE TRANSFERENCIA

INTERNACIONAL

A nivel internacional, existe una creciente solicitud de servicios de certificación energética de componentes y tecnologías de la envolvente por parte de los profesionales y la industria de la construcción. Este crecimiento de la demanda se evidencia en el mercado internacional de tecnologías edilicias energéticamente eficientes, que hasta el 2014 era 307 mil millones de dólares, de los cuales 68 mil millones de dólares provenían de la aplicación de estrategias de rehabilitación edilicia (Navigant Research, 2018; Business Wire, 2014). Cabe destacar que el mayor segmento del mercado de la construcción energética eficiente es el de las tecnologías y materiales de la envolvente edilicia (Navigant Research, 2014). Esto se debe a que entidades gubernamentales y de servicios públicos otorgan incentivos y rebajas en los costos de energía cuando se aplican tecnologías y materiales eficientes energéticamente.

El principal mercado de edificios con eficiencia energética mejorada es Europa Occidental, el que ha sido impulsado por los altos precios de la energía y los estrictos códigos de construcción respecto a la eficiencia energética. América del Norte y la región de Asia y el Pacífico son también mercados con una creciente importancia. Por ejemplo, el mercado de materiales aislantes de China ha experimentado un rápido incremento desde el año 2000, con tasas de crecimiento anual promedio que superan el 15%, entre 2006 y 2010; concretamente, durante el mismo período, la cuota del mercado para el vidrio de baja emisividad aumentó del 1.3% al 7% (Zhou, 2014).

En esta misma línea, la integración de tecnologías y equipos de mayor eficiencia energética en los edificios puede reducir aún más el uso de energía del sector. Así,

Laboratorio / Empresa Internacional	Propiedad	Norma	Ciudad, país
NKUA	albedo	ASTM E903-12	Athens, Greece
TIPEE		ASTM E903-12; ASTM C1549-09	Lagord, Francia
EELab		ASTM E903-12; ASTM C1549-09. ASTM1371	Modena, Italy
Architectural Testing / Intertek		ASTM C1549; E1918; TILE&CRRC-1; TILE TEMPLATE METHOD. ASTM C1371; SLIDE METHOD	Wisconsin, EEUU
PRI Construction Materials Technologies, LLC	albedo	ASTM C1549; E1918; TILE&CRRC-1; TILE TEMPLATE METHOD. ASTM C1371; SLIDE METHOD	Florida, EEUU
R&D Services, Inc.	emisividad	ASTM C1549; TILE&CRRC-1; TILE TEMPLATE METHOD. ASTM C1371; SLIDE METHOD	Tennessee, EEUU
Momentum Technologies International		ASTM C1549; E1918; TILE&CRRC-1; TILE TEMPLATE METHOD. ASTM C1371; SLIDE METHOD	Ohio, EEUU
Underwriters Laboratories, Inc. (UL)		ASTM C1549; TILE&CRRC-1; TILE TEMPLATE METHOD. ASTM C1371; SLIDE METHOD	Illinois, EEUU
Intertek	U - v a l u e ; SHGC; VT	NFRC 102; NFRC 201; NFRC 202	EEUU
Quast Consulting & Testing			Mosinee, WI, EEUU
National Certification Testing Laboratory		NFRC 102	Northwest Pennsylvania EEUU
Fenestration Testing Laboratory			Medley, FL, EEUU
Element Materials Technology	U-value		EEUU; Europa
CLEB Laboratory, Inc			EEUU; Canadá
ViPAC Engineers & Scientists		AS2047	Australia
VTT Technical Research Centre of Finland Ltd.		EN ISO 12567-1 - EN 673	Finlandia

Tabla 1. Detalle de laboratorios y empresas en Oceanía, América del Norte y Europa que brindan servicios de caracterización óptica, de acuerdo a norma de referencia y lugar de radicación. Fuente: Elaboración de las autoras.

en los Estados Unidos, el uso combinado de paredes, ventanas y HVAC (sistemas de climatización) más eficientes energéticamente, en 5 años reducirían la demanda de energía primaria para refrigeración residencial y comercial en un 61% y 78%, respectivamente; la demanda de energía primaria de calefacción en edificios comerciales, en un 77%; y virtualmente eliminarían las fuentes externas de calefacción para edificios residenciales con la contribución del calor residual de los electrodomésticos y los ocupantes (US DOE, 2015).

La oferta de servicios que caracterizan el comportamiento termo-energético de los componentes de la envolvente edilicia, a nivel internacional, es amplia. En la Tabla 1 se detallan los principales laboratorios y/o empresas internacionales de pruebas acreditados de acuerdo al servicio prestado. Las principales regiones que presentan la mayor cantidad de empresas en el rubro estudiado son América del Norte y Europa. Esto se pone de manifiesto

en la Figura 1, que describe los países o regiones de acuerdo a la madurez en su nivel de infraestructura de ensayos y etiquetado de componentes y materiales de la envolvente edilicia (IEA, 2013). El precio de los servicios de caracterización óptica de laboratorios y empresas internacionales asciende a 2000 libras, es decir, US\$ 2400.

Respecto a la situación en América de Sur, se observa que Brasil trabaja activamente en el desarrollo de programas para etiquetar componentes de la envolvente edilicia (IEA, 2013). La adopción de medidas regulatorias que promuevan la eficiencia energética ha estado en su agenda de gobierno desde la década de 1980. Sin embargo, los proyectos se han intensificado en los últimos años, junto con el consumo energético y el crecimiento económico y demográfico (EPE, 2015). Cuenta con numerosas normas que regulan los requisitos de rendimiento térmico del edificio: Ley 10,295, Ley 9991, PROCEL 1985; y con varios programas relacionados con el etiquetado energético de

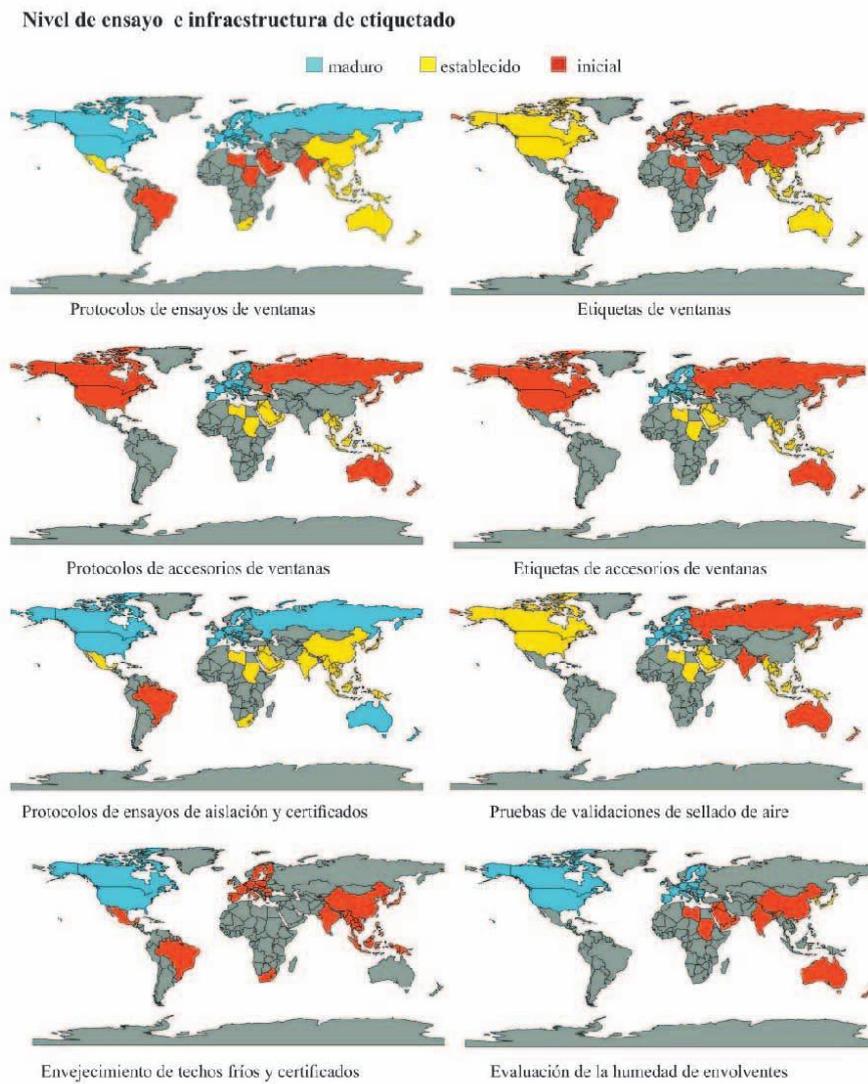


Figura 1. Estado de la evaluación de materiales de la envolvente edilicia, clasificación y etiquetado (IEA, 2013). Fuente: IEA, 2013, adaptada por las autoras.

edificios y sus componentes: Edifica PBE 1981 y 2005. Como objetivo a medio plazo, busca establecer gradualmente el etiquetado edilicio obligatorio, según tipología edilicia (Silvero et al., 2019).

Desde 1994, Chile comienza a trabajar de manera escalonada y continúa en el desarrollo de normativas y programas para el acondicionamiento térmico de viviendas. Esta actividad se profundiza a partir del año 2005 mediante políticas y programas que fomentan eficiencia energética de viviendas. Muchas de las acciones llevadas a cabo han sido desarrolladas por la Agencia Chilena de Eficiencia Energética y la Cámara Chilena de Refrigeración y Climatización A.G (*ibidem*). Actualmente, Chile presenta un programa de Calificación Energética de Viviendas (CEV) instrumentado desde 2012 por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), en conjunto con el Ministerio de Energía. Esta herramienta requiere información sobre la *performance* energética de ventanas y aislación de

muros (MINVU, 2018). En 2015, Chile lanza el programa de Políticas Energéticas Chile 2050, que involucra robustas políticas de eficiencia energética edilicia.

Uruguay, en tanto, posee un Programa de Normalización y Etiquetado del Proyecto de Eficiencia Energética, implementado en 2006 por el Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM), para productos y equipos de consumo energético y edificaciones. Este programa prevé asistencia técnica y económica para mejorar la eficiencia energética de las construcciones (MIEM, 2018).

ARGENTINA

A escala local, el aumento del precio de la energía y el progresivo retiro de los subsidios a la misma han dado lugar a una gran expectativa sobre la eficiencia energética de la construcción. La Subsecretaría de Ahorro y Eficiencia

Norma	Sección en la norma	Indicador o propiedad	Definición
LEED	SS 7.1: Reducción de islas de calor: Pavimento SS 7.2: Reducción de islas de calor: Cubiertas Calidad del ambiente interior. Cubiertas	Índice de reflectancia solar (SRI)	Índice opto-térmico que estima la capacidad de una superficie de reflejar la radiación solar recibida.
	Iluminación natural y vistas	Transmitancia visible (TV)	Propiedad óptica que indica la fracción de luz visible (380 - 780 nm) transmitida a través un material.
IRAM 11900 IRAM 11605 LEED IRAM 11507	-IRAM 11900: Energía primaria para calefacción. Flujo de energía de origen solar. -IRAM 11605 (IRAM, 1996): Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos. -IRAM 11507: Metodología de cálculo. Transmitancia térmica. -LEED. -Calidad del ambiente interior. Cubiertas. Ventanas.	Coefficiente global de transferencia térmica (U) [W/m ² °C]	El calor que fluye por unidad de tiempo y superficie, transferido a través de un sistema constructivo, formado por una o más capas de material, de caras plano paralela. Involucra tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, radiación y convección.
IRAM 11900	-Energía primaria para calefacción. Flujo de energía de origen solar.	Reflectancia solar o albedo (â)	Fracción del flujo solar reflejada por una superficie. Su inversa la absorptancia solar (a) es la fracción del flujo solar absorbida por una superficie.
	ILUMINACIÓN Coeficiente de utilización (cu).	Reflectancia visible	-fracción de radiación visible incidente reflejada por una superficie.
IRAM 11507 LEED	-IRAM 11507-6: 2018 -Metodología de cálculo factor solar. -LEED. -Ventanas.	Coefficiente de ganancia solar térmica o factor solar (SHGC – FS)	-es la fracción de radiación solar incidente que ingresa a través de una ventana, tanto la directamente transmitida y la absorbida y consecuentemente liberada hacia el interior.

Tabla 2. Enumeración y definición de indicadores o propiedades que aplican o demandan en sus requisitos diferentes normas de certificación de eficiencia energética de aplicación local. Fuente: Elaboración de las autoras.

Energética (2018), que corresponde a la Secretaría de Planeamiento Energético del Ministerio de Energía y Minería, plantea entre sus objetivos principales: (1) proponer, implementar y monitorear programas para un uso eficiente de los recursos energéticos, en la oferta, transformación y consumo; y, (2) evaluar y proponer alternativas regulatorias buscando mecanismos de promoción de la eficiencia y el ahorro de energía. Para alcanzar estos objetivos se proponen diversos programas de etiquetado de componentes, entre los que se destacan, a nivel comercial, residencial y público, el Programa de Etiquetado de Eficiencia Energética (Ministerio de Energía y Minería, MINEM, 2018) (lámparas, electrodomésticos y gasodomésticos) y el Etiquetado de Eficiencia Energética en Inmuebles Destinados a Vivienda. Además, este organismo prevé avanzar en el etiquetado de eficiencia energética de ventanas exteriores (Ministerio de Hacienda, 2018). Si bien este en vigencia actualmente, el subcomité de Normas IRAM 11507-6 (2018) se encuentra desarrollando los últimos ajustes para su implementación.

Desde el año 2013, la Secretaría de Estado de la Energía de la provincia de Santa Fe trabaja en el desarrollo de un sistema provincial de certificación de eficiencia energética de inmuebles destinados a vivienda. Esta iniciativa tiene por objetivo clasificar y catalogar un inmueble en función a su consumo energético, de manera análoga a como se viene haciendo con los electrodomésticos y gasodomésticos. La

etiqueta de eficiencia energética en viviendas permitirá determinar un "índice de prestación energética" (IPE). La Dirección de Programas en los sectores Residencial, Comercial y Público participa de esta iniciativa en conjunto con la Secretaría de Estado de la Energía de la Provincia de Santa Fe, el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) y la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) en las distintas etapas que conllevan al desarrollo de la normativa y certificación del etiquetado de viviendas, como también el estudio, publicación, difusión e implementación de la norma. A la fecha, ya se realizó una prueba piloto en la ciudad de Rosario y se está promoviendo la realización de nuevas pruebas piloto en las provincias de Mendoza y Neuquén. Este procedimiento se realizará de acuerdo a Norma IRAM 11900 (2017) "Prestaciones energéticas en viviendas. Método de cálculo".

Otro programa de uso voluntario que se lleva adelante en la Argentina es un sistema de certificación edilicia desarrollado por el Consejo de la Construcción Verde de Estados Unidos (US Green Building Council), denominado LEED (USGBC, 2018) (sigla de Leadership in Energy & Environmental Design) que se implementa desde el año 1993 en varios países. Hasta el momento en Argentina hay 49 edificios registrados en este programa, de los cuales han sido certificados 7.

Estos programas y normas de certificación energética de vivienda ponen en relevancia la imperiosa necesidad de obtener datos, precisos y contextualizados, de los materiales y tecnologías de mayor difusión en el parque edilicio nacional. Los indicadores y propiedades requeridos por estas normas y programas para la caracterización de materiales y componentes de la envolvente edilicia se detallan en la Tabla 2.

Las exigencias que provienen de instituciones públicas, tales como el Ministerio de Energía de la Nación, gobiernos provinciales y municipios, a través de regulaciones, programas y códigos de certificación energética urbano-edilicia, demandan a las empresas la caracterización opto-térmica de los componentes y materiales que conforman la envolvente. Si bien hoy, en Argentina, existen laboratorios de ensayos para los etiquetados obligatorios de eficiencia energética de electrodomésticos, gasodomésticos y lámparas, aún no existen laboratorios que realicen ensayos de comportamiento energético de ventanas (U y FS), ni aquellos que aporten datos precisos respecto al desempeño energético de componentes opacos de fachadas y cubiertas, fundamentales para la certificación energética de viviendas.

En el mercado nacional, el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), ubicado en Buenos Aires, es el único proveedor de servicios de caracterización de componentes edilicios. Los servicios de caracterización ofrecidos por el INTI son: transmisión de calor en muros y paneles, ensayos de comportamiento térmico de materiales; transmisión de vapor de agua de materiales; ensayos de estanquidad en DVH; ensayos de condensación en DVH; ensayos del índice de penetrabilidad de vapor en DVH; determinaciones espectrales en ámbitos UV- Visible NIR; determinación de color y blancura; ensayos mecánicos de carpintería de obra; ensayos físicos de carpintería de obra (infiltración de aire, estanquidad al agua de lluvia y resistencia a la carga de viento). El precio de estos servicios oscila entre los US\$ 67 y los 600. Sin embargo, estos servicios no cubren la totalidad de los requeridos por las normas mencionadas anteriormente en la Tabla 2: SRI inicial y SRI envejecido, Albedo, Emisividad, Transmitancia visible, U-valor (ventanas), Factor solar e Índice de transmitancia solar (STI).

Asimismo, existen en Argentina diversos centros de investigación que producen avances en el campo de la caracterización opto-térmica de materiales. En relación a la problemática abordada en este trabajo se citan algunas de las instituciones de ciencia y técnica:

- El Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO), provincia de Salta (Grupos asociados: Catamarca), presenta las siguientes líneas de investigación: acondicionamiento térmico con materiales de cambio de fase, ahorro y eficiencia energética, edificios bioclimáticos, fotovoltaico y electrónica aplicada a las energías renovables y metrología óptica.
- El Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión (DLLyV) e Instituto de Investigación en Luz, Ambiente y Visión (ILAV) de la provincia de Tucumán, en su conjunto, son considerados un centro de referencia en América Latina.

Esta institución realiza diversos servicios de caracterización óptica de lámparas y materiales: Laboratorio de Fotometría, Laboratorio de Radiometría, Laboratorio de Ensayos Eléctricos y Laboratorio de Ensayos de Seguridad.

- El Centro de Investigaciones Ópticas (CIOp) de la provincia de Buenos Aires, La Plata, ofrece numerosos servicios tales como: caracterización radiométrica de fuentes luminosas y detectores; calibración de equipamiento óptico; diseño de dispositivos de visión automática, etc.
- El Grupo de Optoelectrónica y Metrología Aplicada (LOMA) del Centro de Ensayos No Destructivos y Estructurales - CENES de la UTN-FR del Delta, de la provincia de Buenos Aires, lleva a cabo estudios vinculados al desarrollo de técnicas para la caracterización óptica de materiales.
- El Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE), de la provincia de Mendoza, aborda problemáticas referidas a las energías renovables en arquitectura, construcción y equipamiento, el diseño urbano bioclimático y la iluminación natural y eficiente, entre otras.

Uno de los principales obstáculos para el desarrollo de la actividad a nivel local es la elevada inversión inicial requerida para adquirir el nuevo instrumental/equipamiento para iniciar la prestación del servicio. Dichos instrumentos provienen del exterior y deben ser abonados en dólares. Además, se requiere de varios períodos para recuperar el capital invertido, haciéndose necesario contar con un importante respaldo económico o financiero. Con el objetivo de reducir costos y fortalecer capacidades, se han realizado numerosas experiencias de trabajo colaborativas entre centros de investigación a nivel nacional, tales como INENCO-CNEA (Bolzi, Tamasi y Cadena, 2016) e INENCO-INAHE (García et al., 2010). En tal sentido, la Asociación Argentina de Energías Renovables (ASADES) y la Asociación Argentina de Luminotecnia (AADL) organizan periódicamente encuentros en donde se promueve y estimula la conformación de redes o grupos de trabajo que permiten avanzar sobre el desarrollo científico-tecnológico de acuerdo al contexto nacional, fortaleciendo de esta manera el avance en áreas como la discutida en este trabajo: desarrollo de metodologías para la caracterización opto-térmica de componentes y materiales de la envolvente edilicia.

CONTEXTO DE DESARROLLO TECNOLÓGICO-METODOLÓGICO

En Argentina, la afluencia de nuevos materiales en la industria de la construcción ha aumentado en la última década. No obstante, la información de las propiedades ópticas de los materiales disponibles localmente es muy limitada y, al mismo tiempo, la caracterización del material de construcción recientemente desarrollada tampoco es de dominio público. Con el fin de optimizar tanto la eficiencia energética de materiales y componentes de la construcción, como el aprovechamiento y uso racional de la energía derivado de la selección adecuada de los mismos, es esencial que dicho conocimiento se genere y se difunda entre todas las partes interesadas -industria, comercio, usuarios, gobierno, sistema científico-. La generación de bases de datos de propiedades ópticas que caractericen los materiales y tecnologías de uso e industria nacional, mejorará

ÍNDICE	PROPIEDAD OPTO-TÉRMICA	METODOLOGÍA VALIDADA	INSTRUMENTAL DE MEDIANO Y BAJO COSTO
Índice de reflectancia solar (SRI)	Albedo /Absortancia (α)	Akbari, Levinson y Stern (2008).	Albedómetro (tipo "Kipp & Zonen CMA11", rango espectral de 285 a 2800 μm)
		Método variante de la norma ASTM E 1918-97	
ASTME1980-11	Emisividad superficies opacas (2)	ASTM E1933-14 (ASTM, 2014)	Termocupla T incorporada a data loggers. Termómetro (tipo "IR Fluke 568" con ajuste de emisividad)
	Temperatura superficial (Ts)	Doulos, Santamouris y Livada (2004).	Termocuplas tipo T incorporadas a un data loggers Cámara termográfica infrarroja (tipo "Fluke Ti 55")
	Emisividad (2) superficies especulares	Flores y Hongn (2014).	Cámara termográfica infrarroja (tipo "Fluke Ti 55" y fuente de radiación IR)
Índice de transmitancia solar (STI)	Resistencia térmica (R-valor) y transmitancia térmica (U-valor)	ISO 9869 (ISO, 2014)	Sensor térmico (tipo Hukseflux HFP01)
	Temperatura (T) y flujo de calor (Iz)	ASTM-C 1155-95-13 (ASTM, 2013)	Termocupla tipo T incorporadas a data loggers. Cámara termográfica infrarroja (tipo Fluke Ti 55)
Muscio y Akbari (2017).	Albedo /Absortancia (α)	Akbari, Levinson y Stern, 2008.	Albedómetro (tipo "Kipp & Zonen CMA11", rango espectral de 285 a 2800 μm)
		Método variante de la norma ASTM E 1918-97	
	Emisividad superficies opacas (2)	ASTM E1933-14 (ASTM, 2014)	Termocupla T incorporada a data loggers Termómetro (tipo "IR Fluke 568" con ajuste de emisividad)
	Emisividad (2) superficies especulares	Flores y Hongn (2014).	Cámara termográfica infrarroja (tipo Fluke Ti 55) Fuente de radiación IR.
U-valor	Temperatura de aire	Villalba et al. (2017).	Termocuplas T incorporada a data loggers (tipo Lab Jack)
			Piranómetro (tipo LICOR LI-200SA)
			Lámpara de tungsten halogenado de 1000 W (tipo Philips Halogen linear lamp 8727900881264 1000 W R7s cap 220-240 V Warm White)
Factor Solar	Radiación incidente (300nm - 2800nm)		Resistencia eléctrica (potencia 120 W)
	Temperatura de aire		Medidor de caudal
	Temperatura de agua		Equipamiento específicamente desarrollado para esta finalidad
Transmitancia solar (300nm - 2800nm)	-transmitancia a la radiación solar global y difusa	Romero-Gámez et al. (2012)	Piranómetro (tipo CM6B, Kipp & Zonen)
			Piranómetro con anillo de sombreado (tipo CM121B, Kipp & Zonen)
			Logger (tipo LOGBOX SE Data Logger)
Transmitancia PAR	-transmitancia global a la radiación fotosintéticamente activa	Romero-Gámez et al. (2012)	Sensor PAR (tipo SKP215/S, Sky Instruments)

Transmitancia visible (400nm - 700nm)	Transmitancia visible a incidencia normal	NFRC 202-2010 (NFRC, 2010)	Sensor fotométrico (tipo LICOR LI-210R)
			Medidor para sensores de luz (tipo LI-250A)
			Equipamiento específicamente desarrollado para esta finalidad
	Transmitancia normal-normal (vidrio claro)	Fontoynt (1999).	Sensor fotométrico (tipo LICOR LI-210R)
Transmitancia hemisférica-hemisférica (vidrio claro o translúcido)	Medidor para sensores de luz (tipo LI-250A)		
	Medidor de luminancia (tipo LICOR LS-160)		
Reflectancia visible (400nm - 700nm)	Reflectancia hemisférica-hemisférica	Fontoynt, 1999	Medidor de luminancia (Tipo Konica Minolta LS 110)
	Reflectancia especular		Cartilla de referencia blanca y gris - de reflectancia conocida-
	Reflectancia a la luz visible (LVR), a 30°, 60° y 90°	Lauria et al. (2018).	Lámpara LED 1500 lm TCC 4000 K, IRC 80
			Foto-radiómetro (Tipo Delta Ohm HD 2102.2)
			Equipamiento específicamente desarrollado para esta finalidad
	Reflectancia difusa media ponderada de una superficie	Mardaljevic, Brembilla y Drosou (2015).	Cámara digital común (tipo Nikon Coolpix 5400)
Medidor de luminancia (Tipo Konica Minolta LS 110)			
		Cartilla de referencia blanca y gris - de reflectancia conocida-	

Tabla 3. Índices y propiedades opto-térmicas de acuerdo a metodología y el instrumental de mediano y bajo costo requerido. Fuente: Elaboración de las autoras.

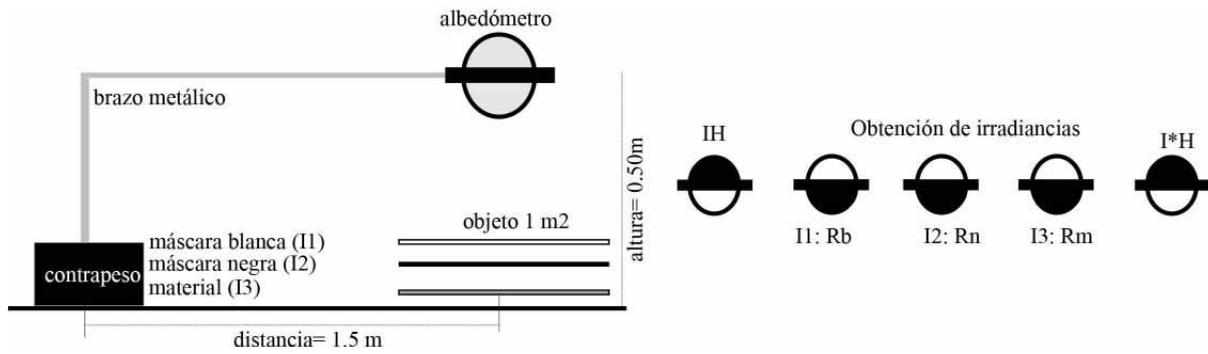
la fiabilidad de las predicciones y el análisis de precisión del comportamiento energético a escala edilicia y urbana.

En los países que se encuentran a la vanguardia de la investigación científica, la caracterización de materiales se realiza mediante equipamiento de alta gama -goniofotómetros, espectrómetros de amplio rango espectral, etc. Estos instrumentos se encuentran disponibles en escasos centros de investigación de vanguardia a nivel internacional. Tan solo cuatro laboratorios a nivel mundial cuentan actualmente con equipamiento que permite desarrollar caracterización completa de bases de BSDF (función de distribución de transmitancia y reflectancia bidireccional), entre ellos el prestigioso Lawrence Berkeley, EE.UU.; Zumtobel Staff AG, Austria; Solar Energy Research Institute of Singapore; Facade Technologies Lucerne University of Applied Science and Arts; Competence Centre Envelopes and Solar Energy; Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Germany.

Es relevante destacar que muchos de los procesos de certificación y caracterización energética se realizan a través de simulaciones. Con este propósito se han confeccionado diversas bases de datos que sirven de input para estos programas. Estas bases de datos contienen información de los materiales y componentes que se utilizan en las regiones donde se desarrollan estos simuladores, generalmente Norteamérica y Europa. Aunque el empleo de simulación, durante la etapa

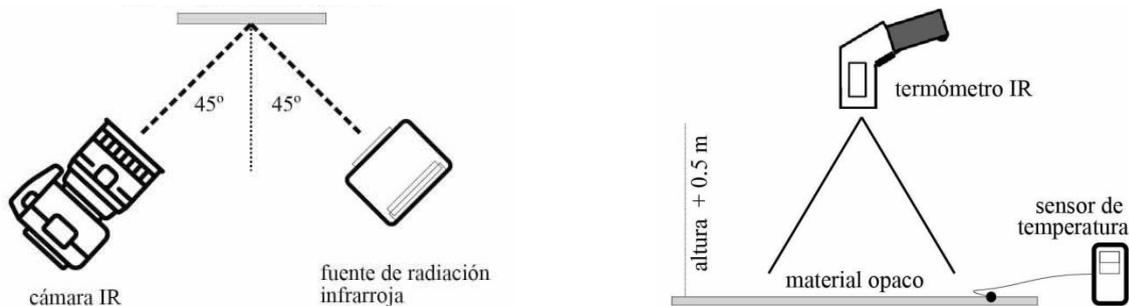
proyectual y de elección de materiales y sistemas, permite optimizar el desempeño energético tanto de componentes como de espacios, la utilidad y validez de los resultados de los modelos de predicción dependen de la calidad y exactitud de los datos de entrada -propiedades ópticas y térmicas de los materiales-. Sin embargo, la realidad económica nacional, dificulta la posibilidad de adquisición del equipamiento necesario para la determinación de estas propiedades, que implica altos costos de compra y mantenimiento. Por lo tanto, resulta de fundamental importancia diseñar metodologías y/o técnicas de medición asequibles (adaptación de instrumental), para estimar propiedades ópticas de materiales y componentes de la envolvente, susceptibles de ser incorporadas a las bases de datos empleadas en la simulación energética urbano-edilicia local.

En este marco, el siguiente apartado del trabajo propone como objetivo efectuar una revisión de metodologías para la estimación de propiedades ópticas de materiales opacos y transparentes de la envolvente edilicia con instrumental de mediano y bajo costo. El propósito es analizar las distintas posibilidades metodológicas e instrumentales, para la caracterización de propiedades ópticas a nivel local. En la Tabla 3, se detallan los índices, las propiedades opto-térmicas, las metodologías y el instrumental de mediano y bajo costo, y en las Figuras 2 a 16, se grafica de manera simplificada las metodologías.



El método de ensayo cubre la medición de la reflectancia solar de diversos materiales opacos horizontales y de poca pendiente, con una superficie de 1m2, utilizando un albedómetro y un par de máscaras de referencia (blanca y negra). La irradiancia solar que incide sobre el sensor inferior del albedómetro, es un promedio ponderado de la radiación del sol reflejada por el área del objeto y la reflejada de sus alrededores. Este método determina la reflectancia de un área mediante tres mediciones consecutivas de luz solar reflejada (I1: máscara blanca - Rb-; I2: máscara negra - Rn- y I3: superficie del material)

Figura 2. Metodología de medición de albedo o reflectancia solar. Fuente: Akbari, Levinson y Stern, (2008), adaptada por el autor.

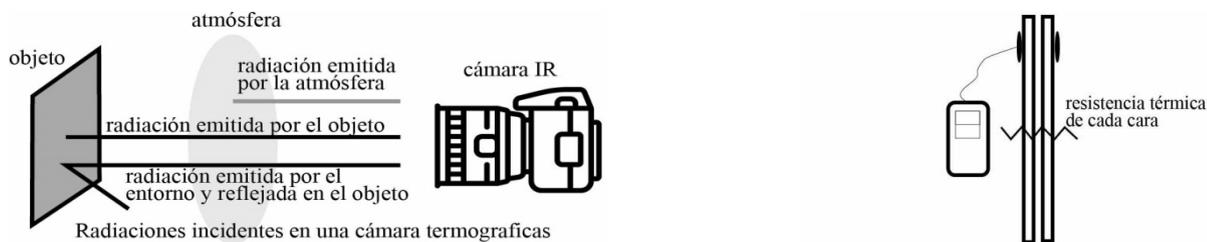


La metodología estima la reflectancia especular en el rango del IR lejano a distintos ángulos de incidencia para muestras especulares de aluminio y vidrio, mediante la utilización de una cámara termográfica y una fuente de radiación tipo calibrador de IR. El procedimiento consiste en tomar dos imágenes termográfica (fuente y reflejo en la superficie especular). A continuación se coloca la muestra reflectante en el vértice principal de un triángulo isósceles.

Este método de prueba cubre los procedimientos para medir y compensar la emisividad de un material opaco, a través del registro de temperatura superficial de la muestra con un radiómetro de imagen infrarroja. El método emplea un sensor de temperatura asociado a un data logger. El valor del flujo radiante emitido por el material es comparado con el dato que registra un termómetro infrarrojo con un ajuste de emisividad.

Figura 3. Metodología de medición de emisividad térmica para materiales opacos ASTM E1933-14 (ASTM, 2014).

Figura 4. Metodología de medición de emisividad térmica para materiales especulares. Fuente: Flores y Hongn (2014), adaptada por las autoras.

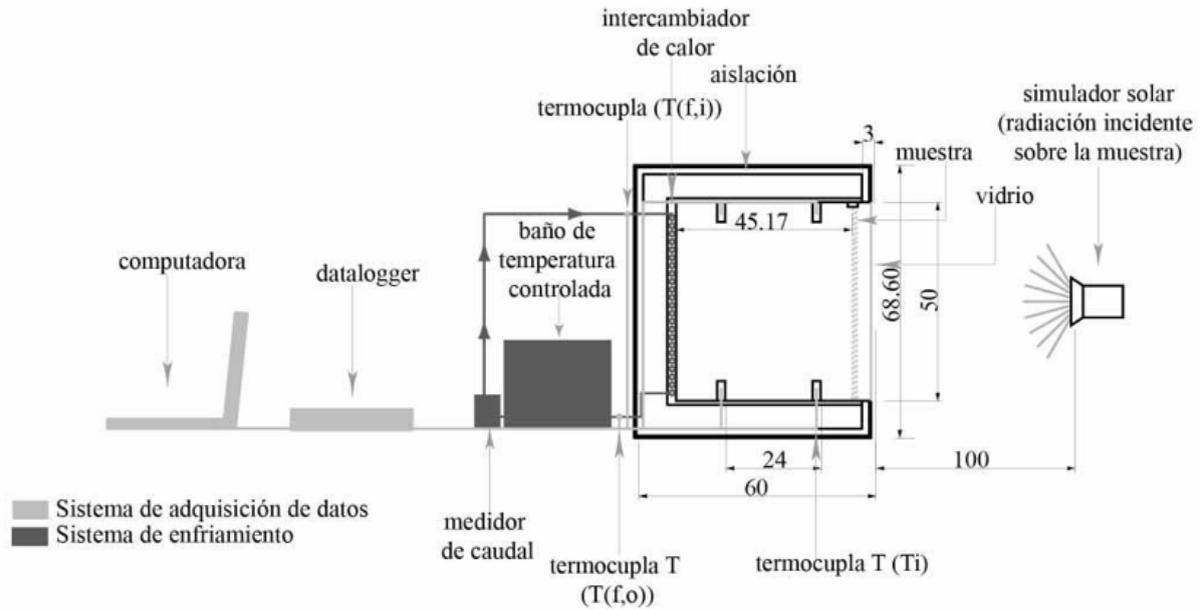


La termografía infrarroja es un método no destructivo que estima la temperatura superficial de un objeto utilizando una cámara infrarroja. *In situ*, este ensayo puede incurrir errores de procedimiento, es por ello que se deben considerar los siguientes puntos: conocer la emisividad de la superficie del objeto; considerar las radiaciones provenientes de los alrededores del objeto y reflejadas por el mismo; el objeto debe estar ubicado en un ángulo correcto y abarcando todo el campo de visión de la cámara. Para alcanzar mayor certeza en el método se contrastan los valores obtenidos por un sensor de temperatura tipo termocupla T.

Método de prueba estándar para determinar la resistencia térmica de los componentes de envolvente de edificio a partir de los datos in situ. Mediante mediciones in situ de temperaturas y flujos de calor en las envolventes urbano-edilicias. Esta práctica proporciona una estimación de valor de R en estado estacionario

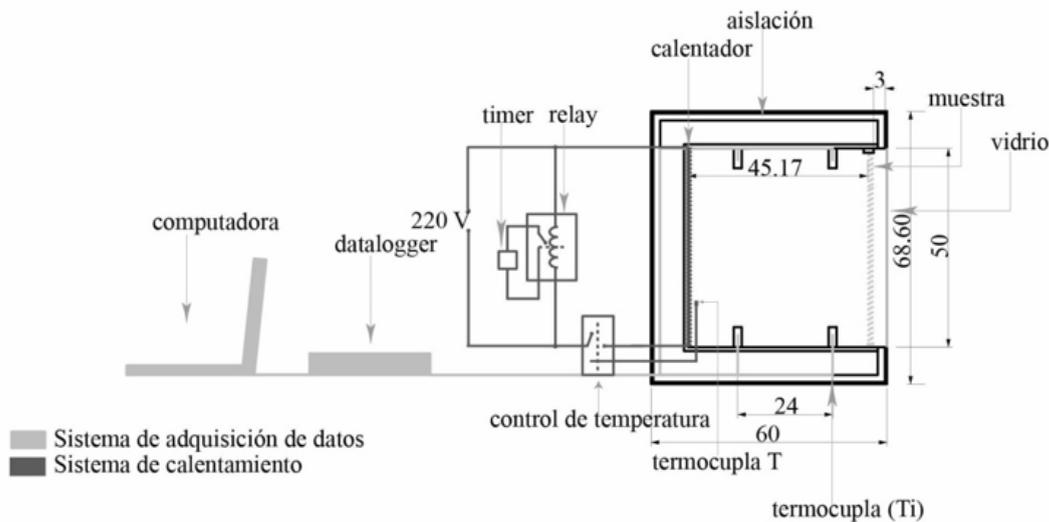
Figura 5. Metodología de medición de temperatura superficial con cámara termográfica. Fuente: Doulos Santamouris y Livada (2004), adaptada por el autor.

Figura 6. Metodología de medición de transmitancia térmica ASTM C1155-95 (ASTM, 2013). Fuente: Elaboración de las autoras.



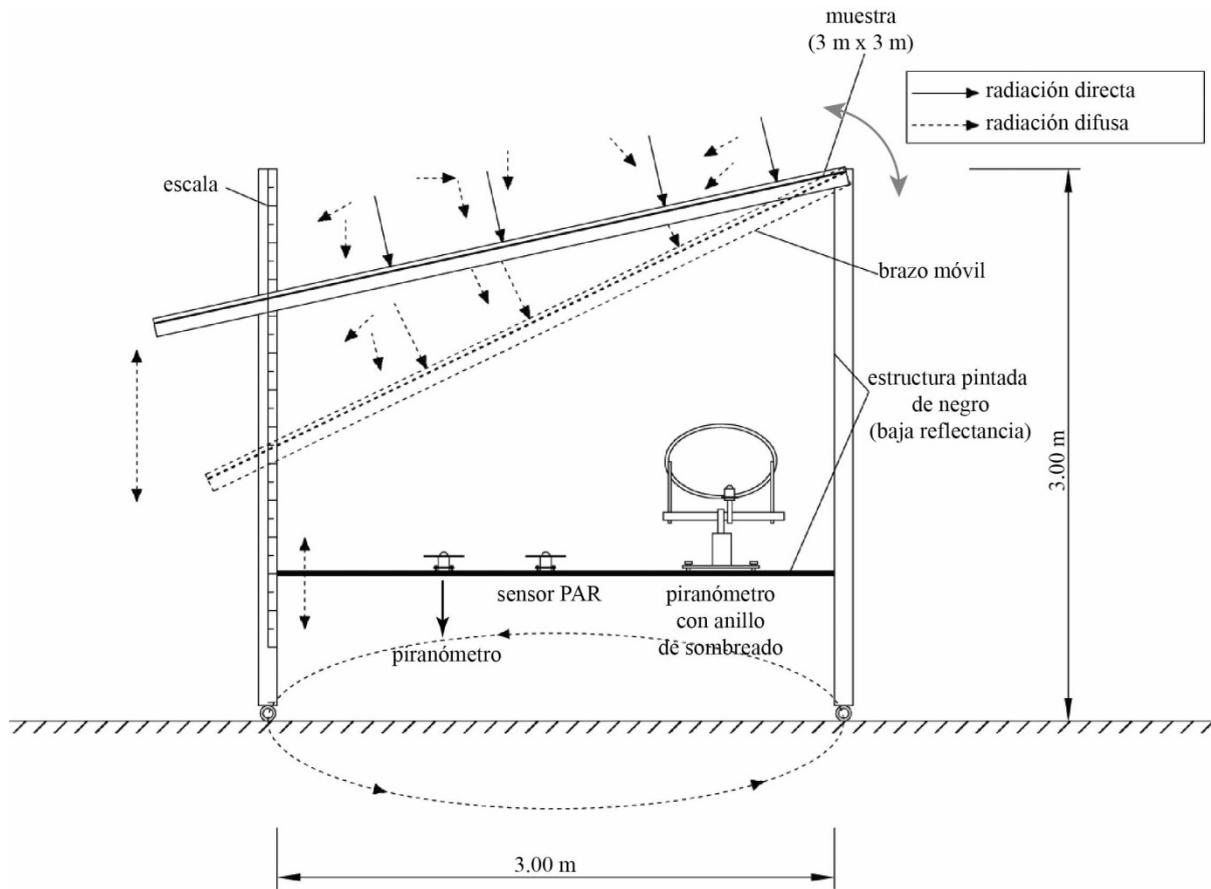
SISTEMA DE ENFRIAMIENTO: intercambiador de calor ubicado en la parte posterior interna de la caja, conectado al circuito de agua fría, fluido intercambiador de calor. La ganancia de calor que ingresa a través del sistema es balanceada con la energía extraída por el intercambiador de calor de la placa de absorción. Una vez que el equipo alcanza el estado estacionario, se miden el flujo de agua y la elevación de la temperatura del fluido a través de la placa de absorción, y a partir de esos datos se calcula la cantidad de energía extraída que es equivalente a la cantidad de energía que entra a través del sistema de sombreado/acristalamiento.

Figura 7. Calorímetro de caja caliente-fría: medición del factor solar (Villalba et al., 2017). Fuente: Elaboración de las autoras.



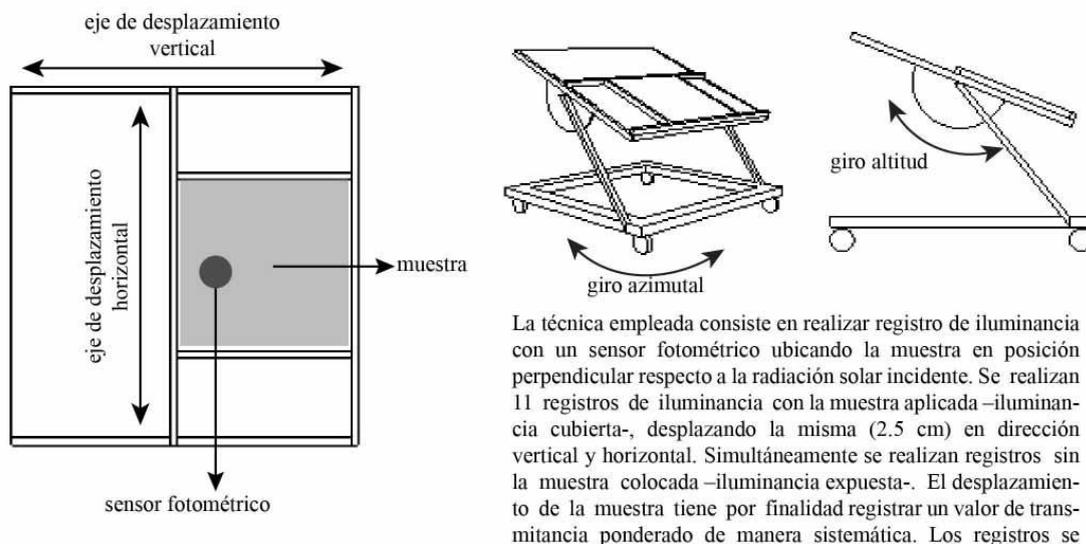
SISTEMA DE CALENTAMIENTO: resistencia eléctrica regulada por un control de temperatura. A este circuito se vincula un timer que permite determinar el tiempo en el cual la resistencia se encuentra bajo funcionamiento, es decir, aportando calor. De este modo, se puede calcular, una vez que el sistema alcanza el estado estacionario, la cantidad de calor necesaria para que el sistema alcance el equilibrio con las condiciones térmicas exteriores, y obtener el U-valor de la muestra.

Figura 8. Calorímetro de caja caliente-fría: coeficiente U (Villalba et al., 2017). Fuente: Elaboración de las autoras.



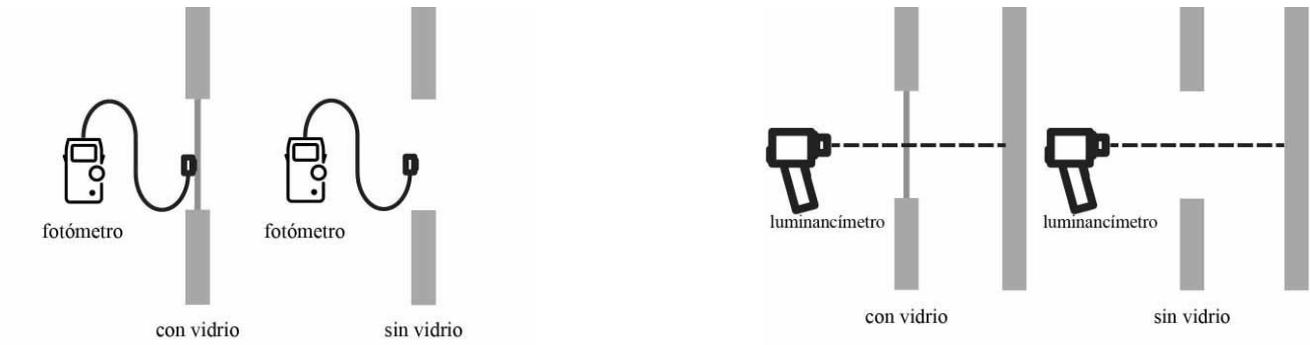
Para poder determinar la transmitancia solar, a distintos ángulos de incidencia de la radiación solar directa, los paneles donde se colocan las mallas son móviles. El recinto donde se ubican los sensores y la muestra dispone de ruedas lo que permite orientarlas hacia el sol en todo momento de acuerdo al ángulo de azimut del sol. Las mediciones se realizan en condiciones de cielo claro. La transmitancia de los tejidos se calcula mediante la relación entre los valores registrados por debajo de las mallas y los valores medidos de manera simultánea en el exterior. Asimismo, se realizaron registros un día con cielo cubierto para calcular la transmitancia direccional-hemisférica (τ_d -h).

Figura 9. Metodología de medición de transmitancia solar (300nm - 2800nm) y PAR. Fuente: Romero-Gámez et al. (2012), adaptada por las autoras.



La técnica empleada consiste en realizar registro de iluminancia con un sensor fotométrico ubicando la muestra en posición perpendicular respecto a la radiación solar incidente. Se realizan 11 registros de iluminancia con la muestra aplicada –iluminancia cubierta-, desplazando la misma (2.5 cm) en dirección vertical y horizontal. Simultáneamente se realizan registros sin la muestra colocada –iluminancia expuesta-. El desplazamiento de la muestra tiene por finalidad registrar un valor de transmitancia ponderado de manera sistemática. Los registros se

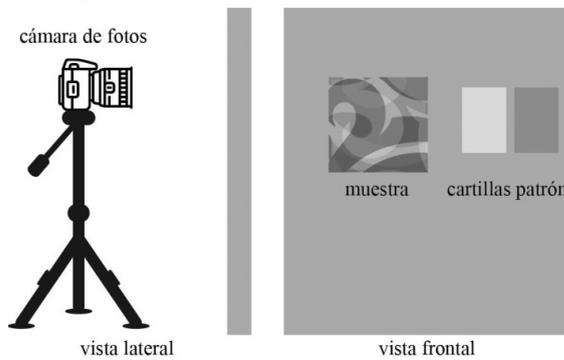
Figura 10. Metodología de medición de transmitancia visible normal (NFRC 202 (NFRC, 2010)). Fuente: Elaboración de las autoras.



La transmitancia hemisférica-hemisférica (t_{hh}) de un vidrio claro o translúcido se obtiene mediante el cálculo de la relación entre la iluminancia detrás del vidrio (I_{in}) y la iluminancia delante del vidrio (I_{out}), medidas bajo condiciones del cielo cubierto con un luxómetro.

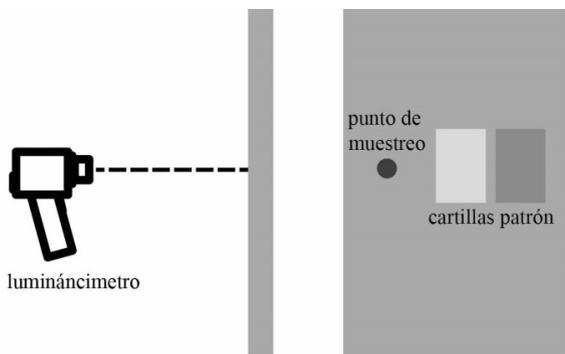
La determinación de la transmitancia normal-normal (t_{nn}) de un vidrio claro, se obtiene mediante la relación entre la luminancia de un objeto ubicado detrás del vidrio (L_{in}), en dirección perpendicular al paño de vidrio, y la luminancia del mismo objeto, en la misma dirección, sin el vidrio (L_{out}).

Figura 11. Metodología de medición de transmitancia hemisférica-hemisférica para vidrios claros y translúcidos (Fontoynt, 1999). Fuente: Elaboración del autor.
 Figura 12. Metodología de medición de transmitancia normal-normal para vidrios claros (ibidem). Fuente: Elaboración del autor.

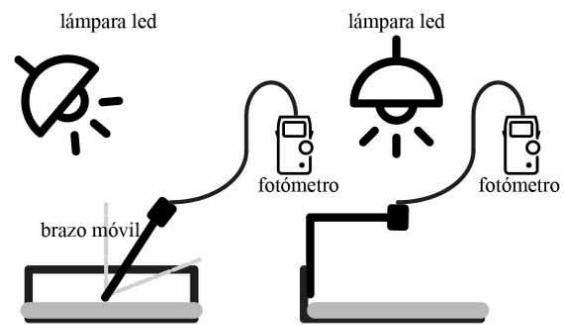


Esta técnica se basa en imágenes de alto rango dinámico (HDR del inglés High Dynamic Range) (Inanici, 2006). Los píxeles de las imágenes de alto rango dinámico contienen datos de luminancia equivalentes a aquellos que se pueden medir punto por punto utilizando un luminancímetro. Se calibra la imagen mediante una medición puntual con luminancímetro en las cartillas patrón. Estos valores de luminancia se utilizan para calcular la reflectancia promedio o punto por punto de una superficie.

Figura 13. Metodología de medición de reflectancia visible (400 nm – 700 nm) difusa media ponderada (Mardaljevic, Brembilla y Drosou, 2015). Fuente: Elaboración de las autoras.



La reflectancia hemisférica-hemisférica de materiales se calcula mediante la relación entre el registro de la luminancia de la superficie, cuya reflectancia se desea calcular, y de las luminancias de una cartilla de referencia blanca y una gris – de reflectancia conocida-, ambas mediciones se realizan *in situ* con luminancímetro. Las condiciones de iluminación para realizar este registro deben ser lo más difusas posibles.



Esta metodología permite determinar el valor de reflectancia de la luz (LRV Light Reflectance Value) (adimensional 0% -100%), que es la proporción de radiación visible reflejada por una superficie en todas las direcciones. Esta metodología es del tipo de no-contacto y se basa en una relación entre la iluminancia reflejada por una cartilla patrón gris (LVR 18%) y la iluminancia reflejada por la muestra bajo análisis. Permite determinar la reflectancia a tres ángulos distintos (30°, 60° y 90°).

Figura 14. Metodología de medición de reflectancia visible hemisférica-hemisférica (Fontoynt, 1999).
 Figura 15. Metodología de medición de reflectancia a la luz visible (LVR) a 30, 60 y 90 (Lauria, Secchi y Vessella, 2018). Fuente: Elaboración de las autoras.

En relación a la confiabilidad de los datos obtenidos con las metodologías de mediano y bajo costo, se detecta que no todos los ensayos analizados en este trabajo han sido validados con equipamiento de altas prestaciones tecnológicas. Entre los métodos validados, se encuentra la cuantificación del albedo propuesto por Akbari, Levinson y Stern (2008), donde se registra un error cuadrático medio (RMSE) igual a 0.01 respecto a la metodología propuesta en la norma ASTM E 1918. Asimismo, Mardaljevic, Brembilla y Drosou (2015) cuantifican un porcentaje de divergencia en el cálculo de la reflectancia visible media de una superficie, mediante tecnología HDR con respecto a la medición con equipamiento estándar, de entre un 0.8 y un 6.1%. Flores y Hongn (2014), en tanto, determinan un error absoluto promedio del método de estimación de la emisividad infrarroja de materiales especulares igual a +0.05 respecto con la bibliografía internacional.

CONCLUSIONES

La revisión expuesta permite afirmar que, internacionalmente, la demanda de servicios de certificación energética de componentes y tecnologías de la envolvente urbano-edilicia es una actividad consolidada y en crecimiento. Ello se debe en gran medida a los incentivos y rebajas en los costos de energía que otorgan distintas entidades gubernamentales y de servicios públicos cuando se aplican tecnologías y materiales eficientes en el desarrollo del hábitat construido. También, se verifica que la actividad crece no sólo en respuesta al valor de la tarifa energética, sino a la existencia de códigos de construcción estrictos, como se observa en el caso de Europa Occidental.

Las regiones que presentan la mayor cantidad de empresas destinadas a la caracterización opto-térmica de materiales y componentes son América del Norte y Europa. En la Argentina, el INTI -Buenos Aires- es la institución que más divulga su capacidad de prestar servicios de caracterización de componentes edilicios. Sin embargo, dichos servicios no cubren la totalidad de los requeridos por las normas utilizadas en el país. Por otro lado, existe un conjunto de instituciones de perfil científico-tecnológico (INENCO, ILAV, INAHE, CIOp, LOMA, CNEA, etc.) que vienen desarrollando en distintos puntos de la Argentina, desde hace varias décadas, la caracterización opto-térmica de materiales y componentes de la envolvente edilicia. Estos institutos trabajan arduamente en mejorar su capacidad de prestar servicios tecnológicos de alto nivel para aportar datos de calidad a la industria de la construcción. El trabajo conjunto en red entre instituciones científicas-tecnológicas nacionales resulta una estrategia viable para fortalecer sus capacidades.

Es claro que uno de los aspectos más vulnerables para el alcance efectivo del ahorro energético derivado de la certificación edilicia y urbana radica en la ausencia de bases de datos de origen local para la caracterización óptica y térmica de los materiales y componentes de las envolventes edilicias. Por ello, es de fundamental importancia desarrollar en el país servicios que puedan realizar estas actividades, teniendo en cuenta el contexto productivo, económico y social local y asegurando prestaciones con rigurosidad técnica y a

la vanguardia del conocimiento. Esta posibilidad impulsa la generación de nuevas líneas de trabajo en red que permitan validar la confiabilidad y rigurosidad de las metodologías de bajo y mediano costo, así como también la conformación de bases de datos a nivel local.

Finalmente, el desarrollo del estudio muestra que el *know-how* existe y acceder a él no reviste mayor complejidad, pero que requiere inversión en tecnología e infraestructura de vanguardia. En consecuencia, esta opción no se presenta como una solución posible en el contexto socio-económico nacional, siendo necesario asumir el desafío de generar sistemas de medición de bajo costo adaptados a equipamiento de mediano o pequeño tamaño.

AGRADECIMIENTOS

Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, Argentina. Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica. PICT-2017-3248; PICT 2017-1088; PICT 2016-1487.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKBARI, Hashem; LEVINSON, Ronnen y STERN, Stephanie. Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies, *Solar Energy*, 2008, vol. 82, n° 7, pp. 648-655.

ALCHAPAR, Noelia y CORREA, Érica. Aging of roof coatings. Solar reflectance stability according to their morphological characteristics, *Construction and Building Materials*, 2015, n° 102, pp. 297-305.

ALCHAPAR, Noelia y CORREA, Érica. Pautas de diseño para disminuir las temperaturas urbanas en regiones con alta productividad solar. Parámetros morfológicos y materiales, *Hábitat Sustentable*, 2016, vol. 6, n° 1, pp. 84-95.

ALCHAPAR, Noelia; CORREA, Érica y CANTÓN, María. Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones, *Energy and Buildings*, 2014, n° 69, pp. 22-32.

ASTM. ASTM C1155-95. Standard Practice for Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-Situ Data, 2013.

ASTM. ASTM E1933 – 14. Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers, 2014.

BOLZI, Claudio; TAMASI, Mariana y CADENA, Carlos. *Construcción del primer prototipo de radiómetro fotovoltaico sumergible de bajo costo*. Ponencia presentada en la XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente, La Plata, 25 al 28 de octubre de 2016.

BP. *BP Energy Outlook 2030*. London: BP, 2011.

Business Wire. BP. *Statistical Review of World Energy* [en línea]. [Consultado el 16 de noviembre de 2018]. Disponible en: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.

Business Wire. *Commercial building energy efficiency retrofits will surpass \$127 billion in annual market value by 2023, forecasts* [en línea]. [Consultado el 5 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.businesswire.com/news/home/20140403005285/en/Commercial-Building-Energy-Efficiency-Retrofits-Surpass-127>.

DOULOS, Lambros; SANTAMOURIS, Matteo y LIVADA, I. Passive cooling of outdoor urban spaces: The role of materials, *Solar Energy*, 2004, vol. 77, n° 2, pp. 231-249.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA DEL GOBIERNO DEL BRASIL (EPE). Informe Nacional de Monitoreo de la Eficiencia Energética del Brasil, 2015.

FLORES LARSEN, Silvana y HONGN, Marcos. Determining the infrared reflectance of specular surfaces by using thermographic analysis, *Renewable Energy*, 2014, n° 64, pp. 306-313.

FONTOYNONT, Marc. *Daylight performance of buildings*. 1^{ra} ed. London: James and James, 1999.

GARCÍA, Víctor; IRIARTE, Adolfo; PATTINI, Andrea; FERRÓN, Leandro; VILLALBA, Ayelén; FLORES LARSEN, Silvana y LESINO, Graciela. *Evaluación de la iluminación natural, temperatura y humedad en una sala de preparación para producción agámica de plantas*. Ponencia presentada en la IV Conferencia Latinoamericana de Energía Solar (IV ISES_CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar (XVII- SPES) Cusco, Perú, 1 al 5 de noviembre de 2010.

International Energy Agency. *25 energy efficiency policy recommendations*. París: IEA, 2011.

International Energy Agency. *Technology Roadmap Energy Efficient Building Envelopes*. París: IEA, 2013.

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC, 2007.

IRAM. *IRAM 11605: Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos*, 1996.

IRAM. *Norma IRAM 11507-6 "Carpintería de obra. Ventanas exteriores. Parte 6 - Etiquetado de eficiencia energética"*, 2018
IRAM. *Norma IRAM 11900 "Prestaciones energéticas en viviendas. Método de cálculo"*, 2017.

ISO. *ISO 9869-1: Thermal insulation -- Building elements -- In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance -- Part 1: Heat flow meter method*, 2014.

LAURIA, Antonio; SECCHI, Simone y VESSELLA, Luigi. Visual wayfinding for partially sighted pedestrians – The use of luminance contrast in outdoor pavings, *Lighting Res. Technol*, 2018, n° 0, pp. 1–19.

MARDALJEVIC, John; BREMBILLA, Eleonora y DROSOU, Nafsika. *Illuminance-proxy high dynamic range imaging: a simple method to measure surface reflectance*. Ponencia presentada en el 28th Session of the International Commission on Illumination (CIE 2015), Manchester, 28 de junio a 4 julio, 2015.

MERCADO, Victoria; ESTEVES, Alfredo; FILIPPÍN, Celina y FLORES LARSEN, Silvana. Passive solar radiant system, SIRASOL. Physical-mathematical modeling and sensitivity analysis, *Solar Energy*, 2013, n° 96, pp. 10-20.

MIEM. *Eficiencia energética* [en línea]. [Consultado el 5 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.eficienciaenergetica.gub.uy/inicio>

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINERÍA, MINEM, Argentina. *Programa de Etiquetado de Eficiencia Energética. Energética* [en línea]. [Consultado el 5 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.minem.gob.ar/www/835/26781/programa-de-etiquetado>

MINISTERIO DE HACIENDA ARGENTINA. *Calificación y Etiquetado de Carpintería de Obra (Ventanas exteriores)* [en línea]. [Consultado el 16 de noviembre de 2018]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/ee/eysp/etiquetado-de-ventanas>
MINVU. *Calificación Energética* [en línea]. [Consultado el 5 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.calificacionenergetica.cl/>

MUSCIO, Alberto y AKBARI, Hashem. An index for the overall performance of opaque building elements subjected to solar radiation, *Energy and Buildings*, 2017, n° 157, pp. 184-194.

NAVIGANT RESEARCH. *Executive Summary: Energy Efficient Buildings: Europe*. Navigant Research, 2014.

NAVIGANT RESEARCH. *Energy Efficiency Retrofits for Commercial and Public Buildings* [en línea]. [Consultado el 5 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.navigantresearch.com/reports/energy-efficiency-retrofits-for-commercial-and-public-buildings>.

NFRC. NFRC 202-2010. *Procedure for Determining Translucent Fenestration Product Visible Transmittance at Normal Incidence*. National Fenestration Rating Council Incorporated, 2010.

PATTINI, Andrea; CORREA, Érica; VILLALBA, Ayelén; FERNÁNDEZ LLANO, Jorge y DE GASTINES, Maureen. *Certificación de eficiencia energética de ventanas. Implicancias de distintos caminos para su determinación*. Ponencia presentada en la XXXVIII Reunión de trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, San Rafael, Mendoza, 11 al 13 de noviembre de 2015.

PÉREZ-LOMBARD, Luis; ORTIZ, José y POUT, Christine. A review on buildings energy consumption information, *Energy and Buildings*, 2008, vol. 40, n° 3, pp. 394-398.

ROMERO-GÁMEZ, Mercedes; SUÁREZ-REY E. M.; CASTILLA N. y SORIANO, Teresa. Evaluation of global, photosynthetically active radiation and diffuse radiation transmission of agricultural screens, *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2012, n° 2, pp. 306-313.

SILVERO, Fabiana; RODRIGUES, Fernanda; MONTELPARE, Sergio; SPACONE, Enrico y VARUM, Humberto. The path

towards buildings energy efficiency in South American countries, *Sustainable Cities and Society*, 2019, n° 44, pp. 646–665.

Subsecretaría de Ahorro y Eficiencia Energética [en línea]. [Consultado el 5 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/energia/ahorro-y-eficiencia-energetica>
US DOE. *Quadrennial technology review. An assessment of energy technologies and research opportunities. Chapter 5: Increasing Efficiency of Building Systems and Technologies*. EEUU: US DOE, 2015.

USGBC. *Leadership in Energy & Environmental Design (LEED)* [en línea]. [Consultado el 5 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://new.usgbc.org/leed>

VILLALBA, Ayelén; CORREA, Érica; PATTINI, Andrea y VICARE, Daniel. Hot-cool box calorimetric determination of the solar heat gain coefficient and the U-value of internal shading devices, *Energy Efficiency*, 2017, n° 10, pp. 1553–1571.

WORLD ENERGY COUNCIL. *World Energy Resources 2013 Survey*. London: World Energy Council, 2013.

ZHOU, Catherine. *Navigating China's Market for High Performance Building Materials*. Webinar, U.S. Energy Department, 2014.



TERMOGRAFÍA INFRARROJA PARA EL DIAGNÓSTICO TÉRMICO CONFIABLE CON ALTA REPLICABILIDAD Y BAJO COSTO DE VIVIENDAS EN MENDOZA, ARGENTINA

THE NATURAL GAS AND ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION OF SCHOOL BUILDINGS IN THE METROPOLITAN AREA OF SAN JUAN, ARGENTINA: A STATISTICAL ANALYSIS BASED ON ARCHITECTURAL VARIABLES.

CAROLINA GANEM KARLEN

Doctora por la ETSAB -UPC, Arquitecta por la FAU - UM
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía INAHE - CONICET / Proyectos de Carreras de Diseño. FAD - UNCUyo. Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-1431-1219>
cganem@mendoza-conicet.gov.ar

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es valorar la utilidad de la termografía infrarroja para diagnosticar en forma rápida el desempeño térmico de edificios existentes. Se seleccionó, para ello, un caso de estudio representativo de vivienda en la ciudad de Mendoza (32°40'LS, 68°51'LO, 750msnm) y se procedió a la toma de imágenes termográficas con una cámara de bajo costo (FLIR i3), en dos momentos del día: en la tarde-noche (8 pm) y en la mañana, temprano, (7am), de modo de evitar posibles errores debidos a la incidencia de radiación solar directa. La emisividad se introdujo en la cámara de acuerdo con estudios de materiales locales. Al mismo tiempo, se realizaron mediciones continuas de temperatura del aire dentro y fuera de la vivienda con micro-adquisidores, con el objeto de contrastar los resultados obtenidos mediante la exploración termográfica. Dado que el caso de estudio tiene una inercia térmica alta, las imágenes tomadas durante la tarde-noche muestran en una mayor medida los distintos comportamientos de los materiales de construcción. Se concluye que la termografía infrarroja resulta una herramienta valiosa para un diagnóstico térmico rápido en la certificación edilicia, si se sigue un protocolo específico que permita obtener resultados confiables.

Palabras clave

diagnóstico, temperatura, viviendas apareadas

ABSTRACT

The aim of the paper is to assess the usefulness of infrared thermography for a quick diagnostic of the thermal performance of the existing building stock. A representative housing case study in the city of Mendoza (32°40'SL, 68°51'WL, 750m above sea level) was selected and infrared imaging was carried out with a low cost thermograph camera (FLIR i3) at two times every day, in the late evening (8 pm) and in the early morning (7 am), for avoiding possible mistakes due to incident direct solar radiation. Emissivity was introduced in the camera according with local material studies. At the same time continuous measurement of air temperature inside and outside were taken with data-loggers with the objective of examining in detail the obtained results by the thermographic survey. Because the case studied has a high thermal inertia the survey in the evening shows better the different behaviour of construction materials. It is concluded that the thermographic survey resulted a valuable tool for quick thermal diagnostic in building certification if a specific protocol is followed in order to obtain accurate results.

Keywords

diagnosis, temperature, semi-detached houses

INTRODUCCIÓN

La Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency - IEA) recomendó a los líderes del G8 una serie de medidas de eficiencia energética en los siguientes aspectos: edificios, equipamiento, iluminación, transporte e industria. Estas consideraciones persiguen logros muy ambiciosos de eficiencia energética que pueden derivar en importantes reducciones de CO₂. La IEA estima que, si estas medidas se aplican a escala global, las reducciones estarán entre 4400 y 6800 MtCO₂/año para 2030. Esta cantidad equivale lo que fue el total de las emisiones de Estados Unidos de América en el año 2004. Las medidas relacionadas con los edificios incluyen: normativa, monitoreo y evaluación y se focalizan en tres aspectos principales: 1. Códigos edilicios para nuevos edificios; 2. Viviendas pasivas y edificios energéticamente eficientes; y, 3. Edificios existentes (Schneider, 2015).

Para reducir el consumo energético en edificios existentes en forma masiva, se necesitan técnicas confiables y rápidas de diagnóstico. El monitoreo tradicional del comportamiento térmico de espacios en edificios con micro-adquisidores y termocuplas, como el descrito por Andersen *et al.*, (2017) y Andreoni Trentacoste y Ganem Karlen (2017), consume tiempo y presenta limitaciones en relación con el instrumental y la cantidad de personal involucrado cuando se piensa en una implementación masiva.

La termografía infrarroja es una tecnología de investigación no destructiva y se ha utilizado durante los últimos 30 años para probar y diagnosticar edificios. Resultó ser un método efectivo, conveniente y económico cuando se busca detectar características ocultas de estructuras de edificios (formas preexistentes, cambios estructurales, anomalías estructurales, presencia de cavidades), evaluar HVAC (sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado), detectar degradación (grietas), identificar fuentes de fuga de aire, determinar pérdidas de calor, mapear humedad, verificar aislamiento y evaluar tratamientos de conservación (Kylili *et al.*, 2014; Fox *et al.*, 2015; Fox, Goodhew y De Wilde, 2016; Lucchi, 2018; Kiritmat y Krejcar, 2018; Rocha, Santos y Póvoas, 2018).

En este trabajo se presenta como el primer paso para complementar el monitoreo tradicional. Muchos investigadores han usado esta técnica de forma efectiva con diferentes objetivos, demostrando su gran potencial. Ganem, Barea y Balter (2016) han descrito a la termografía infrarroja como una herramienta valiosa para la inspección y la ejecución de pruebas no-destructivas en elementos edilicios. Y la Organización Internacional de Estándares está trabajando en la ISO/TC 135/SC serie 8, que trata sobre termografía infrarroja en evaluaciones no-destructivas, de las cuales la única norma publicada es la ISO 10878:2013.

Además, Porrás-Amores, Mazarrón y Cañas (2013) presentan una metodología que plantea utilizar la termografía cuantitativa infrarroja para determinar la temperatura interior del aire. Y Tejedor *et al.* (2017) y Nardi *et al.* (2018)

han aplicado la termografía infrarroja con el fin de definir el coeficiente de transferencia global o *U-Value* en las envolventes edilicias.

Martín Ocaña, Cañas Guerrero y González Requena (2004), por su parte, han propuesto un protocolo basado en la norma BS EN 13187:1999 para evitar errores comunes en las mediciones con termografía causados por la radiación solar incidente. Flores Larsen y Hongn (2012) reportan diferencias entre 25°C y 50°C cuando se toman imágenes termográficas del mismo elemento constructivo, en un mismo momento, pero con distintos valores de emisividad: 0.9 (valor probable muy cercano al real) y 0.1 (valor muy alejado del real). Al respecto, concluyen que es importante destacar que, en el caso de aplicaciones cualitativas, el uso de una u otra emisividad no afecta más que a un cambio de escalas para ajustar los colores de la imagen. En cambio, en una aplicación cuantitativa en donde el objetivo es conocer la temperatura de la superficie, es fundamental que la emisividad con que se toma el termograma sea cercana al valor real. Asimismo, De Prada Pérez de Azpeitia (2016) y Costilla Sanz (2017) afirman que las consideraciones de emisividad en la termografía son claves para la certeza de la información obtenida. El comportamiento térmico de los materiales está determinado principalmente por sus propiedades ópticas y térmicas. El albedo y la emisividad térmica son los dos factores principales.

A partir de los antecedentes expuestos, el objetivo de este trabajo es evaluar la utilidad de la termografía infrarroja para un diagnóstico rápido y confiable del comportamiento térmico del conjunto de los edificios existentes. Este diagnóstico pretende detectar los aspectos principales y otorgar criterios que orienten inspecciones sucesivas de monitoreo con micro-adquisidores.

METODOLOGÍA

La termografía infrarroja es una técnica que transforma el patrón de emisiones de un objeto en una imagen visible. Todas las cámaras interpretan la radiación infrarroja proveniente de la superficie investigada, que involucra radiación emitida, reflejada y ocasionalmente transmitida.

El principio de funcionamiento de la termografía infrarroja coincide con las tres leyes esenciales de la radiación:

1. La Ley de Kirchhoff de radiación térmica, que establece la relación entre la emisión y la absorción de energía. Indica que un cuerpo que absorbe mucho también emite mucho y, de acuerdo con este principio, el coeficiente de emisión, e , se introduce en la ecuación como la relación de la emisividad, E , del cuerpo real a la emisividad, E_z , del cuerpo negro bajo la misma temperatura $e = E / E_z$. El coeficiente de emisión es no-dimensional y tiene valores entre 0 y 1, dependiendo de la longitud de onda, de la temperatura y de la textura del cuerpo.

La Ley de Planck de radiación, describe la radiación espectral específica I' que emana el cuerpo negro ideal. Ecuación 1 (Mohr, Taylor y Newell, 2008).

$$I'(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (1)$$

Donde:

λ es la longitud de onda
 T es la temperatura absoluta h es la constante de Planck
 c es la velocidad de la luz
 e es la base del logaritmo natural 2,718281 k es la constante de Boltzmann

Si la radiación espectral específica, I' , se grafica en la longitud de onda, λ , en función de la temperatura, se obtiene como resultado las curvas típicas de Planck. En ellas se puede observar que el máximo de las curvas cambia con el incremento de la temperatura hacia una longitud de onda menor de acuerdo con la Ley de desplazamiento de Wien. Ecuación 2 (*ibidem*).

$$\lambda = b/T \quad (2)$$

Donde:

λ es el largo de onda máximo,
 T es la temperatura absoluta del cuerpo negro,
 b es un constante de proporcionalidad llamado constante de desplazamiento de Wien equivalente a $2.8977685(51) \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$

La Ley de Stefan-Boltzmann, aplicada a la emisión de una superficie en todas las longitudes de onda, integra la Ley de Planck. El poder radiante E , [W/m^2], se incrementa con el cuarto poder de la temperatura. Ecuación 3 (Duffie y Beckmann, 1991).

$$E = \epsilon\sigma T^4 \quad (2)$$

Donde:

E es la energía de la radiación (W/m^2),
 ϵ es la emisividad hemisférica total de la superficie ($0 < \epsilon < 1$) (no-dimensional),
 σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67051 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}^4$)
 T es la temperatura (K).

Para este estudio se utilizó una cámara infrarroja marca FLIR, modelo i3, de bajo costo, fácil de usar, pequeña y liviana. Este tipo de cámara es factible que sea empleada, por ejemplo, por técnicos municipales, para

realizar diagnósticos generales del conjunto de edificios existentes. Sus especificaciones técnicas son (FLIR, 2018):

- Resolución: 60 x 60 pixeles.
- Pixeles totales: 3,600 pixeles.
- Campo de visión: $12.5^\circ \times 12.5^\circ$
- Sensibilidad térmica: $< 0.15^\circ\text{C}$.
- Precisión: $\pm 2\%$ o 2°C .
- Rango de temperatura: -20°C a 250°C .
- Emisividad: 0.1 a 1.0 Ajustable.

Debido a que existen muy pocos trabajos publicados que informen valores de emisividad de materiales de construcción, es importante realizar pruebas de laboratorio dentro de un rango de temperatura preestablecido. En el presente trabajo, los valores de emisividad fueron introducidos en la cámara de acuerdo a lo informado en estudios locales sobre las propiedades ópticas de los materiales (Alchapar y Correa, 2015). Estos valores son coincidentes con los de Martín Ocaña, Cañas Guerrero y González Requena (2004) que expresan que: la mayoría de los materiales de construcción (especialmente los tradicionales) tienen valores de emisividad entre 0.9 y 0.95; estos valores elevados hacen posible la obtención de valores de temperatura certeros mediante la termografía.

Paralelamente, se realizaron mediciones continuas dentro y fuera del edificio cada 15 minutos con micro-adquisidores LASCAR EL-USB-TC-LCD, con el propósito de examinar en detalle los resultados obtenidos mediante la auditoría termográfica. Los micro-adquisidores se ubicaron de acuerdo con las siguientes premisas:

- Los micro-adquisidores deben ubicarse suspendidos en el espacio y alejados de estructuras con masa térmica. Si se encuentran en el exterior, deben estar protegidos de la radiación directa.
- La distancia del suelo se fijó en 2 metros en todos los casos.
- Las mediciones deben tomarse cada 15 minutos por el lapso continuo de una semana o más. En este caso se realizaron mediciones por 1 mes.
- Antes de ser colocados en el edificio, los micro-adquisidores deben programarse para iniciar al mismo tiempo y mantenerse juntos midiendo por un determinado tiempo en las mismas condiciones, a modo de evaluación. De esta forma, se podrá detectar si hay diferencia entre los sensores.

Las mediciones y las imágenes termográficas se tomaron en la estación de verano para el Hemisferio Sur, desde el 19 de enero al 21 de febrero de 2016, en un caso representativo de la ciudad de Mendoza, Argentina ($32^\circ 40' \text{LS}$, $68^\circ 51' \text{LO}$, 750msnm). Mendoza tiene un clima templado continental seco, con importantes

variaciones de temperatura diaria y estacional. De acuerdo con la clasificación de Geiger y Pohl (1953), Mendoza tiene un clima Bwk. En la Tabla 1, se presenta información climática relativa a la temperatura y a la radiación solar.

Valores anuales	
Temperatura máxima media	24.5° C
Temperatura mínima media	9.6° C
Temperatura media	16.5° C
Irradiancia global horizontal	18.4 MJ/m ²
Humedad relativa	56%
Heliofanía relativa	63%
Julio	
Temperatura máxima media	15.7° C
Temperatura mínima media	0.8° C
Temperatura media	7.3° C
Irradiancia global horizontal	10.2 MJ/m ²
Humedad relativa	63%
Heliofanía relativa	58%
Enero	
Temperatura máxima media	32.3° C
Temperatura mínima media	17.4° C
Temperatura media	24.9° C
Irradiancia global horizontal	26.1 MJ/m ²
Humedad relativa	49%
Heliofanía relativa	66%
Grados día calefacción (Tb = 18° C)	1384° C
Grados día refrigeración (Tb = 23° C)	215° C

Tabla 1. Información climática para Mendoza, Argentina. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional – Fuerza Aérea Argentina.

CASO DE ESTUDIO

De acuerdo con el último Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas (INDEC, 2010) la Provincia de Mendoza cuenta con un total de 539.271 viviendas, de las cuales 538.056 son particulares y 1.215, colectivas. Como primera aproximación a la selección del caso de estudio, se analizaron 16 perfiles urbanos en el Barrio Bombal Sur, en la ciudad de Mendoza. Este barrio se caracteriza por estar consolidado y por ser representativo del tipo de vivienda unifamiliar de baja altura con colindancia, característico de la edificación predominante en la ciudad.

En la Figura 1, se puede observar una imagen satelital y un plano de un sector de la trama consolidada de la ciudad de Mendoza. En ellas, se identifican con color los límites del Barrio Bombal Sur entre las calles Hipólito Irigoyen al Norte, Coronel Beltrán hacia el Oeste, Anzorena hacia el Sur y la Avenida General San Martín hacia el Este. Asimismo, se localiza el caso de estudio y se presenta una vista de la calle en donde se puede apreciar, a la derecha, la fachada Norte de la vivienda identificada con el número 32.

Se tomaron imágenes termográficas acompañadas por imágenes fotográficas para observar la diversidad de comportamientos de las diferentes viviendas en los dos momentos pautados para evitar la incidencia de la radiación solar directa: a la mañana, temprano, y a la tarde-noche. En la Figura 2 se muestran algunos ejemplos del relevamiento efectuado.

A partir del examen de los primeros registros, se seleccionó una tipología de vivienda para la aplicación del diagnóstico térmico rápido en conjunto con las mediciones de temperatura con micro- adquirentes: el chalet neo-colonial. Esta tipología es muy habitual en las ciudades argentinas y en otros países latinoamericanos que recibieron inmigración española e italiana. Se trata de una tipología mediterránea que se construye desde 1940 y es todavía el tipo de vivienda más elegido de la clase media.

La vivienda seleccionada, ubicada en la calle Tucumán, número 32, fue construida en 1960. Es una vivienda de dos plantas, semi-compacta entre medianeras. Su fachada principal se orienta al Ecuador (es decir, al Norte en el Hemisferio Sur). La Figura 1 (c) muestra una fotografía general de la calle Tucumán entre la numeración 0 y 50, en cuya derecha se puede notar la fachada norte de la vivienda identificada con el número 32.

Las paredes son de 0.22 m de espesor, fabricadas con ladrillo macizo, cuyas dimensiones son: 0.27 x 0.17 x 0.7 m y peso promedio, de 3,51Kg/unidad. Este material es usualmente conocido con el nombre de "ladrillón" por sus dimensiones mayores a las estándar, las que permiten construir paredes antisísmicas. Las paredes están recubiertas con revoque grueso y luego con revoque fino, pintadas en un color beige claro, sin aislamiento térmico (U=2.4 W/m²K, este valor corresponde a la suma de las capas que se describen).

Los techos tienen estructura de madera con machimbre, aislamiento de 0.05 m de poliestireno expandido, una capa de hormigón pobre y, sobre esta tejas, cerámicas rojas de tipo español. Los techos están inclinados 25°, siguiendo el eje Este-Oeste. Los espacios interiores tienen cielo raso suspendido de yeso (U= 1.1 W/m²K, este valor corresponde al sistema compuesto por las distintas capas que se describen).

El 20% de la fachada Norte está cubierto por ventanas. Estas presentan marcos de madera en color blanco y

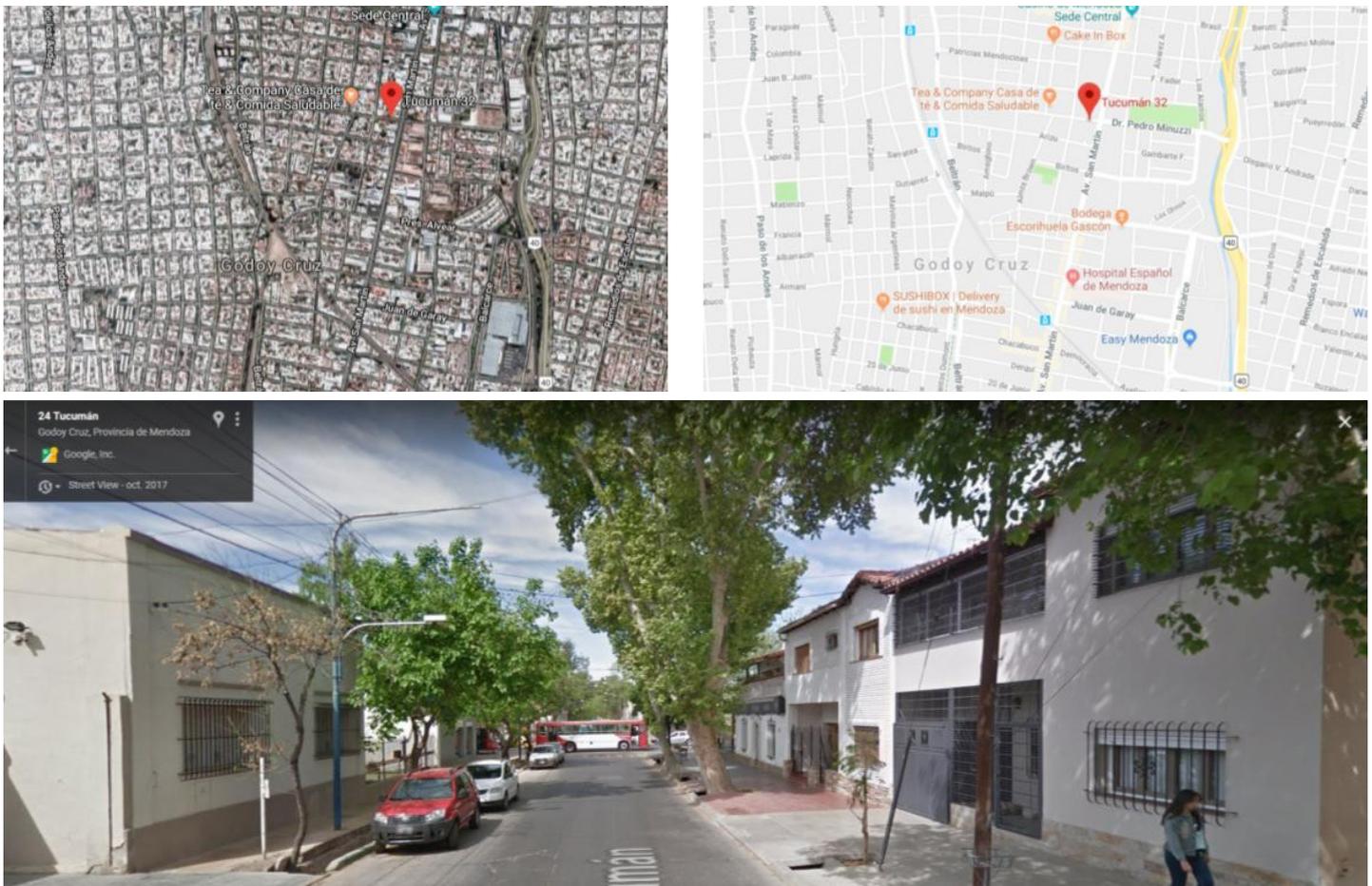


Figura 1. De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha: (a) Imagen satelital parcial de la ciudad de Mendoza, ubicación del Barrio Bombal Sur y del caso de estudio; (b) Plano parcial de la ciudad de Mendoza, y (c) Vista de la calle Tucumán entre la numeración 0 y 50. A la derecha, con la fachada orientada al Norte, se encuentra la vivienda identificada con el número 32. Fuente: Google Maps. [Consultado noviembre 2018].



Figura 2. Perfiles urbanos que ilustran la metodología empleada para el relevamiento mediante fotografías y termografías. Calle Tucumán numeración entre el 700 y el 800. Barrio Bombal Sur, Mendoza. Fuente: Elaboración de la autora.

simple vidrio. Las ventanas están protegidas en el interior por cortinas y en el exterior por cortinas de enrollar de madera pintadas en color blanco ($U = 3.1 \text{ W/m}^2\text{K}$, este valor corresponde al sistema de ventanas con protecciones).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3 exhibe las mediciones tomadas durante el 3 y 4 de febrero. Tales días fueron seleccionados para analizar las imágenes termográficas en este estudio porque son los que más se aproximan al día promedio de la estación y porque están rodeados por días similares, lo cual proporciona estabilidad al comportamiento térmico de la vivienda. Las imágenes termográficas se tomaron a las 7 am, horario previo a la salida del sol, y a las 8 pm, horario posterior a la puesta del sol.

En el periodo seleccionado, las temperaturas interiores presentaron variaciones de 1°C , registrándose entre los 27°C y los 28°C . Y, las temperaturas exteriores variaron diariamente 10°C , desde 20.5°C a 30.5°C . Aunque hay un potencial excepcional para utilizar la estrategia de ventilación nocturna para enfriar espacios interiores, las ventanas se mantienen cerradas la mayoría del día.

En la mañana, al momento de la realización de la inspección termográfica, a las 7 am, la temperatura dentro de la casa era de 27°C y la exterior, de 24°C . El gradiente térmico era de 3°C . En la tarde-noche, al momento de la realización de la inspección termográfica, a las 8pm, la temperatura dentro de la vivienda era de 28°C y la temperatura exterior, de 25°C . El gradiente de temperatura se mantuvo en 3°C . Este resultado es consistente con las investigaciones de Martín Ocaña, Cañas Guerrero y González Requena (2004), en las que se expresa que los edificios macizos, construidos en su envolvente con materiales con alta densidad, presentan gradientes de 3°C entre las temperaturas interiores y las exteriores.

La Figura 4 muestra, de izquierda a derecha, una fotografía de la fachada Norte desde el espacio interior, la imagen termográfica registrada temprano por la mañana, a las 7 am, y la imagen termográfica registrada a la tarde-noche, a las 8 pm.

La escala de temperaturas en el registro termográfico efectuado a la mañana temprano varía entre 25°C y 31°C , mientras que en la tarde-noche, las temperaturas registradas varían entre 30°C y 37°C . Las temperaturas superficiales oscilan entre 5°C y 6°C , mientras que la temperatura del aire sólo varía 1°C . La masa del edificio se ha enfriado con las menores temperaturas nocturnas; sin embargo, como las ventanas permanecen cerradas, la temperatura del aire se mantiene.

Se puede observar que, en la mañana temprano, las temperaturas que evidencia la imagen termográfica son casi homogéneas, entre 27°C y 28°C . En el caso de la imagen de la tarde-noche, las temperaturas de cada elemento constructivo varían y es posible identificar con mayor claridad la ubicación de la ventana en la pared. Por ejemplo, se observa cómo el

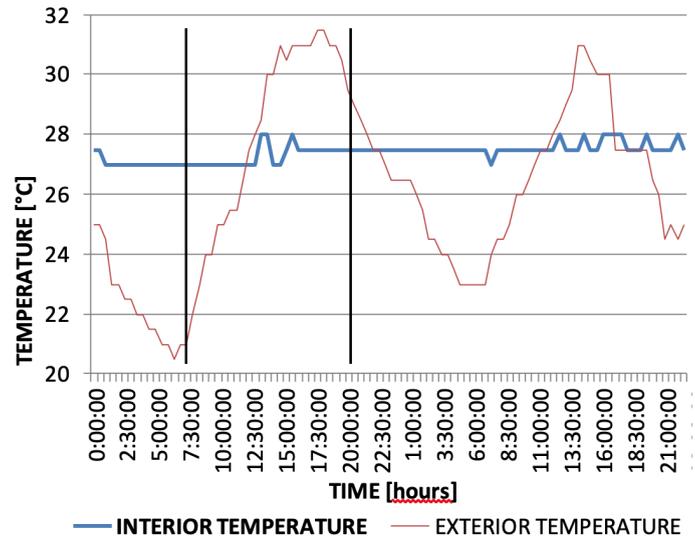


Figura 3. Temperatura interior y exterior de la vivienda durante los días que se realizaron las inspecciones termográficas, a las 7 am y a las 8 pm. Fuente: Elaboración de la autora.

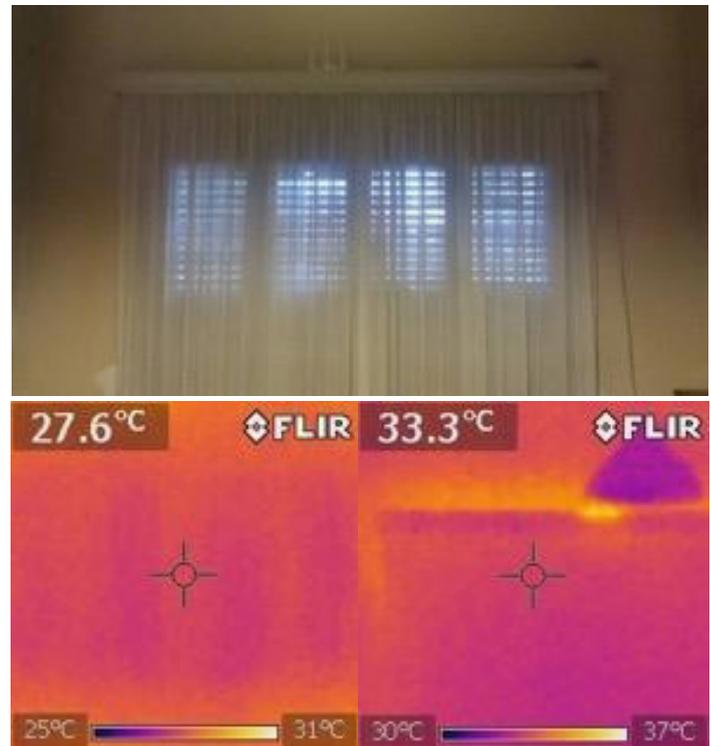


Figura 4. De izquierda a derecha: (a) Fotografía de la pared interior. (b) Imagen termográfica a las 7 am. (c) Imagen termográfica a las 8 pm. Fuente: Elaboración de la autora.



Figura 5. De izquierda a derecha: (a) Fotografía de la fachada Norte desde el exterior. (b) Imagen termográfica, a las 7 am. (c) Imagen termográfica a las 8 pm. Fuente: Elaboración de la autora.

calor se conserva sobre la estructura superior que contiene a la cortina.

La Figura 5, de izquierda a derecha, muestra una fotografía de la fachada Norte desde el espacio exterior, la imagen termográfica registrada temprano por la mañana y la imagen termográfica registrada a la tarde-noche.

La escala de temperaturas en el registro termográfico efectuado a la mañana temprano varía entre 22°C y 28°C, mientras que en la tarde noche, las temperaturas registradas varían entre 30°C y 36°C. Las temperaturas superficiales varían 8°C, mientras que la temperatura del aire varía 10°C. La masa del edificio se ha enfriado con las menores temperaturas nocturnas y las temperaturas superficiales son cercanas a las temperaturas del aire.

En la imagen termográfica tomada en la mañana temprano, una vez más las imágenes son casi homogéneas, mientras que en el caso de la tarde-noche, las diferencias entre los materiales livianos y pesados de la envolvente se observan con claridad. La cortina de enrollar de madera presenta menores temperaturas que la pared de ladrillo macizo.

Nótese que la temperatura superficial en la tarde-noche en el interior de la vivienda (Figura 4 (c)) y la correspondiente al exterior (Figura 5 (c)) se encuentran en el mismo rango entre: 30°C y 36 / 37 °C.

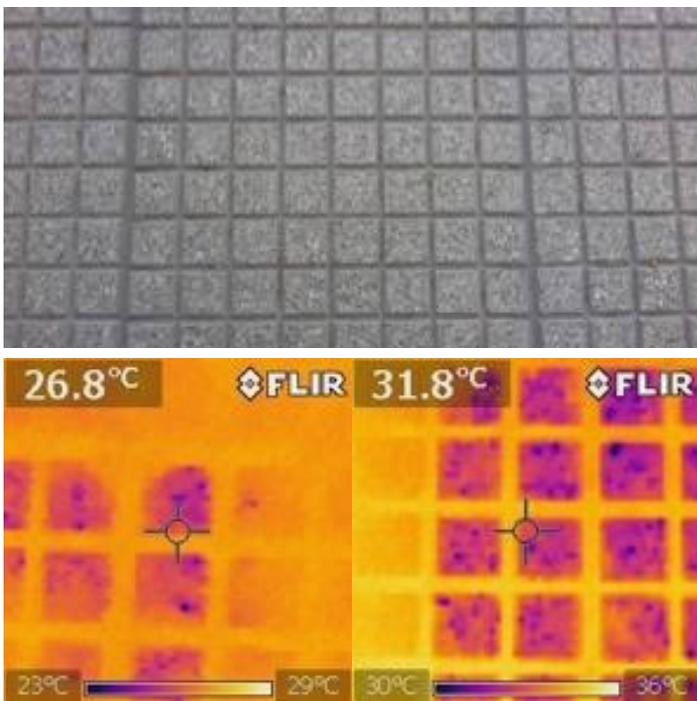


Figura 6. De izquierda a derecha: (a) Fotografía de la vereda. (b) Imagen termográfica a las 7 am. (c) Imagen termográfica a las 8 pm. Fuente: Elaboración de la autora.

El mismo comportamiento en la temperatura descrito en las imágenes exteriores en la fachada Norte se puede advertir en la vereda de la vivienda. La Figura 6, de izquierda a derecha, expone una fotografía de la vereda, la imagen termográfica registrada temprano por la mañana y la imagen termográfica registrada a la tarde-noche.

La escala de temperaturas en la mañana se encuentra entre 23°C y 29°C (un grado centígrado por sobre las temperaturas registradas en la fachada Norte), mientras que en la imagen termográfica de la tarde-noche las temperaturas varían entre 30°C y 36°C, encontrándose en el mismo rango que en la fachada Norte.

La diferencia entre la fachada y la vereda a la mañana temprano se justifica con la cantidad de masa que acumula calor durante el día que, en el caso de la vereda, no alcanza a disiparse de la misma manera que la pared durante la noche, cuando las temperaturas exteriores son más bajas. Por lo tanto, la vereda inicia el día "más caliente" con mayor cantidad de calor acumulado.

CONCLUSIÓN

Las imágenes tomadas en la mañana temprano tienden a revelar temperaturas homogéneas en las superficies. Debido a que la vivienda en estudio tiene alta inercia térmica, el registro en la tarde-noche muestra mejor

los diferentes comportamientos de los materiales de construcción.

Si el objetivo del diagnóstico termográfico es evaluar cómo el calor se distribuye en una construcción dada, detectar puentes térmicos u otro tipo de intercambio energético, la tarde-noche será el mejor momento para realizar el registro termográfico.

Asimismo, si se pretende comprender el comportamiento térmico edilicio en relación a las posibilidades de aplicación de la estrategia de ventilación nocturna para el refrescamiento de los espacios interiores en forma natural, se sugiere el registro en la mañana temprano y en la tarde-noche. De esta forma, será posible cuantificar el calor acumulado durante el día en las edificaciones y valorar el enfriamiento de las mismas durante la noche.

Otra aplicación interesante es la posibilidad de determinar el valor U de la envolvente edilicia utilizando una cámara infrarroja. Si el coeficiente de transmisión de calor está determinado, las imágenes termográficas permiten conocer la conductividad de una pared homogénea y la conductividad efectiva de una pared con gran precisión.

Thouvenel (2012) indica: el error en la determinación del valor U de un componente edilicio mediante termografía es menor al 10%. Cuando el coeficiente de transferencia de calor se determina con la cámara, el método que mejor funciona consiste en considerar el punto central de temperatura provisto por la cámara, y utilizar el total del área para el cálculo. El punto central será representativo del total del área.

Tomar el punto central de temperatura para obtener el mejor resultado puede ser lógico, debido a que las fórmulas utilizadas para calcular todos los valores toman la conducción de calor en una pared unidimensional. En el punto central, esta aproximación es la más precisa. El experimento se lleva a cabo normalmente en tres dimensiones ya que el flujo de calor no se genera sólo en la dirección x sino también en otras direcciones.

No obstante esto, el método que se propone debe ser rápido y permitir determinar las propiedades de los materiales, aproximándose a los valores reales, pero no supone obtener resultados exactos. Desde esta perspectiva, la aproximación unidimensional funciona, tomando la temperatura del centro de la pared para obtener resultados confiables.

Se concluye, en definitiva, que el registro termográfico resulta una herramienta valiosa para el diagnóstico térmico rápido para la certificación edilicia, como complemento a la medición intensiva con micro- adquirentes de casos de control. Se debe seguir un protocolo específico que pautó cuándo y cómo se obtiene el registro termográfico y el valor de la emisividad que se introducirá previamente en la cámara. Sólo si estos aspectos se tienen en cuenta, es posible la obtención de resultados confiables.

PROSPECTIVA

A partir de la investigación que se presenta en este artículo, quedan abiertas líneas de trabajo que se continuarán a futuro. Se prevé continuar el relevamiento y diagnóstico de diferentes viviendas dentro de la misma trama consolidada del Barrio Bombal Sur, con las mismas características constructivas y tipológicas a fin de fortalecer el número de casos de aplicación.

Igualmente, se prevé realizar el mismo procedimiento metodológico con viviendas que presenten otro tipo de materialidad, la que, si bien no es representativa de los edificios existentes en la actualidad, constituye una alternativa en el futuro, como es el caso de los materiales livianos con aislamiento térmico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento recibido del CONICET y del FONCYT, y a los propietarios de la vivienda que permitieron realizar las mediciones térmicas y el registro termográfico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCHAPAR, Noelia y CORREA, Érica. Solar reflectance of opaque enveloped and its effect on urban temperatures, *Revista Informes de la Construcción*, 2015, vol. 67, n° 540, pp.112-124.

ANDERSEN, Micaela; DÍSCOLI, Carlo Alberto; VIEGAS, Graciela Melisa y MARTINI, Irene. Monitoreo energético y estrategias de RETROFIT para viviendas sociales en clima frío, *Revista Hábitat Sustentable*, 2017, vol.7, n° 2, pp. 50-63.

ANDREONI TRENTACOSTE, Soledad Elisa y GANEM KARLEN, Carolina. Influencia del uso y gestión de la envolvente en el comportamiento térmico de verano de una vivienda en la ciudad de Mendoza, Argentina, *Revista Hábitat Sustentable*, 2017, vol.7, n° 2, pp. 64-75.

COSTILLA SANZ, Carlos. *Aplicación práctica para cámara IR (Infrarrojos)*. Proyecto fin de carrera. Trabajo fin de grado, E.T.S.I. y Sistemas de Telecomunicación (UPM), Madrid, 2017.

DE PRADA PÉREZ DE AZPEITIA, Fernando Ignazio. La termografía infrarroja: un sorprendente recurso para la enseñanza de la física y la química, *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 2016, vol. 13, pp. 617-627.

DUFFIE, John A. y BECKMAN, William A. *Solar Engineering and Thermal Processes*. 2^{da} edición. New York: John Wiley & Sons, 1991.

- FLIR. *Guía sobre termografía para aplicaciones en edificios y energía renovable* [en línea]. [Consultado: 12 noviembre 2018] Disponible en: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820325/T820325_ES.pdf
- FLORES LARSEN, Silvana y HONGN, Marcos. Termografía infrarroja en la edificación: aplicaciones cualitativas, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2012, vol. 16, pp. 8.25-8.32.
- FOX, Mathew; COLEY, David; GOODHEW, Steve y DE WILDE, Pieter. Time-lapse thermography for building defect detection, *Energy and Buildings*, 2015, vol. 92, pp. 95-106.
- FOX, Mathew; GOODHEW, Steve y DE WILDE, Pieter. Building defect detection: External versus internal thermography, *Building and Environment*, 2016, vol. 105, pp. 317-331.
- GANEM, Carolina; BAREA, Gustavo y BALTER, Julieta. Infrared Thermography for Quick Thermal Diagnostic of Existing Building. En: *Proceedings of PLEA 2016 (Los Ángeles, 11-13 de Julio de 2016) Cities, Buildings, People: Towards Regenerative Environments*. Los Ángeles, 2016.
- GEIGER R. y POHL W. *Revision of Koeppen-Geiger climate maps of the Earth*. Germany: Justus Perthes, 1953.
- INDEC. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010 [en línea]. [Consultado 8 noviembre 2018]. Disponible en: <https://www.indec.gob.ar>.
- KIRIMTAT, Ayca y KREJCAR, Ondrej. A review of infrared thermography for the investigation of building envelopes: Advances and prospects, *Energy and Buildings*, 2018, vol. 176, pp. 390-406.
- KYLILI, Angeliki; FOKAIDES, Paris A.; CHRISTOU, Petros y KALOGIROU, Soteris A. Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. *Applied Energy*, 2014, vol. 134, pp. 531-549.
- LUCCHI, Elena. Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 82, n° 3, pp. 3077-3090.
- MARTÍN OCAÑA, Silvia; CAÑAS GUERRERO, Ignacio y GONZÁLEZ REQUENA, Ignacio. Thermographic survey of two rural buildings in Spain, *Energy and Buildings*, 2004, vol. 36, pp. 515-523.
- MOHR Peter J., TAYLOR Barry N. y NEWELL David B. CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2006, *Review of Modern Physics*, 2008, vol. 80, pp. 715.
- NARDI, Inole; LUCCHI, Elena; DE RUBEISA, Tullio y AMBROSINIA, Dario. Quantification of heat energy losses through the building envelope: A state-of-the-art, *Building and Environment*, 2018, vol. 146, pp. 190-205.
- PORRAS-AMORES, César; MAZARRÓN, Fernando S. y CAÑAS, Ignacio. Using quantitative infrared thermography to determine indoor air temperature, *Energy and Buildings*, 2013, vol. 65, pp. 292-298.
- ROCHA, J. H. A.; SANTOS, C.F. y PÓVOAS, Y.V. Evaluation of the infrared thermography technique for capillarity moisture detection in buildings, *Procedia Structural Integrity*, 2018, vol. 11, pp. 107-113.
- SCHNEIDER, Lucas. *Las 25 recomendaciones de la IEA en políticas públicas sobre eficiencia energética. Observatorio de la Energía, Tecnología e Infraestructura para el Desarrollo* [en línea]. 2015, junio. [Consultado 01 noviembre 2018]. Disponible en: <http://www.oetec.org/nota.php?id=1258&area=7>
- TEJEDOR, Beatriz; CASALS, Miguel; GANGOLELLS, Marta y ROCA, Xavier. Quantitative internal infrared thermography for determining in-situ thermal behaviour of façades. *Energy and Buildings*, 2017, vol. 151, pp. 187-197.
- THOUVENEL, Julie. *Find a modern and quick method to determine the U value and the thermal characteristics of a building envelope using an IR camera* [en línea]. Master of Science Thesis.
- KTH School of Industrial Engineering and Management. Energy Technology. Stockholm, 2012. [Consultado 1 noviembre 2018]. Disponible en: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:603444/FULLTEXT01>



RENTABILIDAD DE LAS ESTRATEGIAS PASIVAS DE EFICIENCIA ENERGETICA PARA LA INDUSTRIA DEL VINO. ANÁLISIS TERMO-ENERGÉTICO Y ECONÓMICO

THE COST EFFECTIVENESS OF PASSIVE ENERGY EFFICIENCY STRATEGIES FOR THE WINE INDUSTRY. A THERMAL-ENERGY ECONOMIC.

ALBA INÉS RAMOS SANZ

Doctora en Arquitectura

Universidad Nacional de San Juan (UNSJ)-Consejo Nacional de

Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET),

San Juan, Argentina

<https://orcid.org/0000-0003-4069-4740>

draarqalbaramossanz@gmail.com

RESUMEN

En el siguiente artículo se aborda un estudio cuali-cuantitativo y experimental sobre el caso de una bodega elaboradora de vinos finos, localizada en Argentina. Con ese fin, se lleva a cabo un relevamiento arquitectónico y un seguimiento térmico con sensores en las instalaciones de vinificación durante el período de molienda.

Caracterizada la industria y extraídos los datos de temperatura de los procesos y el clima, se construye un modelo de simulación en régimen estacionario. Mediante este modelo -validado con los datos reales-, se simulan estrategias pasivas aplicadas sobre la envolvente de la bodega y del tanque de fermentación. Se estiman, luego, los ahorros en la demanda energética en control térmico del proceso de vinificación obtenidos a través de las estrategias pasivas simuladas. Se definen cuantitativamente las estrategias pasivas más efectivas en la reducción de la demanda energética, se elabora un presupuesto para la construcción de esas estrategias y se confecciona un flujo de fondos de diez años para cada una de ellas. A partir de este análisis integrador, se obtienen los indicadores de rentabilidad de la inversión en cada estrategia: la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Actual Neto (VAN). Posteriormente, se complementan los datos con el período de tiempo requerido para recuperar la inversión -*Período de Retorno*-, medido en años. Se analizan, finalmente, los factores económico-energéticos que inciden sobre la rentabilidad de las inversiones en eficiencia energética para el caso de la industria, distinguiendo las implicancias en el empleo entre las metodologías del *Período de Retorno* y el flujo de fondos.

Palabras clave

eficiencia energética, análisis del costo de vida, decisiones de inversión, eco-eficiencia, vinificación.

ABSTRACT

This article presents an experimental mixed-methods study on the case of a winery located in Argentina. To this end, an architectural survey was carried out, as well as thermal monitoring with sensors in the winemaking facilities during pressing. Once the industry was described and temperature data was collected for the winemaking processes and the climate, a steady-state simulation model was built. After validation with real data, the model was used to simulate passive strategies for the winery's envelope and fermentation tank. Then, the energy demand savings resulting from the simulated passive strategies used for the thermal control of the winemaking process were estimated. The most effective passive strategies for reducing energy demand were defined quantitatively. A budget was drawn up for the construction of the strategies and a ten-year cash flow analysis was carried out for each. From this comprehensive analysis, the investment profitability indicators were obtained for each strategy: the Internal Rate of Return (IRR) and the Net Present Value (NPV). Subsequently, the data was complemented with the time required to recoup the investment, the payback period, measured in years. Finally, the economic-energy factors that affect the profitability of energy efficiency investments are analyzed for the case of the wine industry and the different implications of the payback period and the cash flow methodologies are shown.

Keywords

energy efficiency, life-cycle cost analysis, investment decisions, eco-efficiency, winemaking

INTRODUCCIÓN

Los establecimientos de vinificación son energético-dependientes: su rentabilidad decrece con el incremento del precio de la energía y su requerimiento eléctrico -directamente relacionado a la tecnología empleada- es superior en la medida que aumenta la calidad del vino elaborado. El precio de la electricidad en algunos países vitivinícolas presenta una tasa subsidiada para la industria. Este es el caso de EEUU, cuyo costo es de US\$ 0,07/kWh, y fue el de Argentina durante décadas y hasta el año 2015, momento en el cual los costos energéticos eran de US\$ 0,03 /kWh (Ministerio de Energía y Minería, 2015). Ambos países se encuentran entre los cinco mayores productores de vinos del mundo, alcanzando, en ese sentido, las cifras de 15 millones de hectolitros y 22 millones de hectolitros, respectivamente (Organización Internacional de la Viña y el Vino, OIV; 2018). Según datos oficiales, en Argentina el 25% de la demanda energética corresponde al sector industrial, lo que constituye un 15% por debajo de las estadísticas globales en donde la industria se posiciona en un 40% de la demanda energética mundial (Banco Mundial, 2018). De este total, en Argentina, el 35% de la energía utilizada es eléctrica, de fuentes de origen secundario. Aproximadamente el 60% corresponde a gas distribuido en redes y el resto (15%) a diversos tipos. La demanda energética en las bodegas es estacional y se incrementa significativamente durante la época de molienda y fermentación, coincidente con el período más cálido del año, momento en el cual los sectores residencial, comercial e industrial compiten simultáneamente por la oferta energética. En EEUU¹, los requerimientos de frío en los ámbitos de fermentación y conservación comprenden el 23% de la carga total de frío en una bodega (Galitsky et al., 2005). Otras fuentes (Department of Industry, Tourism and Resources, 2012) aseguran que la demanda energética en refrigeración es de entre el 40% y el 60% de la demanda total en bodega. Por su parte, Ramos Sanz (2014) sugiere que el requerimiento energético en los fermentadores de acero inoxidable es de entre el 50% y el 70% de la demanda energética de la bodega inserta en un contexto de clima cálido-árido.

El origen de esta creciente demanda energética en la industria radica, por un lado, en la mayor automatización de los procesos y, por el otro, en el cambio climático. Las tradicionales bodegas de la región solían controlar la temperatura de sus productos mediante recursos geotérmicos, como agua subterránea. Sin embargo, los vinos de alta gama exigen rigurosos parámetros térmicos, solo obtenidos con control automatizado. Algunas empresas se han modernizado e incorporado tecnología de acero inoxidable conectadas a centrales térmicas, con el fin de no quedar rezagadas por la competencia. En las zonas vitivinícolas de Cuyo, la época de la molienda está condicionada por veranos con elevadas temperaturas exteriores, superiores a los 30°C que incrementan el requerimiento de energía en control

térmico. Investigaciones previas (Ramos Sanz, 2018) revelan una marcada rampa térmica y una correlación entre la temperatura del vino en el tanque y la temperatura del aire, del clima en el exterior. El mencionado fenómeno de la creciente demanda energética en las industrias, sumado al impacto del calentamiento global en las temperaturas exteriores, y el incremento en el costo de la energía, promueve la búsqueda de opciones que persigan la ecoeficiencia en la industria. En las economías vitivinícolas del mundo como el Reino Unido, Australia y Estados Unidos, se fomenta la búsqueda de estallaciones mediante programas, documentos técnicos y herramientas tales como *Best Winery* (2005; EEUU), *British Columbia Sustainable Winegrowing Program* (2011; UK) y *Winery Energy Saving Toolkit* (South Australian Wine Industry, 2018). A continuación, se citan algunos resultados cuantitativos obtenidos mediante la implementación de estrategias pasivas en la industria vitivinícola (Ramos Sanz, Juanicó y Kuchen, 2016):

- Franson (cit. Ocaña y Cañas, 2000) indica que la construcción de cavas reduce los costos energéticos en refrigeración del vino en un 10%, recuperando la inversión en siete años.
- Galitsky et al. (2005), señalan que el aislamiento térmico de los tanques incide en un ahorro medio del 25% de energía en refrigeración. Sin embargo, en este estudio, como en el de Franson, no quedan establecidos los datos de temperatura del ambiente exterior ni las características de la envolvente de la bodega. Los valores porcentuales son, asimismo, indeterminados en cuanto al costo de la electricidad y la demanda térmica por volumen de vino conservado.

Un estudio más preciso, desarrollado por Forsyth (2012), detalla un costo en refrigeración de \$0,007/HL de vino por semana –asumiendo un precio de electricidad de \$0,15/kWh para conservar la temperatura en 5°C. En salas más cálidas, este costo asciende a \$0,022/HL por semana, para mantener la misma temperatura. Este caso se asienta en una zona cálido-árida, con temperaturas medias exteriores semejantes a las del presente estudio.

Las técnicas de construcción muestran marcadas diferencias entre zonas vitivinícolas. En EEUU, es práctica común la construcción prefabricada, mientras que en Argentina se construye *in situ*, con materiales tradicionales. Este factor implica mayores tiempos de obra y largas inversiones, promoviendo la conservación y restauración de estructuras preexistentes, tales como los depósitos de vino de mampostería y hormigón armado. En Argentina, esta técnica de guardado del vino se difundió masivamente y hasta la actualidad el 68% del vino elaborado reposa en ese tipo de depósitos (Instituto Nacional de Vitivinicultura, 2018). Hasta aquí se ha hecho referencia a los beneficios logrados mediante la aplicación de estrategias pasivas a la envolvente de bodegas de países caracterizados por una economía fuerte y estable. Las inversiones realizadas

en las construcciones sustentables de estas industrias podían estimarse en base a datos constantes, tales como los costos de construcción, de la energía y de la tasa de interés. En algunos de los países vitivinícolas se encuentran tasas de interés en dólares muy distintas, como en Francia (0,87%), España (1,57%), Portugal (1,92%), frente a los valores ofertados por EEUU (3,19%) y Argentina (7%) (Datosmacro, 2018). La diferencia entre los porcentajes reside en la necesidad de financiamiento y otros factores como el riesgo de mercado y el riesgo país. Estas tasas de interés asisten a la toma de decisiones de inversión de una empresa, y cuanto mayor sea su rendimiento esperado, mayor es su incidencia en la inversión.

En Argentina, en el año 2015, se llevó a cabo una investigación (Ramos Sanz, Juanicó y Kuchen, 2016) sobre el potencial de recuperación o *Período de Retorno* de la aplicación de estrategias bioclimáticas a la envolvente de bodegas, en un escenario en el cual el costo de la energía era más de 300 veces más económico que en la actualidad. Si bien los ahorros energéticos de las bodegas de diversos países pueden ser aproximados en términos relativos -según un mismo contexto climático-, el potencial de rentabilidad en inversiones en estrategias pasivas sobre la envolvente de la industria varía en función del escenario macroeconómico nacional. Hoy, los elevados costos de la energía incentivan la búsqueda de otros recursos energéticos sustitutos o complementarios a los recursos energéticos convencionales, como la biomasa, y a incrementar el ahorro energético, a través de la eficiencia energética y del uso racional de la energía. Por otra parte, en el trabajo citado, no se contempla el efecto inflacionario, sino que la recuperación de la inversión se comporta como una renta fija a una tasa cero; factores irreales en la mayoría de las economías latinoamericanas (CEPALSTAT, 2018).

En este contexto, aparece la Ecoeficiencia (Hansen y Mowen, 2006) como una nueva perspectiva corporativa situada entre los pilares de la sostenibilidad ambiental y la eficiencia en costos. De esta manera, la Ecoeficiencia se ha consolidado como un nuevo paradigma productivo, como lo evidencia el impuso de la Bioeconomía en los últimos años. La Bioeconomía promueve una economía basada en el empleo eficiente de los recursos productivos con una mayor sostenibilidad ambiental y económica para la sociedad (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, 2018), planteándose como una opción estratégica para alinear dichos objetivos. La Bioeconomía constituye una reinención de los conceptos de "economía azul" o "ecológica", y se sustenta en metodologías como el Análisis del Ciclo de Vida o ACV -LCA, por sus siglas en inglés. Para efectuar un Análisis del Ciclo de Vida de un producto u organización (Hansen y Mowen, 2006) es necesario proceder en tres pasos: (1) realizar un inventario de los recursos empleados; (2) efectuar un análisis del impacto ambiental del empleo de dichos recursos; y (3) identificar y/o traducir el costo ambiental en un costo económico para la organización, el objeto producido o la actividad, a lo largo del período de vida considerado.

El último paso, conocido como *Life Cycle Cost Analysis* (LCC) es uno de los procedimientos menos aplicados dentro del Análisis del Ciclo de Vida, al reunir apenas un 2% de los estudios publicados en Argentina (Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 2015). Sin embargo, en otras economías del mundo, el LCC ha sido desarrollado y ampliamente utilizado, especialmente por los organismos gubernamentales, a fin de estimar los retornos en las inversiones del Estado. Tal es así el caso del gobierno de los Estados Unidos, el cual implementó esta herramienta durante más de diez años y aún continúa actualizando los valores de los factores utilizados en los análisis del LCC (National Institute of Standards and Technology, NIST, 2017). Algunos análisis de costos se simplifican mediante procedimientos sencillos como el *Período de Retorno*, en los cuales las variables explicativas, como la tasa de interés, la tasa de inflación, el tipo de cambio, no se consideran y solo se estima el retorno de la inversión sin mayores complejidades. En el universo empresarial estos procedimientos son escasamente empleados. Los procedimientos de LCC son integradores de estas variables macro y posibilitan simplificar la complejidad del análisis en los indicadores de inversión Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR). En este trabajo, se alcanzan los resultados para el VAN y la TIR en un escenario 2018 de cierta incertidumbre macroeconómica, simplificada con un método determinístico que permite facilitar la toma de decisiones de inversión en el ahorro energético obtenido mediante la optimización pasiva de envolventes industriales de bodegas. Entre las estrategias pasivas aplicada a la envolvente, se consideran dos estrategias de optimización sobre la envolvente de bodega y tres estrategias sobre la envolvente del tanque de fermentación, en el contexto de clima árido de la zona vitivinícola de la Región de Cuyo. Para la proyección de la inversión en las mejoras pasivas sobre la envolvente de bodega y tanque, la investigación se rige por los precios actuales locales de la energía y las variables del escenario macro-económico del segundo semestre de 2018, en Argentina.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA GEOGRÁFICA DE ESTUDIO

El valle del Tulum, donde se asienta la ciudad de San Juan -Región de Cuyo-, se ubica a 600 msnm, en los 30° 52' de Latitud Sur y 68° 59' de Longitud en dirección Oeste (Figura 1). Presenta elevadas temperaturas medias máximas de verano (TMX; 38°C), considerándose una zona cálida, con amplitudes térmicas diarias superiores a los +/- 14 K (IRAM11603, 1996). A lo largo del año, los vientos son de dirección predominantemente Sur. La velocidad de los mismos se duplica en verano, alcanzando una media de 13 km/h. El efecto de la radiación solar es determinante en la carga térmica; en verano, en horas del mediodía, se registra una intensidad de hasta 850 W/m². En esta época, los aportes solares son significativos sobre el plano horizontal y Este-Oeste. Entre las zonas vitivinícolas del mundo, esta es reconocida por presentar un alto riego

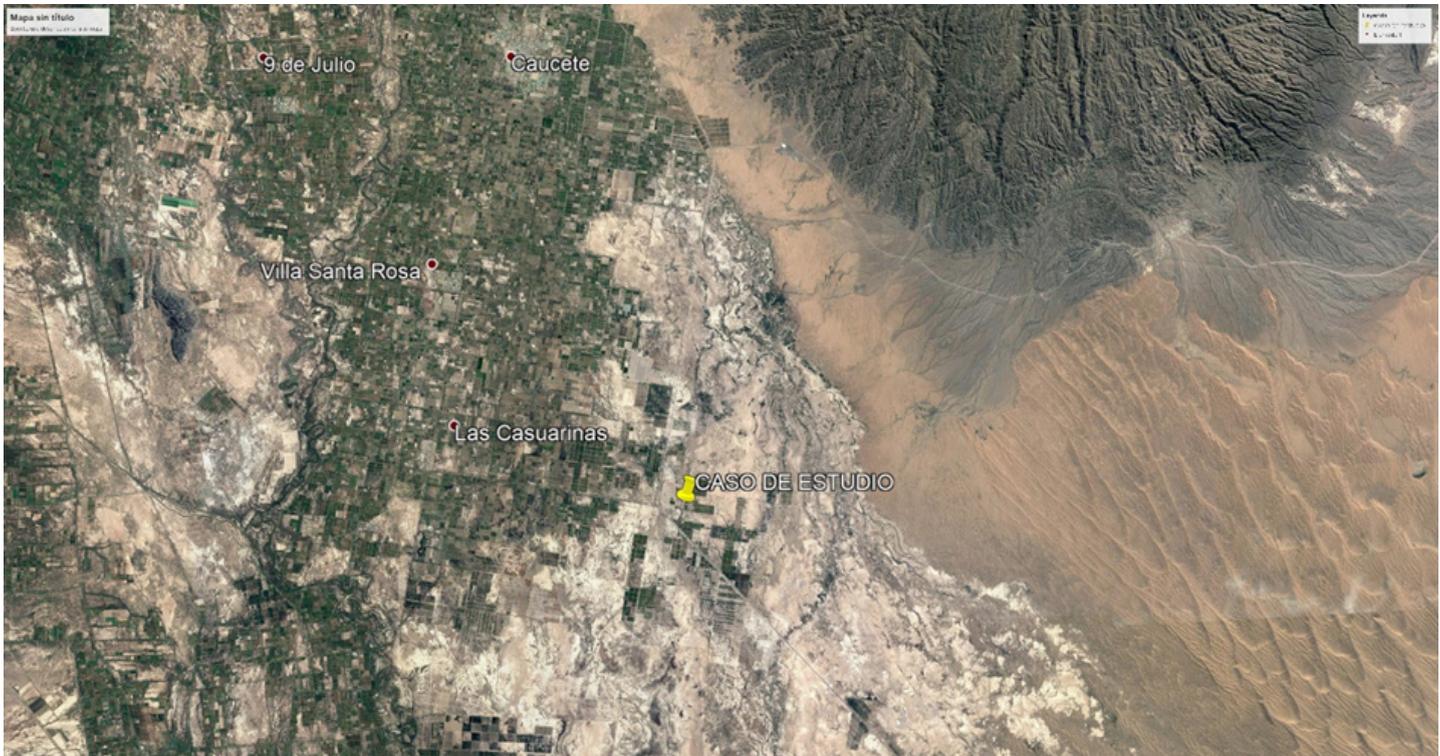


Figura 1. Imagen satelital del Valle del Tulum, Ullum y Zonda, en la Provincia de San Juan. En el mapa se encuentra señalada la ubicación del caso relevado. Fuente: Google Earth Pro (US Dept. of State Geographer, 2018).

ambiental combinado con riesgo de inversión. Los riesgos ambientales asociados a la zona productiva se vinculan con la alta sismicidad y con el cambio climático, debido al cual las áreas óptimas para el cultivo de la vid se desplazan hacia el sur del continente (Institute of Technology et al., 2018).

METODOLOGÍA

Como se ha mencionado, se aborda aquí un caso de estudio de naturaleza cuali-cuantitativa de una envolvente de bodega y un caso de envolvente de vasija vinaria de acero inoxidable –ambas denominadas *envolventes de vinificación EV-*, cuyo contenido en vino se halla en estado inerte, esto es, el producto ha finalizado su fermentación y se ha estabilizado. El monitoreo térmico comprende también el espacio interior de una bodega (Figura 2). Concretamente, se obtienen los registros de demandas energéticas de tres años consecutivos y se lleva a cabo un seguimiento con sensores de temperatura, durante los meses cálidos de la molienda.

Para estimar el potencial de diversas estrategias pasivas de optimización de la envolvente de la bodega o de la envolvente de la vasija vinaria, se efectúa un experimento mediante simulación térmica, utilizando una herramienta propia desarrollada para cálculos en régimen estacionario e instrumentando las diversas capas de envolvente como

variables. Esta herramienta ha sido validada (Ramos Sanz, 2014) mediante datos obtenidos con sensores de temperatura, localizados en el interior de las envolventes abordadas. Existen otros antecedentes sobre el desarrollo de herramientas de simulación aplicadas a envolventes industriales, como los trabajos de Tinti et al. (2014; 2017).

a) Demanda energética de la bodega.

La demanda energética media anual en el caso de la bodega analizada es de 27000 kWh, con una máxima de 25633,28 kWh/mes. Mediante el relevamiento de las instalaciones de la bodega, se confirma que la mayor parte de esta demanda tiene su origen en el funcionamiento del equipo de frío (69%). Se estima, a partir de la lectura de los motores, que el procesamiento de materia prima requiere el 13% de la demanda energética total. El desplazamiento de materia prima se caracteriza por una demanda aproximada (12%), igual a 4146 kWh/mes. La iluminación, a pesar de no poseer equipos de alto rendimiento lumínico, presenta poca incidencia relativa en la demanda energética total, alcanzando un 6%. El empleo de ventiladores en el sistema de frío comprende el 54% de la demanda en refrigeración (13842 kWh/mes). Este valor supone también el 34,4% de la demanda energética total. El valor de la energía eléctrica se ha incrementado significativamente desde 2015 y actualmente el kWh promedio (fijo y variable) sin impuestos alcanza los ARS\$1,93. Para las industrias, este valor puede variar ya que se imponen otros factores como un cargo fijo y se contrata potencia aparte. Además, las industrias



Figura 2. Interior de la bodega modelada y vista de la batería de tanques de acero inoxidable modelados para este trabajo (izq.) y de acero negro recubierto con epoxi (der.). Fuente: Empresa VC SA (2018).

en general disponen de equipos de autogeneración de energía -aunque no en el caso de estudio-, por lo cual la proximidad entre lo consumido y lo demandado en las estadísticas oficiales puede tener cierta inexactitud. De esta manera, a modo de aproximación, se considera como valor de referencia el costo definido por unidad de energía.

b) Monitoreo higr-térmico.

Se lleva a cabo mediciones con sensores data-loggers *HOBO U12 T12*, localizados en tres sitios: el seno del vino, el interior de la bodega y el ambiente exterior. Este sensor permite las lecturas de temperatura, humedad relativa e iluminancia se registraron cada media hora durante el período de cincuenta días corridos. No obstante, para mayor seguridad, el sensor se protege con una envoltura plástica hermética y se lo suspende desde la tapa del tanque hasta la superficie del fluido. A través de las mediciones, se obtienen datos de T_e (°C), T_i (°C), Irradiancia solar (W/m^2) y Humedad relativa (%), siendo los dos primeros los datos útiles para esta investigación. Estos registros se descargan y se procesan como información estadística: desviación estándar, media, valores máximos y mínimos.

c) Modelo físico.

Con los datos estadísticos resultantes del seguimiento térmico y el relevamiento de las instalaciones, se desarrolla un modelo físico determinístico del tanque de acero inoxidable de 36000 L de capacidad y un modelo físico de la envolvente de la bodega. Con los parámetros de la

distribución de temperaturas interiores (media, desviación estándar) de los datos recogidos con los sensores, es posible simular las estrategias. Esta información constituye los datos de entrada al modelo, en régimen estacionario. Los resultados de la simulación de las estrategias no son validadas con datos reales, dada la dificultad de ejecutar prototipos a escala y de tomar registro de la temperatura en el interior de la misma. Ramos Sanz (2014) expone un apartado sobre la validación del modelo de simulación mediante observación de la evolución de las salidas del modelo para cada caso, y otros procedimientos metodológicos útiles para el presente trabajo.

Se toma el caso más desfavorable y puro, como aquel en el cual la empresa como única inversión adquiere un tanque de acero inoxidable de 36000 L y lo ubica a la intemperie, sin ninguna clase de estructura de protección ni de aislación térmica. Este es un hecho frecuente entre las empresas que desean expandir su producción, minimizando la inversión inicial. A partir de este modelo, se implementan las variaciones en la envolvente, a través de la incorporación de capas, aislación directa de diversos espesores, o bien, estructuras independientes -edilicias- de protección (sombra), estructuras independientes cerradas (galpones) o estructuras subterráneas (cellas). Estas estructuras independientes se modelan y simulan considerando las dimensiones reales de los casos base considerados -vasija y galpón-. Se realiza un análisis térmico en régimen estacionario y se definen condiciones

de frontera de convección y radiación combinadas. La transferencia de calor se estima en dirección perpendicular al plano de las superficies de envolventes de tanque y bodega. El modelo no contempla puentes térmicos, ya que la envolvente se supone homogénea y se determina que la masa del vino no presenta estratificación térmica en el modelo. Esto halla su fundamento en la alta eficacia del sistema de frío con camisa de refrigeración y el reducido volumen del sistema de control. Se calculan los coeficientes de intercambio térmico superficial interior y exterior $-h_i$ y h_e , respectivamente- mediante los números adimensionales. Los intercambios por convección natural en el interior de la vasija se obtienen a partir de los números adimensionales de *Nusselt* (*Nu*), *Rayleigh* (*Ra*) y *Prandtl* (*Pr*). Para determinar la convección forzada en el exterior, se estima *Nu* a partir del número de *Reynolds* (*Re*). En el interior de la bodega, la convección es natural y su flujo se desplaza en dirección ascendente. Esta suposición se verifica con los valores de *Nu* (3). Para el cálculo de la convección natural o forzada en el vino (h_{ic}), se propone el siguiente modelo empírico;

$$h_{ic} = Nu \frac{\lambda_{fluido}}{H} \quad (1)$$

Para la convección natural, se obtiene *Nu* mediante:

$$Nu = 0,678 Ra^{1/4} \left(\frac{Pr}{0,952} + Pr \right)^{1/4} \quad (2)$$

$$Ra = \frac{g \left(\frac{1}{273,15} + T_e \right) [(T_e - T)H^3]}{v_{fluido} \alpha_{fluido}} \quad (3)$$

$$Pr = \frac{v_{fluido}}{\alpha_{fluido}} \quad (4)$$

En aquellas bodegas que engloban un espacio cerrado, la velocidad del aire se estima en 0,20m/seg, conformando dos áreas estancas, una fría abajo y una caliente arriba; la convección es mínima $h_{ic} = 1,16 \text{ W/m}^2\text{°C}$. En el ambiente exterior a la bodega, el coeficiente de intercambio térmico por convección se obtiene mediante (2):

$$h_{ec} = Nu \frac{\lambda_{fluido}}{H} \quad (5)$$

$$Nu = [0,32 + 0,43 Re^{0.52}] \quad (5)$$

$$Re = \frac{V_{fluido}H}{v_{fluido}} \quad (6)$$

La energía neta que capta un elemento opaco expuesto a la radiación solar se obtiene a partir de la siguiente expresión;

$$Qr = \alpha I + \epsilon \sigma (T_{cielo}^4 - T_{sup}^4) \quad (7)$$

En las situaciones experimentales que implican estrategias de construcción de depósito subterráneo, se calcula la variación térmica a partir de la naturaleza de los estratos del suelo. En la localidad seleccionada, el régimen

de temperatura del suelo es térmico, con valores de temperatura media anual (TMA) entre los 15°C y los 22°C. Hacia los estratos montañosos la TMA va descendiendo; en la pre-cordillera, la TMA es de entre 8 y 15°C y, en la Cordillera de los Andes, la TMA es inferior a los 8°C. Hasta los primeros 7 m de profundidad el suelo se compone de tierra vegetal y desde los 8 m hasta los 43 m se encuentran los estratos arenosos. Con el objetivo de determinar las condiciones térmicas a cualquier profundidad *z*, se utiliza la ecuación de Labs (1982).

$$T_{(x,t)} = (Tm_{suelo}) - A_s(aire) e^{-x\sqrt{\pi/365\alpha}} \cos \left[\frac{2\pi}{365} \left(t - t_0 - \frac{x}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}} \right) \right] \quad (8)$$

Cuando la $T_{(x,t)}$ no se conoce, suele utilizarse el valor de la $T_{(x,t)}$. En este caso, se recurre a los datos de TMA expresados anteriormente. La aplicación de esta ecuación experimental ha dado resultados válidos en EEUU, Australia y Portugal.

d) Indicadores de rentabilidad.

Los indicadores de rentabilidad asisten a la toma de decisiones de una inversión, a partir de un escenario determinado por factores tales como el número de períodos de la inversión, los flujos positivos (ahorro económico en energía) y negativos (inversión en mejoras), la tasa anual de interés nominal (TNA), etc. Los datos requeridos son los costos de inversión en construcción u optimización térmica de la envolvente de análisis, medidos en moneda local. En Argentina, a pesar de no tratarse de una economía formalmente dolarizada, la formación de precios presenta una componente de un 50% de incidencia por productos o servicios de origen local y un 50% de productos o servicios importados, dependiendo del sector, pero esto indica que el tipo de cambio nominal (ARS\$/US\$) afecta al menos en la mitad del presupuesto. Los costos de cada estrategia de optimización de la envolvente se estiman a partir de los casos reales: (1) tanque de fermentación o vasija de acero inoxidable de 36000 L de capacidad y (2) el caso de la envolvente edilicia de la bodega, para el cual el presupuesto se calcula en función de la superficie unitaria requerida para dar guarda al tanque de acero inoxidable, es decir, que es función de la unidad productiva definida por el tanque. El período del proyecto de inversión en estrategias pasivas, medido en años, debería contemplar el plazo de amortización de los bienes de uso, de dos años para maquinaria y hasta cincuenta para construcciones. También debería considerarse el impacto de los impuestos (ganancias, impuesto al valor agregado, etc.) que condicionan significativamente la inversión. Así también, ha de considerarse la financiación, ya sea con capital propio o mediante deuda. Todos estos detalles pueden adicionarse al armado del flujo de fondos y, así, conseguir la mayor precisión posible. Sin embargo, reconociendo que en el año 2018 ha sido difícil efectuar una proyección en un período superior a un año, dada la volatilidad del tipo de cambio y la inestabilidad que ello provoca en el riesgo país y las tasas de interés y de inflación resultantes, se conducirá el trabajo de manera tal que se obtenga una caracterización del potencial de inversión en estrategias pasivas de ahorro energético

en las industrias, sin introducir las complejidades de las variables que se han mencionado. Reconociendo, entre las variables económicas, la tasa de interés como variable crítica, se proyectan diversos *inputs* (tasas del 10, 20, 30 y 40%), siendo el 40% el valor convalidado hoy por el Banco Central de la República Argentina (BCRA; 2018). Con estos datos, se confecciona el flujo de fondos para cada año y se estima el Valor Actual Neto de los flujos en la totalidad del período (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Podemos definir ambos indicadores como sigue (Gitman y Zutter, 2012):

$$VAN = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{BN_t}{(1+r)^n}$$

En donde I_0 es la Inversión inicial, BN son los beneficios netos del período y r es la tasa de interés o costo de oportunidad, elevada a n períodos considerados. La TIR es, por definición, la tasa que hace que VAN sea igual a cero, por esto la misma ()debe despejarse de (9);

$$VAN = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{BN_t}{(1+r)^n} = 0$$

e) Validación del modelo térmico.

Con los datos estadísticos resultantes del seguimiento térmico, y el relevamiento de las instalaciones, se desarrolla un modelo físico determinístico del tanque de acero inoxidable de 36000 L de capacidad y un modelo físico de la envolvente de la bodega. Con los parámetros de la distribución de temperaturas interiores (media, desviación estándar) de los datos recogidos con los sensores, es posible simular las estrategias. Esta información constituye los datos de entrada al modelo en régimen estacionario; se estima, entre los datos recogidos con sensores, la media de T_e en 25,4°C y la T_i del vino, como variable respuesta, en 23,8°C. Se definen las variaciones térmicas horarias de los datos recogidos con sensores, resultando una media μ igual a 0,82°C*hora con una σ igual a +/- 0,64°C*hora (Tabla 1).

Por otra parte, en el modelo determinístico en régimen estacionario, se introducen los datos de entrada tomados de los datos registrados con los sensores, promedio de T_e en 25,4°C y de T_i en 23,8°C. Los resultados del modelo señalan una carga horaria en un rango entre 0,44°C*hora y 0,68°C*hora, una σ de +/- 0,17°C y una μ igual a 0,61°C*hora. El límite inferior del rango responde a una fermentación lenta, con baja intensidad exotérmica. El límite superior del rango indica el resultado de una fermentación violenta con elevada producción de energía exotérmica.

Una campana de Gauss para las temperaturas simuladas sería más baja y angosta que una campana de Gauss de datos de temperaturas reales. Si bien los resultados de la simulación se encontrarán estadísticamente dentro de los

Parámetros de la distribución normal	T_i (°C) Media horaria (μ)	T_i (°C) Desviación estándar horaria (σ)	T_i (°C) Rango de variación horaria
Modelo	0,61	+/- 0,17	0,44< T_i <0,79
Caso (sensores)	0,82	+/- 0,64	0,17< T_i <1,45

Tabla 2. Parámetros de la distribución normal para el modelo de simulación y los datos reales de temperaturas interiores. Fuente: Elaboración de la autora en base a datos de la simulación y monitoreo

datos reales posibles y confiables, debe contemplarse que los mismos podrían ser inferiores a los reales hasta en un límite superior del 25% de décima de grado centígrado².

RESULTADOS

En la etapa de obtención de resultados, se modelan y experimentan las siguientes situaciones sobre la envolvente bodega:

I - Enterramiento, celda vinaria o depósito subterráneo donde el vino se acumula a granel.

II - Dentro de la sala de conservación, envolvente elevada a nivel sobre rasante, expuesta en su totalidad al entorno excepto el piso. Recinto cerrado con escasa ventilación.

III - Ídem anterior, edificación elevada a nivel de suelo -sobre rasante-, cerrada y con escasa ventilación natural. La envolvente en este caso se le ha efectuado un reforzamiento adiabático en cubierta y muros para espesores (e) desde 0,04 m; a 0,08 m y hasta 0,12 m.

Asimismo, se modelan y experimentan las siguientes situaciones sobre el tanque o vasija de fermentación;

IV - Exposición del tanque a la radiación solar con reforzamiento adiabático mediante espuma de poliuretano (e) 0,10 m.

V - Exposición directa del tanque a la radiación solar, sin mejoras.

VI - Disposición del tanque a la intemperie, bajo una estructura metálica con cubierta liviana.

I - Enterramiento, celda vinaria o depósito subterráneo donde el vino se acumula a granel.

Como se observa en la síntesis presentada en la Tabla 2 y la Figura 3, los mayores ahorros en cargas térmicas de las estrategias simuladas se alcanzan mediante la construcción de un depósito de subterráneo de mampostería de ladrillón

[2] Para ampliar la información, en Ramos Sanz, A. (2015) existe un apartado sobre la validación del modelo de simulación para cada caso, y otros procedimientos metodológicos.

u hormigón armado, de 0,27 m de espesor de muro, con revoque interior cementicio y terminación con pintura epoxídica. Las cubiertas de estas envolventes, así como los contrapisos, son de hormigón armado *in situ*, de 0,20 m de espesor. En este tipo de envolventes es posible reducir significativamente el empleo de equipos de control térmico, al punto de prescindir de ellos. Anteriores seguimientos térmicos de casos subterráneos con envolventes de iguales espesores indican una amortiguación de las variaciones climáticas que garantiza la estabilidad térmica del vino. No obstante, la temperatura del vino tiende a estabilizarse con la TMED anual en 26,4°C, ampliamente superiores a los 15°C admisibles para la temperatura de conservación. La estrategia de construcción de un depósito de vino o una cella vinaria requiere una inversión inicial significativa pero menor que la construcción de una bodega sobre rasante, si ésta no es una cava. En esta inversión, el terreno natural funciona como un sumidero de calor, promoviendo una variación térmica horaria reducida (-0,0021 K/h). Este efecto se debe a la tendencia de la masa del vino a estabilizarse con la TMED anual del terreno, ubicada entre los 15°C y 16°C. El vino –que está constituido en un 95% por agua– tiene gran inercia térmica, por lo que es térmicamente más eficiente un depósito lleno de vino o cisterna que una cava, ya que el espacio que encierra esta última se encuentra ocupado por aire.

Los monitoreos térmicos realizados en cisternas de conservación del vino confirman que la TMED anual del aire se manifiesta en el cuerpo del vino con meses de retardo. Considerando la técnica de decisiones de inversión simplificada, como el Período de Retorno, el “retorno” de esta medida es de cuatro años, dado el gran ahorro energético en control térmico que ésta supone. Sin embargo, introduciendo el efecto de la variable crítica “tasa de interés” en el flujo de fondos de la inversión a diez años, se observa que en el escenario 2018, con un 40% de tasa de interés, un VAN negativo se contradice con una TIR del 27%. Para que el valor actual neto sea favorable, es decir, positivo, la TIR debe ser menor al 27%, lo cual en el contexto 2018 es difícil puesto que las tasas de financiamiento superan el 40% de interés nominal anual (TNA).

En la Figura 4 se observa que, cuando la TIR es del 20%, el VAN del proyecto es positivo, o sea, que no sólo se recupera la totalidad de la inversión, sino que además se genera riqueza mediante el ahorro energético promovido por la optimización de la envolvente. En este sentido, la empresa se encaminaría a una inversión ecoeficiente exitosa. Respecto de la construcción de una cava, la cual se encuentra ocupada por aire y en su interior se aloja el tanque de acero inoxidable, se advierte que la rentabilidad de la inversión se ve reducida drásticamente debido a los costos de adquisición del tanque, cuyo precio se encuentra afectado por la apreciación del tipo de cambio (28 ARS\$/US\$). Si bien esta inversión genera ahorros energéticos

Estrategia pasiva	Carga térmica (Wh*EV)
Depósito subterráneo	-78
Radiación directa + Adiabática (esp. de poliuretano)	15644
Radiación directa (a la intemperie, sin optimizar)	15817
Estructura liviana de sombreado	6276
Estructura edilicia + Adiab. 0,04 m	2079
Estructura edilicia + Adiab. 0,08 m	1973
Estructura edilicia + Adiab. 0,12 m	1049
En galpón (real, sin optimizar)	2181

Tabla 1. Demanda térmica en control de temperatura para el vino depositado en las diversas envolventes optimizadas con estrategias pasivas. Fuente: Elaboración propia en base a datos de la simulación termo-energética

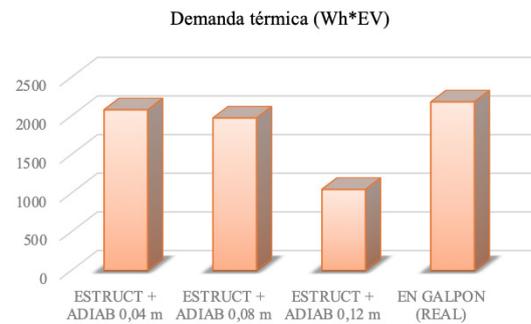


Figura 3. Demanda Térmica de distintas estrategias pasivas aplicadas sobre la envolvente de la bodega, comparada con el estado real de la envolvente de bodega sin optimizar. Fuente: Elaboración propia en base a datos de la simulación termo-energética.

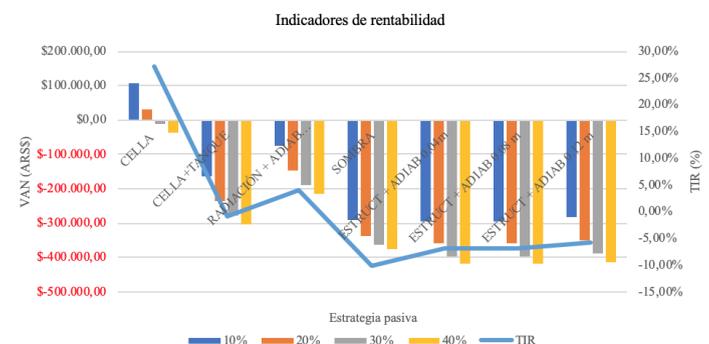


Figura 4. Rentabilidad de las inversiones en cada estrategia pasiva simulada sobre las envolventes de vasija vinaria y bodega, en un horizonte de diez años. Fuente: Elaboración de la autora en base a datos de la simulación termo-energética y análisis financiero.

en control térmico, en términos de la inversión vemos que el Período de Retorno es de 11 años, con una TIR y VAN negativos. Aun considerando una tasa de interés del 10%, la inversión no resulta rentable (Figura 4). Puede extenderse el resultado de esta simulación a otras envolventes de vino de menor escala como las botellas de vino y las bordalesas, en las cuales el impacto de la temperatura del aire en la cava es aún mayor sobre el volumen de estas unidades.

II - Tanque alojado dentro de la sala de conservación sobre rasante, con escasa ventilación.

Se supone, en este modelo, que el tanque se halla en el interior de una envolvente edilicia cuyas características constructivas responden a muros de ladrillón de 0,27 m de espesor, sin revoque interior ni exterior, vigas y cubierta de metal y piso de hormigón armado. Se determina, mediante la simulación, que la incorporación de aislante térmico en muros y reforzamiento adiabático en cubierta resulta efectivo en la medida que el espesor mínimo del aislante sea superior o igual a 0,12 m. Como se aprecia en Tabla 2, entre los 0,04 m y los 0,08 m de espesor de poliestireno, los ahorros en la demanda térmica no difieren considerablemente entre sí y reducen el 3,5 % de la misma. La aplicación de 0,12 m de telgopor (tres planchas) permite el ahorro de un 54 % del total de la demanda de frío (Figura 3). La construcción de una bodega para alojar los tanques promueve un ahorro energético significativo y, si bien la medida se encuentra entre las inversiones más importantes, el dinero invertido se recupera en un plazo de 15 años. La carga de frío se reduce en un 86 % del total, aunque los indicadores de rentabilidad no señalan estas opciones como favorables ya que tanto la TIR como el VAN son negativos (Figura 4). En esa dirección, la construcción de una bodega para alojar los tanques es atractiva desde una significativa disminución de la demanda térmica, pero poco factible desde la rentabilidad de la inversión. En este caso, habría que replantear los tiempos del proyecto de inversión, segmentando los mismos en etapas anuales con la finalidad de que la inversión inicial sea menor.

III - Exposición del tanque a la radiación solar con reforzamiento adiabático mediante espuma de poliuretano.

Es frecuente notar que las empresas invierten primero en la tecnología de fermentación y luego se preocupan por resolver la estructura edilicia. Esto conduce a que los tanques, una vez adquiridos, se instalen a la intemperie y comiencen a utilizarse al poco tiempo. En vasijas expuestas a la radiación solar, la incorporación de un aislante térmico como la espuma de poliuretano en un espesor de 0,10 m demuestra que esta técnica no reduce significativamente la demanda de frío. Este tanque se halla afectado fuertemente por el impacto de las brisas

y la intensidad de la radiación solar, lo cual, a pesar de incorporar un aislante térmico efectivo, reduce menos del 1% la carga térmica (Tabla 2). Desde el punto de vista económico, esta medida de optimización no ofrece recuperaciones sino hasta después de veinte años, en el horizonte temporal. En consecuencia, los indicadores de rentabilidad VAN y TIR son negativos.

IV - Exposición directa del tanque a la radiación solar, sin mejoras.

En este caso de estudio la empresa adquiere un tanque comercial de forma cilíndrica, de acero inoxidable de 36000 L de capacidad. Este constituye el caso base, sin mejoras, de una envolvente expuesta al entorno climático. Por esta razón el caso se modela para proporcionar la carga térmica base, estimada en 15817 Wh por tanque (Tabla 2), pero no se analiza como una inversión en optimización termo-energética. Desde la perspectiva de la rentabilidad económica, se aborda como un costo hundido, que es una inversión realizada en un momento en el tiempo, pero que no influye en la toma de decisión de la inversión futura dado que se conoce de antemano que su TIR y VAN son negativas. Al no existir un flujo positivo de fondos como respuesta al ahorro energético, no es posible aplicar la función VAN (ver función en ecuación 9).

V - Tanque a la intemperie, bajo una estructura metálica con cubierta liviana.

Aquí la empresa decide invertir en la construcción de una estructura liviana constituida por columnas y vigas de metal, cubierta de chapa metálica de zinc y contrapiso de hormigón armado. Por medio de este tinglado metálico se proporciona sombra a la envolvente del tanque, reduciendo la carga de frío en un 60%, lo que significa una recuperación de la inversión en 19 años. Sin embargo, la variación térmica horaria en el vino (+/- 0,17 K) para este caso es acentuada. Esta estrategia debe complementarse necesariamente con un sistema de frío.

CONCLUSIONES

En numerosas investigaciones se ha demostrado el beneficio que constituyen las estrategias pasivas para el ahorro energético y la sustentabilidad edilicia. Generalmente, los estudios de optimización del uso de la energía mediante tales estrategias pasivas consideran la inversión inicial requerida y la comparan con el ahorro total de energía en moneda, multiplicado por los años que se estima como vida útil. Es decir, se compara un monto inicial de inversión significativo en el momento cero, con un ahorro energético total en moneda, significativo también. Esta práctica transversal paraliza el valor del dinero en un momento en el tiempo y genera

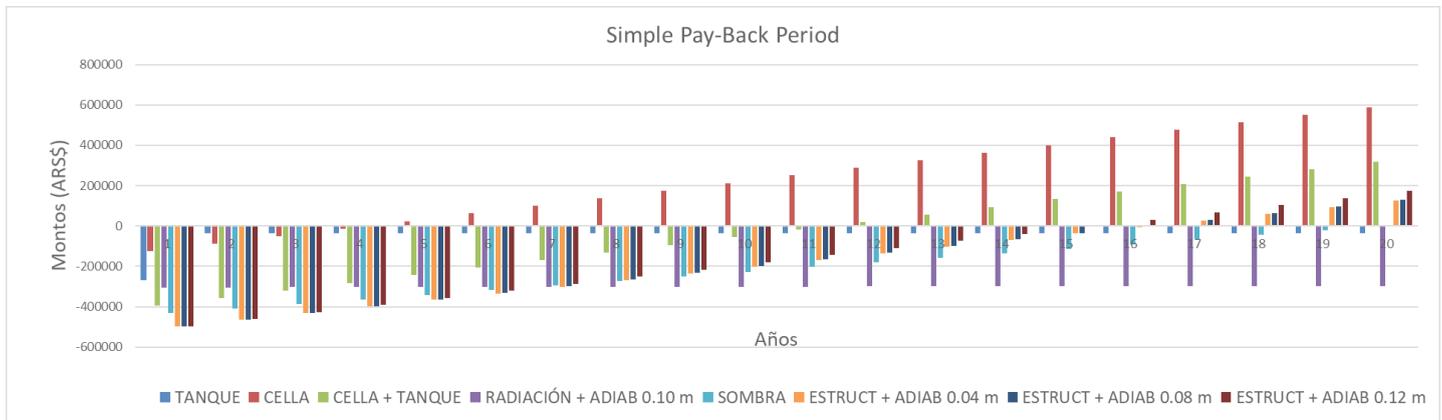


Figura 5. *Período de Retorno* para la inversión inicial en las estrategias pasivas de mejora sobre la envolvente, sin considerar la tasa de interés. Fuente: Elaboración de la autora en base a datos simulados.

que se malinterpreten los resultados efectivos producto de la implementación de las mejoras. La perspectiva financiera de la inversión comprende las variables tiempo de retorno de la inversión, tasa de interés del dinero, tasa de inflación, tipo de cambio, valor esperado de la energía, entre otras (ver Metodología, punto d). Para el caso particular de las bodegas, la demanda energética es estacional, marcada por el proceso de vinificación durante tres y hasta cuatro meses al año. Al estimar el período de recuperación de la inversión inicial en estrategias pasivas, éste solo anualiza las demandas y ahorros energéticos de los meses de elaboración del vino. De esta manera, el período de recupero de la inversión no comprende doce meses de ahorro energético al año sino de tres a cuatro meses de ahorro energético al año, disminuyendo la efectividad de la mejora en el tiempo y retrasando la recuperación de la inversión inicial. Una manera de soslayar esta particularidad para que las estrategias pasivas aplicadas a la industria sean competitivas respecto de otras estrategias aplicadas a tipologías edilicias cuya demanda energética no es estacional, consiste en concentrar los ahorros mensuales hasta completar los doce meses, disminuyendo el horizonte de recuperación. No obstante, esta técnica aleja los resultados de los estudios de los resultados de la realidad y, en consecuencia, estos últimos serán decepcionantes.

El procedimiento del Período de Retorno (Figura 5) no comprende las variables (tasa de interés, tipo de cambio, etc.) que aborda el análisis financiero de un flujo de fondos, como el ejecutado en el presente trabajo. El método del Período de Retorno se utiliza en este estudio como referencia de un horizonte temporal de ahorro energético, sin vincular variables económicas y

Estrategia de optimización: uso de la energía celda vinaria o depósito subterráneo			
TASA	VAN (ARS\$)	TIR	retorno de la inversión (años)
10%	\$16.780,88	27%	5
20%	\$9.776,65	27%	7
30%	-\$475,35	30%	mayor a 30
40%	-\$31.775,75	30%	mayor a 40

Indicadores de Rentabilidad (VAN y TIR) para la inversión en eficiencia energética mediante la construcción de un depósito subterráneo de vino, celda o cava. Período de retorno de la inversión e impacto de la tasa de interés sobre el período de retorno de la inversión. Fuente: Elaboración de la autora en base a desarrollos propios y datos estadísticos (BCRA, 2018).

financieras. Este período puede ser extenso como uno desee, a diferencia del análisis financiero en el cual el flujo de los fondos se relaciona con un período asociado, por ejemplo a la amortización del uso de los bienes de capital y/o equipamiento e insumos industriales. Este plazo puede tener relación con los impuestos locales o los intereses de un crédito bancario. Como se mencionó en la *Introducción*, el NIST (2017) del Gobierno de los Estados Unidos, reconoce la importancia del análisis de los costos a lo largo del ciclo de vida de una inversión (LCC), proporcionando los valores para las obtener las variables financieras VAN y TIR. En el ámbito académico nacional, según también se comentó, tan solo el 2% de los trabajos incluyen la complejidad y el alcance del LCC. Con el LCC se puede determinar el horizonte de recuperación de la inversión, considerando la tasa de

interés o de descuento. Como se observa en la Tabla 3, para la estrategia más energéticamente eficiente de las estudiadas en este trabajo -la construcción de una celda o depósito subterráneo de vino- se conoce (Figura 5) que el retorno de la inversión se materializa a partir del quinto año. Este tiempo coincide con una tasa del 10%. A medida que se incrementa la tasa de descuento, el retorno de la inversión se aleja dos años más para el 20% de interés, hasta superar los 30 años (30%) y los 40 años (40%).

En la Introducción se citaron algunas referencias sobre el período de recuperación de la inversión en eficiencia energética: Franson (cit. Ocaña y Cañas, 2000) indica que esta misma estrategia de construcción de cavas o cella vinaria reduce los costos energéticos, recuperando la inversión en siete años. Respecto de esta medida, en el contexto climático y económico de análisis, el período de retorno de la inversión en Argentina coincide sólo en un escenario superior a los cuarenta años. Este es un ejemplo claro del impacto que tienen las variables económicas sobre el rendimiento de las estrategias pasivas; si bien desde lo energético se alcanzan sustanciales ahorros comprobados en la demanda energética (Tabla 2 y Figura 3), la variable tasa de interés impacta en los indicadores de rentabilidad Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR) y lo más importante, en el período de recuperación de la inversión. Las tasas de interés en los países con estabilidad económica no superan el 6% en dólares, facilitando el acceso a créditos para realizar inversiones.

El costo de la energía en Argentina continúa siendo menor que en otros países, por lo cual se espera que se produzcan incrementos para equiparar los precios internacionales. Asimismo, la creciente escasez de las energías de fuentes no renovables impactará en la futura tarifa de energía eléctrica. En este trabajo no se ha considerado el efecto del valor esperado de la energía eléctrica en el horizonte temporal del análisis financiero. Este factor señala la posibilidad de que los períodos de retorno de la inversión en eficiencia energética mediante las estrategias pasivas I, II, III, IV y V pueden acortarse.

Cabe hacer una aclaración sobre el modelo desarrollado para simular las estrategias de eficiencia energética, el cual ha sido validado en el apartado *Metodología*, punto e, del presente trabajo. Los resultados de la validación revelan que el modelo de simulación termo-energética podría subestimar los ahorros energéticos obtenidos de las estrategias, hasta en un 25% de décima de grado centígrado. Por lo tanto, si se considera este factor y la tendencia creciente de los costos energéticos de fuentes no renovables, la rentabilidad (VAN y TIR) podría

diferir favorablemente a los valores obtenidos y los tiempos de recuperación, en años, podrían abreviarse. De ese modo, los resultados de este trabajo podrían ser un poco más optimistas en el ahorro energético anual, pero no en gran magnitud, dado que los factores aquí tratados impactan en el ahorro energético y económico a lo largo de los años y no inciden sobre el monto inicial de la inversión, el cual tiene el mayor peso relativo sobre los resultados de VAN y TIR en el Flujo de Fondos, al no estar afectado por la variable tiempo -y tasa-, cuyo valor de tiempo en el momento de invertir es igual a cero (I_0).

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece a la empresa VC SA por proveer las instalaciones industriales para llevar a cabo el monitoreo térmico. Se agradece, también, al Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat (IRPHa) por proveer los instrumentos realizar las mediciones. Y se agradece, particularmente, al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET) por financiar el proyecto de investigación de la autora.

NOMENCLATURAS

MODELO MATEMÁTICO TERMO-ENERGÉTICO.

h_c : coeficiente superficial de transferencia de calor por convección ($W/m^2\text{°C}$)

h_r : coeficiente superficial de transferencia de calor por radiación ($W/m^2\text{°C}$)

Ra : número de *Rayleigh* (adimensional)

Pr : número de *Prandtl* (adimensional)

Re : número de *Reynolds* (adimensional)

g : constante gravitacional (m/seg^2)

λ_{fluid} : conductividad térmica del fluido (W/mK)

ν_{fluid} : viscosidad cinemática del fluido ($Pa\cdot seg$)

v_{fluid} : velocidad del fluido ($m/seg.$)

α_{fluid} : difusividad térmica (mm^2/seg)

T_e : temperatura del aire exterior ($^{\circ}C$)

T : temperatura del vino ($^{\circ}C$)

H : altura del tanque (m)

Q_r : carga térmica por radiación (Wh)

A : absorptividad

I : irradiancia (W/m^2)

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($W/m^2 K$)

ϵ : emisividad

Modelo matemático financiero:

I_0 : Inversión inicial (ARS\$)

BN : Beneficios netos (ARS\$)

r: Tasa de interés o de descuento (%)
 p: Tasa interna de retorno (TIR; %)
 n: Períodos (años)
 t: Tiempo (años)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANCO CENTRAL DE LA REPÚBLICA ARGENTINA. *Publicaciones y Estadísticas* [en línea]. 2018. [Consultado 12 julio 2018]. Disponible en: www.bcra.gov.ar/

BANCO MUNDIAL. *Bases de Datos, Indicadores* [en línea]. 2018. [Consultado 06 julio 2018] Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/>

CEPALSTAT. *Bases de Datos y Publicaciones Estadísticas de la Comisión Económica para América Latina (CEPAL)*. 2018. [Consultado 12 julio 2018]. Disponible en: <http://estadisticas.cepal.org/cepalstat/>

DATOSMACRO. *Bonos a diez años* [en línea]. 2018. [Consultado 12 julio 2018]. Disponible en: <https://datosmacro.expansion.com/>

DEPARTMENT OF INDUSTRY, TOURISM AND RESOURCES [en línea]. 2012. [Consultado 12 julio 2018]. Disponible en: <http://industry.gov.au>

FORSYTH, Karl. *Improving Wine Refrigeration Efficiency* [en línea]. Australian Wine Research Institute, 2012. [Consultado 12 julio 2018]. Disponible en: <https://www.awri.com.au>

GALITSKY, Christina; WORRELL, Ernst; RADSPIELER, Anthony; HEALY, Patrick y ZECHIEL, Sussane. *BEST Winery Guidebook. Benchmarking and Energy and Water Savings Tool for the wine industry* [en línea]. 2005. [Consultado 12 julio 2018]. Disponible en: <https://www.lbl.gov/>

GITMAN, Lawrence y ZUTTER, Chad. *Principios de Administración Financiera*. 12° Ed, Pearson Education, 2012.

HANSEN, Don R. y MOWEN, Maryanne. *Administración de Costos. Contabilidad y Control*. 5 Ed. Thomson, 2006.

INSTITUTE OF TECHNOLOGY; RISKLAYER GMBH; AUSTRALIAN NATIONAL UNIVERSITY; GRIFFITH UNIVERSITY; UNIVERSITY OF ADELAIDE Y UNIVERSITY OF NEW SOUTH WALES. *Winerisk* [en línea]. 2018. [Consultado 12 julio 2018]. Disponible en: <http://www.winerisk.com/>

INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN. IRAM11603. *Clasificación Bioambiental de la República Argentina*. Buenos Aires, Argentina, 1996.

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL (INTA). Avances y estado de situación en análisis de ciclo de vida y huellas Av15 ambientales en Argentina. En: *Actas del IV Encuentro Argentina de Ciclo de Vida y III Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica ENARCIV 2015* [en línea]. [Consultado 12 julio 2018]. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/>

INSTITUTO NACIONAL DE VITIVINICULTURA (INV). *Estadísticas varias* [en línea]. 2018. [Consultado 12 julio 2018]. Disponible en: <http://www.inv.gov.ar/>

LABS, K. Regional Analysis of ground and underground climate conclusion, *Underground Space*, 1982, vol. 7, pp. 37-65.

MARTÍN OCAÑA, Silvia y CAÑAS, Ignacio. Study of the thermalbehavoir of traditional wine cellars: the case study of the area of Tierras Sorianas del Cid (Spain), *ELSEVIER, Renewable Energy*, 2005, n° 30, pp. 43-55

MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN PRODUCTIVA Y MINISTERIO DE AGROINDUSTRIA DE LA NACIÓN ARGENTINA. *Curso Virtual de Introducción a la Bioeconomía (2017/2018)* [en línea]. [Consultado 12 julio 2018]. Disponible en la plataforma web del Curso *on line*.

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINERÍA DE LA NACIÓN ARGENTINA. *Estadísticas Energéticas* [en línea]. 2015. [Consultado 12 julio 2018]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/energia/energia-electrica>.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). *Energy Price Indices and Discount Factors for Life-Cycle Cost Analysis – 2017* [en línea]. 2017. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.85-3273-32>

ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE LA VIÑA Y EL VINO (OIV). *Bases de Datos* [en línea]. 2018. [Consultado 12 julio 2018]. Disponible en: <http://www.oiv.int/>

RAMOS SANZ, Alba. *El Confort del Vino en la Envolvente Industrial. Estudio de casos de vasijas vinarias de Bodegas argentinas*. Saarbrücken, Alemania: Editorial Publicia, 2014.

RAMOS SANZ, Alba. Reducción de la demanda térmica originada en la vinificación en bodegas localizadas en zona de clima árido, mediante modelado térmico semi-empírico, *Hábitat Sustentable*, 2015, vol. 5, n° 2, pp. 6-19.

RAMOS SANZ, Alba. Eficiencia Energética de tecnologías productivas frente al calentamiento global, *Revista Informes de la Construcción*, 2018 (en prensa).

RAMOS SANZ, Alba; JUANICÓ, Luis y KUCHEN, Ernesto. *Beneficios Termo energéticos y económicos obtenidos en la simulación de estrategias pasivas aplicadas a la vinificación*. Ponencia presentada en Congreso ASADES 2016, Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. La Plata, Buenos Aires, República Argentina.

SOUTH AUSTRALIAN WINE INDUSTRY. *The Winery Energy Saver Toolkit* [en línea]. 2018. [Consultado 12 julio 2018]. Disponible en <http://www.winesa.asn.au/members/advice-information/environment/energy-efficiency/winery-energy-saver-toolkit/>

TINTI, Francesco; BARABARESI, Alberto; BENNI, Stefano; TORREGGIANI, Daniele; BRUNO, Roberto y TASSINARI, Patrizia. Experimental analysis of shallow underground temperature for the assessment of energy efficiency potential of underground wine cellars, *Energy and Buildings*, 2014, vol. 80, pp. 451-460.

TINTI, Franceso; BARABARESI, Alberto; FERRARI, Marco; ELKARMOTY, Mohamed; TORREGGIANI, Daniele; TASSINARI, Patrizia; BONDUÀ, Stefano. Experimental calibration of underground heat transfer models under a winery building in a rural area, *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin* [en línea], 2017. [Consultado 12 julio 2018]. Disponible en: <https://hrcak.srce.hr/ojs/index.php/rgn/article/view/4936/pdf>

US DEPARTMENT OF STATE GEOGRAPHER. *Google Earth Pro* [en línea]. 2018. [Consultado 12 julio 2018]. Disponible en: <https://www.google.com.ar/intl/es/earth/>



CONSUMOS ENERGÉTICOS DE GAS NATURAL Y ELECTRICIDAD EN EDIFICIOS ESCOLARES DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN JUAN, ARGENTINA. ANÁLISIS ESTADÍSTICO EN FUNCIÓN DE VARIABLES ARQUITECTÓNICAS

THE NATURAL GAS AND ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION OF SCHOOL BUILDINGS IN THE METROPOLITAN AREA OF SAN JUAN, ARGENTINA: A STATISTICAL ANALYSIS BASED ON ARCHITECTURAL VARIABLES.

MARÍA GUILLERMINA RE

Magister Arquitecta. Estudiante de Doctorado en Arquitectura,
Universidad de Mendoza Universidad Nacional de San Juan (UNSJ)
San Juan, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-3109-7138>
guillerminare@gmail.com

CELINA FILIPPÍN

Doctora en Ciencias, Especialidad Energías Renovables
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), Santa Rosa. La Pampa, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-0521-6180>
cfilippin@cpenet.com.ar

IRENE BLASCO LUCAS

Doctora Arquitecta
Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat (IRPHA).
Facultad de Arquitectura, Urbanismo Diseño (FAUD).
Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) San Juan, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-1326-895X>
iblasco06@gmail.com

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objetivo indagar sobre los consumos energéticos de 17 escuelas localizadas en el Área Metropolitana de San Juan. Se analizan aquí los consumos por año y por unidad de superficie para obtener una lectura general de la situación actual. Además, se realizan análisis estadísticos con el fin de comprender las posibles relaciones entre los consumos energéticos y dos variables arquitectónicas que caracterizan el diseño y la tecnología constructiva: Área vidriada al Norte y K global. Los resultados indican que la energía con mayor participación anual relativa es la eléctrica (55%), mientras que el gas natural lo es durante la estación fría (72%), asociado al abastecimiento de energía en calefacción. Respecto al consumo por tipo de energía y por unidad de superficie cubierta, los valores son de 26,24 kWh/m².año para la electricidad y de 21,80 kWh/m².año para el gas natural. El desarrollo de la investigación permite concluir que existe una importante asociación entre la envolvente edilicia, tanto opaca como transparente, y el consumo de energía, con lo cual se reconoce la potencialidad de mejoramiento de la envolvente, en búsqueda de una optimización energética.

Palabras clave

arquitectura, energía, escuelas

ABSTRACT

The present work aims to investigate the energy consumption of 17 schools located in the Metropolitan Area of San Juan, Argentina. To obtain a general overview of the current situation, consumption per year and per unit area were analyzed. In addition, statistical analyses were carried out in order to understand possible relationships between energy consumption and two architectural variables that characterize design and construction technology: glazed area to the north and global U-value. The results indicate that electricity is the energy with the greatest relative annual use (55%), while natural gas predominates during the cold season (72%), as associated with heating energy supply. Regarding consumption by type of energy and per unit area covered, the values were 26.24 kWh/m².year for electricity and 21.80 kWh/m².year for natural gas. Through the research it was possible to conclude that there is an important association between the building envelope, both opaque and transparent, and energy consumption, thereby recognizing the potential to improve the envelope for energy optimization.

Keywords

architecture, energy, schools.

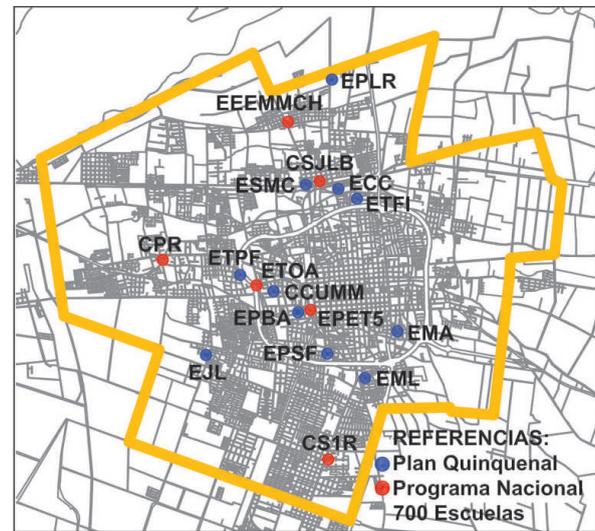
INTRODUCCIÓN

El consumo energético de edificios es un tema a considerar en momentos de escasez de recursos no renovables, como ocurre actualmente a nivel mundial. Según los datos publicados por la Secretaría de Energía de la Nación (2012), la participación de los edificios del sector residencial, comercial y público en el consumo total de energía es del 31%; mientras que, si se considera solo el consumo de electricidad, este es del 55%, y el de gas por red, del 50%. El alto consumo registrado requiere de la implementación de planes de optimización de eficiencia energética, con el fin de disminuir la demanda.

La falta de conocimiento sobre los factores que determinan el uso de la energía en edificios representa una dificultad para lograr la eficiencia energética de los mismos (Yoshino, Hong y Nord, 2017). Las escuelas son edificios públicos que poseen particularidades en su diseño, construcción y funcionamiento; es por ello que el análisis de consumos en tipologías escolares a partir de datos empíricos de auditorías energéticas es un tema que ha interesado a numerosos grupos de investigación en diferentes partes del mundo (Rospi et al, 2015; Trebilcock et al., 2016; Raatikainen et al., 2016; Mohamed y Mohamed, 2017; Droutsaa et al., 2017). En Daegu, Corea del Sur, un estudio llevado a cabo sobre 10 escuelas primarias, analiza los consumos históricos, por año y por unidad de superficie, arribando a las siguientes conclusiones: que la energía eléctrica es la más utilizada, seguida del gas; que el consumo de energía por unidad de superficie áulica fue de 289 kWh/m².año de electricidad y 90 kWh/m².año de gas, durante el año 2010; y que, en términos de los usos, se consume más energía en calefacción, seguido de enfriamiento e iluminación (Woo, Guk y Hwa, 2012).

En Argentina también se han desarrollado importantes contribuciones desde el ámbito científico en la temática de escuelas (Filippín, 2005; Melchiori, San Juan y Díscoli, 2014; Boutet, Hernández y Jacobo, 2016; Ledesma et al., 2016; Walter et al., 2016; Giuliano y Garzón, 2017; Mazzocco, Filippín y Flores Larsen, 2017) y en el manejo de estudios estadísticos como una herramienta utilizada para la caracterización térmica y energética en edificios (Czajkowski, 2009; Muñoz, Marino y Thomas, 2016; Boutet, 2017).

En San Juan, diversas investigaciones han permitido agrupar las escuelas del Área Metropolitana en tipologías edilicias, como también conocer el comportamiento energético, los niveles de confort higrotérmico y la vulnerabilidad sísmica de distintos casos pertenecientes a períodos históricos representativos (Michaux, 2014; Ré, Blasco Lucas y Fillipín, 2016; 2017; Yacante et al., 2017). El presente trabajo tiene por objetivo aportar datos empíricos respecto a los consumos de gas y electricidad registrados en escuelas y, asimismo, identificar las relaciones existentes con variables arquitectónicas que definen la envolvente edilicia.



TIPOLOGÍA	CODIGO	NOMBRE ESTABLECIMIENTO ESCOLAR
PLAN QUINQUENAL	EML	Escuela Manuel Lainez
	EPBA	Escuela Provincia de Buenos Aires
	ETPF	Escuela Teniente Pedro Nolasco Fonseca
	CCUMM	Colegio Central Universitario
	EPSF	Escuela Provincia de Santa Fe
	EMA	Escuela Miguel de Azcuénaga
	ECC	Escuela Comandante Cabot
	ETFI	Escuela Teniente 1º Francisco Ibáñez
	ESMC	Escuela Salvador María del Carril
	EPLR	Escuela Provincia de la Rioja
	EJL	Escuela Julia León
PROGRAMA NACIONAL 700 ESCUELAS	ETOA	Escuela Técnica Obrero Argentino
	EPET5	Escuela Provincial Educación Técnica N°5
	CPR	Colegio Provincial de Rivadavia
	EEEMMCH	Escuela Especial Múltiple Martina Champanay
	CSJLB	Colegio Secundario Jorge Luis Borges
	CS1R	Colegio Superior N°1 Rawson

Figura 1. Área Metropolitana de San Juan. Ubicación de los establecimientos escolares. Fuente: Elaboración de las autoras.

UNIDADES DE ANÁLISIS

Se considera como población de estudio a las escuelas de dos tipologías arquitectónicas del Área Metropolitana de San Juan (AMSJ) que registran los mayores índices de construcción de infraestructura escolar de gestión pública. Una de ellas corresponde a la época de la reconstrucción de la ciudad, post terremoto de 1944, con el prototipo ideado en el marco del Plan Quinquenal (PQ); la otra tipología concierne al Programa Nacional 700 Escuelas (PN700) desarrollado entre los años 2004 a 2008. Para el presente artículo se toma una muestra representativa (Sierra Bravo, 1991) compuesta por 17 Unidades de Análisis (UA), la cual corresponde a un 85% de la población en estudio y estuvo definida al considerar todos aquellos establecimientos que cuentan con el servicio de energía eléctrica y gas natural por red. En la Figura 1, se puede observar la localización de los edificios escolares junto con una tabla de referencias que los identifica; se establece un código respecto al nombre y un color de acuerdo a la tipología edilicia a la que pertenecen: en azul los del PQ (11 UA) y en rojo los del PN700 (6 UA).



Figura 2. Casos de la tipología PQ. Fotografías: Guillermina Ré.



Figura 3. Casos de la tipología PN700. Fotografías EEMCH: Programa Nacional 700 Escuelas (<http://www.700escuelas.gov.ar>) y Raúl Alfonso. Fotografías CPR: Guillermina Ré.

Las escuelas del PQ poseen una antigüedad superior a 50 años y se encuentran en pleno funcionamiento, algunas con mejor estado de conservación que otras (Figura 2). La mayoría poseen ampliaciones realizadas con diferente tecnología constructiva que la utilizada en la tipología original (Ré, Blasco y Filippín, 2017). Las infraestructuras del PN700 (Figura 3) se encuentran caracterizadas por su morfología y materialización de la envolvente (Ré, Blasco y Filippín, 2016) y no por una similar organización funcional, como ocurre con las del PQ. En cuanto a los equipos para climatización, todas las UA utilizan estufas y/o pantallas a gas para calefaccionar los ambientes interiores, sin embargo, algunas escuelas poseen estufas eléctricas o caloductos auxiliares en los sectores administrativos. Para refrigeración, solo las escuelas ETPF y CCUMM poseen aires acondicionados (AA) en las aulas.

METODOLOGÍA

Los consumos energéticos fueron solicitados a las empresas proveedoras del servicio de gas natural y electricidad, y corresponden a un período variable de diez años (2006 a 2015) para las escuelas con mayor antigüedad (PQ); y desde el primer año de funcionamiento, para aquellas de reciente construcción (PN700). Los datos de consumos de gas, que originalmente estaban en m^3 , se convirtieron a kWh para posibilitar el análisis junto a los de electricidad, utilizando un factor de $8,33kWh/m^3$ (Blasco Lucas, 2013).

Simultáneamente, se computan las distintas áreas de uso. Se distinguen las superficies cubiertas de las climatizadas ya que, a diferencia de lo que ocurre en viviendas u otros edificios públicos, en las escuelas existen importantes áreas cubiertas sin climatización artificial con equipos de calefacción y/o refrescamiento, por ejemplo: sanitarios, depósitos, circulaciones y salón de usos múltiples (SUM), en algunos casos.

En una primera instancia del estudio que, como se ha indicado, tiene por finalidad conocer la situación general respecto a los consumos energéticos en edificios escolares, se trabaja con la totalidad de los datos obtenidos. En una segunda etapa, la muestra se reduce a los años 2014 y 2015, que son aquellos con información de consumos eléctricos y de gas para las 17 unidades de análisis.

Para definir las variables arquitectónicas a estudiar, se realiza previamente una matriz de correlación de distintas variables de diseño que caracterizaran la morfología, tecnología, funcionalidad y uso de los edificios escolares, y los consumos anuales promedio de los años 2014 y 2015, diferenciados en: total, estacional y por fuente de energía. A partir de ella, se seleccionan dos variables que definen a la envolvente edilicia exterior y están estrechamente ligadas a un diseño que apunta al ahorro energético: Superficie vidriada al Norte (m^2) y K global ($W/m^2°C$).

En cuanto al análisis estadístico, se utiliza el software Statgraphics. Se realiza un análisis de regresión lineal simple con el fin de estimar los valores de la variable dependiente (consumo de energía), a partir de la obtención de la función lineal. La anotación matemática de la ecuación es: $y = a + b \cdot x$. Se valora, entonces, la bondad de ajuste de los datos al modelo de regresión lineal simple a través de los indicadores estadísticos: I) Coeficiente de Correlación Lineal Simple (r), que mide el grado de asociación lineal entre dos variables que oscila entre 1 (fuerte asociación lineal positiva: a medida que aumenten los valores de una variable aumentarán los de la otra) y -1 (fuerte asociación lineal negativa: a medida que aumenten los valores de una variable disminuyen los de la otra); y II) Valor - P: un valor menor a 0,05 indica una asociación estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95%.

Para calcular la transmitancia térmica (K, en la denominación argentina; U en el ámbito internacional) de los elementos que componen la envolvente edilicia, se utiliza el programa desarrollado por Gonzalo et al. (2000). Los valores del K global, se obtienen con las planillas programadas KG-MOD (Blasco Lucas, 2013), que aplican los procedimientos sugeridos en las Normas IRAM 11601, 11604 y 11605.

CONSUMOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y GAS NATURAL

En primer término, se analizan los consumos energéticos anuales promedio de las escuelas, que permitan una lectura general de la temática en estudio. La Figura 4 muestra que los valores oscilan entre 32.378,93 kWh (ETPF) y 190.461,83 kWh (CCUMM), para las escuelas de tipología PQ, y entre 83.899,32 kWh (CPR) y 158.545,82 kWh (EEMMCH), para las infraestructuras del PN700.

En relación a los consumos por unidad de superficie cubierta y climatizada (Figura 5), se observa que la escuela con menor consumo es la ETPF, con valores anuales de $23,56 kWh/m^2$ respecto a la cubierta y $39,22 kWh/m^2$ a la climatizada. Los mayores consumos los registra la EEMMCH de tipología PN700, con valores de $111,82 kWh/m^2$ y $149,44 kWh/m^2$, respectivamente, seguida del CCUMM (PQ), con consumos anuales de $80,33 kWh/m^2$, según el área cubierta y $123,92 kWh/m^2$ del área climatizada.

En complemento, se estudia la variación temporal de los consumos energéticos anuales por

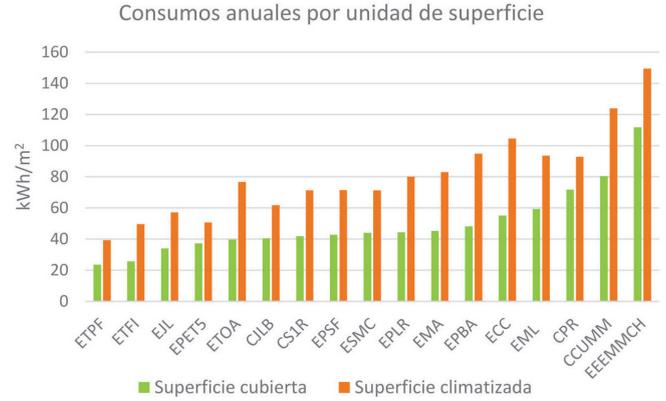
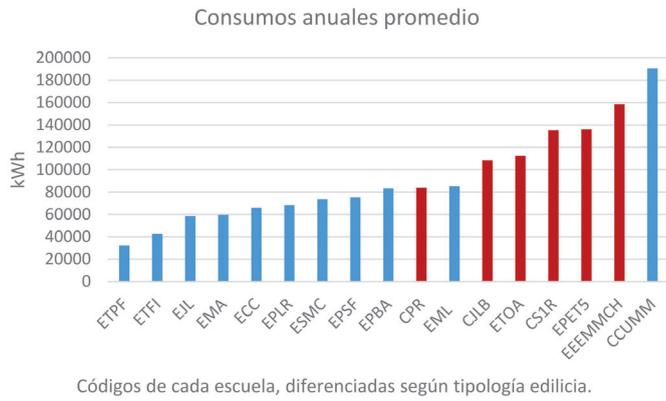


Figura 4: Consumos energéticos anuales promedio. Fuente: Elaboración de las autoras.

Figura 5: Consumos energéticos anuales por m² de superficie cubierta y climatizada. Fuente: Elaboración de las autoras.

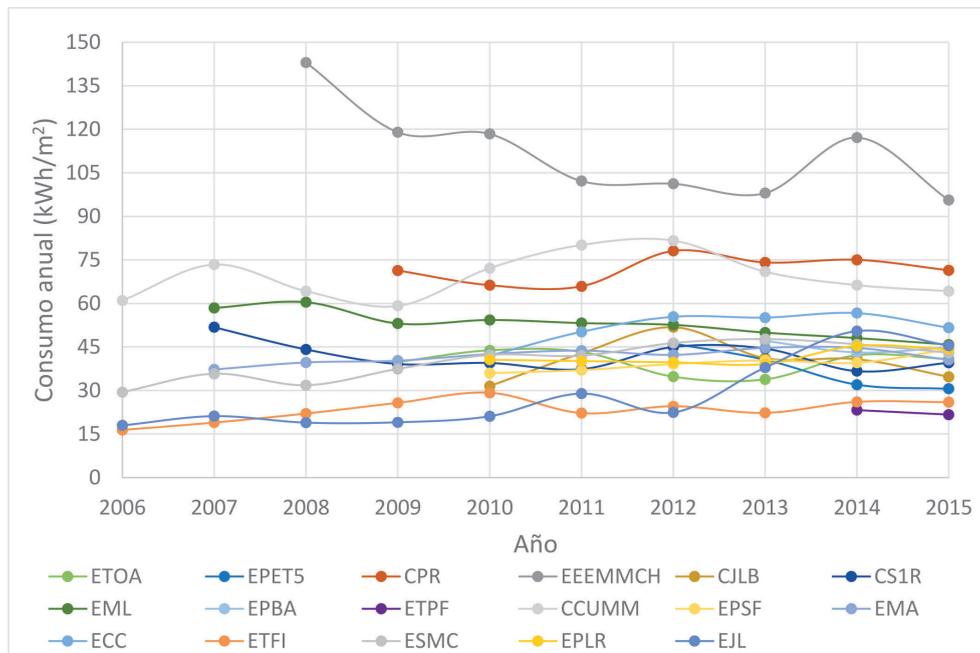


Figura 6: Variación temporal de consumos energéticos anuales por unidad de superficie cubierta. Fuente: Elaboración de las autoras.

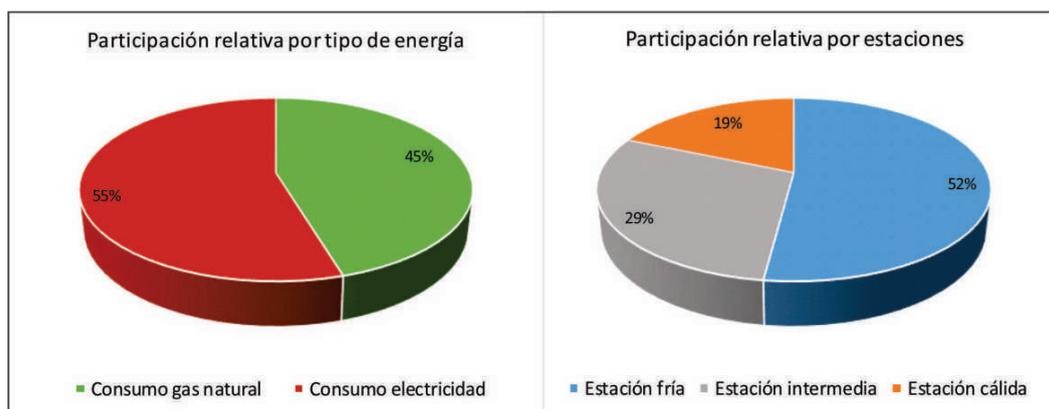


Figura 7: Participación relativa de consumos energéticos anuales promedio (2014 y 2015). Fuente: Elaboración de las autoras.

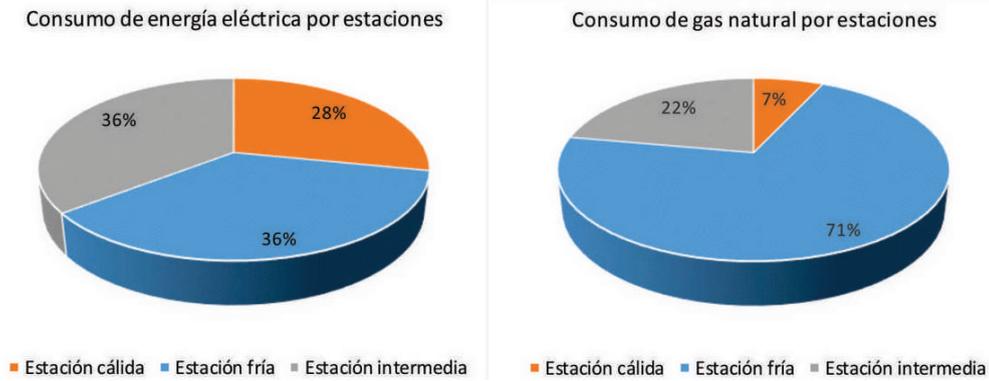


Figura 8: Consumo de energía eléctrica y gas natural por período estacional. Elaboración de las autoras.

unidad de superficie cubierta, registrados en un período comprendido entre 2006 y 2015. En la Figura 6, se advierte que la escuela EEMMCH ha presentado onsumos elevados desde el comienzo de su actividad en el año 2008; en cambio, el CCUMM, perteneciente a la tipología del Plan Quinquenal, fluctúa entre valores de 59,14 kWh/m², en el año 2009, y 81,65 kWh/m², en 2012, disputando la segunda posición de mayores consumos con el CPR (PN700), cuyas variaciones van desde los 65,91 kWh/m², en 2011, a los 78,1 kWh/m², en 2012. Los menores consumos durante toda la instancia de análisis los registran las escuelas ETPF y ETFI.

Por otro lado, se indaga en la participación relativa de los distintos tipos de energía en el total promedio consumido durante 2014 y 2015. Al año calendario se lo divide en tres períodos estacionales, con el propósito de analizar la incidencia de la electricidad y del gas en cada uno de ellos. El período frío se encuentra integrado por los meses de mayo, junio, julio y agosto; el cálido por noviembre, diciembre, enero y febrero, y las estaciones intermedias conformadas por marzo, abril, septiembre y octubre.

La Figura 7 (izquierda) indica que el consumo de electricidad representa un 55% del total anual promedio. Respecto al consumo total de energía, la consumida en invierno presenta el mayor coeficiente de variabilidad¹ entre los casos de estudio (63,9%) y también la mayor participación relativa estacional (52%). La energía total consumida durante el ciclo lectivo (períodos frío e intermedio) representa el 81% y supera ampliamente a la energía consumida en el verano (19%), situación que se asocia al receso escolar (Figura 7 derecha).

En cuanto al consumo de energía eléctrica (Figura 8 izquierda), su participación relativa en los meses fríos es igual a la del período intermedio (36%). El hecho de que

exista más consumo de electricidad en las estaciones intermedias que en el verano (28%), se asocia a una mayor demanda para equipamiento, iluminación y refrigeración de espacios, durante el período de clases. En lo que se refiere al gas natural (Figura 8 derecha), el consumo en el período frío asciende al 71% y muestra el mayor coeficiente de variación entre los casos de estudio (87%), pudiendo estar asociado a las variables arquitectónicas, a las condiciones climáticas y/o a los comportamientos de los usuarios.

CONSUMOS Y VARIABLES ARQUITECTÓNICAS

En la Figura 9, se observan en distintos gráficos de dispersión, las relaciones entre el Área vidriada al Norte (m²) y el consumo total anual, estacional, y por fuente de energía. En la Tabla 1 se detallan los indicadores estadísticos del análisis.

Consumo de energía		R ²	Valor-P	Coefficiente de correlación
Anual	Total	0.386	0.0001	0.62
	Electricidad	0.504	0.0000	0.71
	Gas natural	0.093	0.0779	0.31
Estación fría	Electricidad	0.542	0.0000	0.74
	Gas natural	0.162	0.0181	0.40
Estación cálida	Electricidad	0.311	0.0006	0.56
	Gas natural	0.395	0.0001	-0.63
Estaciones intermedias	Electricidad	0.526	0.0000	0.725
	Gas natural	0.018	0.4421	-0.136

Tabla 1: Indicadores estadísticos del análisis de Área vidriada al Norte v/s Consumo de energía. Fuente: Elaboración de las autoras.

[1] El coeficiente de variación es la relación entre la desviación estándar y el promedio *100; donde la desviación típica o estándar es la medida de dispersión paramétrica igual a la raíz cuadrada de la varianza o de la media del cuadrado de las desviaciones de los valores de una distribución respecto a su media (Sierra Bravo, 1991:174).

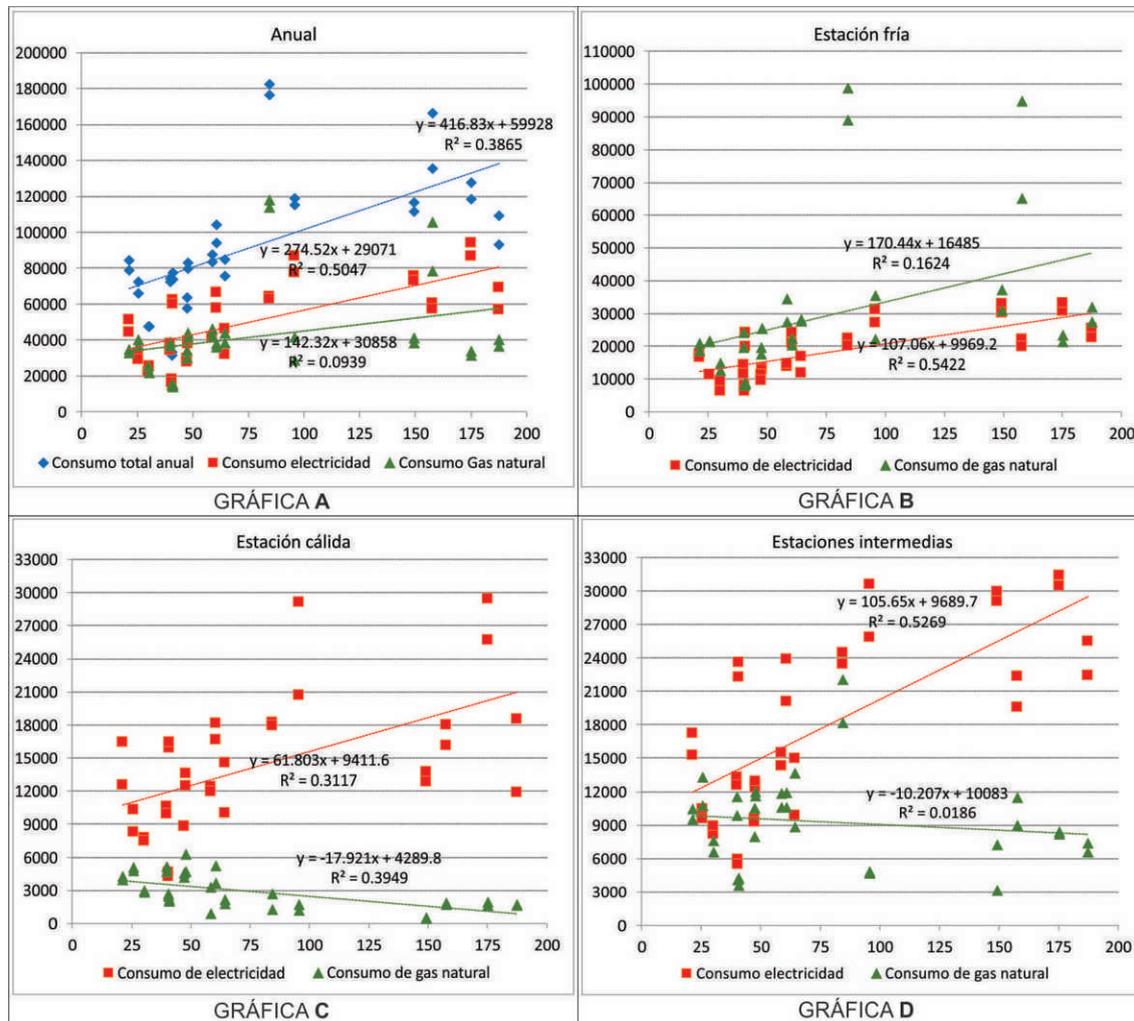


Figura 9: Análisis de regresión simple; Área vidriada al norte (m²) en eje X y Consumo de energía (kWh) en eje Y. Gráfico A: Consumos anuales. Gráfico B: Estación fría. Gráfico C: Estación cálida. Gráfico D: Estaciones intermedias. Fuente: Elaboración de las autoras.

La Gráfica A, muestra las líneas de regresión y el valor de R² para los consumos anuales. Para el consumo total y el consumo de electricidad (que absorbe un 55% del consumo total según la Figura 7 izquierda), los coeficientes de correlación indicarían una relación moderadamente fuerte entre variables con valores de 0,62 y 0,71, respectivamente, ambos con un Valor - P menor a 0,05. En el caso del gas natural, con un Valor - P de 0,0779, no habría una relación estadísticamente significativa y el coeficiente de correlación (0,31) indicaría una asociación débil entre variables.

Para el período frío y en divergencia con lo esperable ante una variable de diseño que permitiría el ingreso de ganancia solar directa, las líneas de regresión son ascendentes (Figura 9, Gráfica B). Desde el punto de vista estadístico, el coeficiente de correlación para el consumo de electricidad en invierno es de 0,74 y el valor - P es menor a 0,05, existiendo una relación moderadamente fuerte y estadísticamente significativa entre variables. En el caso del gas natural, el coeficiente de correlación es de 0,40 e indicaría una relación relativamente débil (Tabla

1). Las áreas vidriadas al norte en los edificios estudiados no siempre están libres de obstrucciones, situación que reduciría la efectividad del área colectora. La implantación de especies arbóreas de hojas perennes, la incorporación de carpintería con vidrio repartido y la presencia de parasoles móviles parcialmente cerrados, entorpecen la posibilidad de aprovechar la energía solar para climatizar en invierno los espacios interiores. Además, del aumento del consumo de electricidad para iluminación, por disminución de horas de luz natural, también es posible que su tendencia ascendente se deba a la utilización de equipos de climatización auxiliares alimentados por energía eléctrica, en los sectores administrativos.

En la Figura 9 (Gráfica C), se ilustran las líneas de regresión del comportamiento entre las variables en verano. El consumo de electricidad presenta una tendencia ascendente, con indicadores estadísticos que muestran un Valor - P menor a 0,05 y un coeficiente de correlación de 0,56, que sugiere una relación moderada entre las variables (Tabla 1). Es posible que un diseño inadecuado

de elementos de sombra para el período estival genere el calentamiento de las áreas vidriadas en determinadas horas y condicione el requerimiento de mayor carga de enfriamiento.

El comportamiento del consumo de energía en las estaciones intermedias se ve representada en la Figura 9 (Gráfica D). En cuanto a la electricidad, se distingue una relación estadísticamente significativa (Valor - P menor a 0,05) y moderadamente fuerte entre variables, con un coeficiente de correlación de 0,725. Para el gas natural, la relación es negativa, mostrando que a mayor área disminuye el consumo, sin embargo, esta relación es débil (coeficiente de correlación -0,136) y no es estadísticamente significativa (Valor - P = 0,4421). Las estaciones intermedias se caracterizan por la presencia de anomalías térmicas, muy marcadas en el caso de San Juan, que presenta días fríos o templados y otros con elevadas temperaturas. De este modo, es posible inferir que el edificio requiere mayor carga auxiliar de refrigeración ante el aumento de temperatura del área vidriada, producto de un diseño adecuado de los elementos de sombra respectivos.

Por último, se relacionan los consumos energéticos con el K global ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), que se refiere a la tecnología constructiva de la envolvente edilicia (Figura 10). En la Tabla 2, se exponen los indicadores estadísticos del análisis de regresión simple.

Consumo de energía		R2	Valor-P	Coefficiente de correlación
Anual	Total	0.277	0.0014	0.53
	Electricidad	0.438	0.0000	0.66
	Gas Natural	0.043	0.2332	0.21
Estación fría	Electricidad	0.438	0.0000	0.66
	Gas Natural	0.094	0.0766	0.31
Estación cálida	Electricidad	0.341	0.0003	0.58
	Gas Natural	0.365	0.0002	-0.60
Estaciones intermedias	Electricidad	0.434	0.0000	0.66
	Gas Natural	0.042	0.2426	-0.21

Tabla 2. Indicadores estadísticos del análisis de K global v/s consumo de energía. Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica A de la Figura 10, se observan las líneas de regresión y el valor de R^2 de la relación con el consumo de energía anual. Los resultados evidencian que, para el consumo total de energía y el de electricidad, los coeficientes de correlación indicarían una relación moderada entre variables, con valores de 0,53 y 0,662, respectivamente. En ambos casos, el Valor - P es menor a 0,05, dándose una relación estadísticamente significativa

con un nivel de confianza del 95%. En el caso del gas natural, no habría relación entre variables (coeficiente de correlación de 0,21).

Las líneas de regresión del análisis durante el período invernal se ven representadas en la Gráfica B (Figura 10). De acuerdo a los indicadores estadísticos obtenidos (Tabla 2), el coeficiente de correlación para el consumo de electricidad es de 0,66, lo cual sugiere una relación moderadamente fuerte y estadísticamente significativa (Valor - P menor a 0,05) entre variables. El coeficiente de correlación en el caso del gas natural es de 0,094 e indicaría una relación relativamente débil, con un Valor - P superior a 0,05. Los resultados muestran que el consumo de electricidad aumenta considerablemente con la disminución de la resistencia térmica de la envolvente, lo cual podría indicar, para algunos casos, la necesidad de emplear equipamiento eléctrico auxiliar para calefacción en espacios administrativos.

La Figura 10 (Gráfico C) señala la relación entre las variables en verano, con líneas de regresión ascendentes en el consumo de electricidad, cuyos indicadores estadísticos (Tabla 2) revelan un Valor - P menor a 0,05 y un coeficiente de correlación de 0,58, que sugiere una relación moderada. Es notorio el incremento del consumo eléctrico a medida que aumentan los valores de K global, lo cual podría connotar que, a mayor intercambio de calor con el exterior, a través de un envolvente edilicia con valores de resistencias térmicas bajas y coeficientes de absorción altos en las cubiertas de tejas coloniales (PQ) o con revestimientos de baldosas (PN700), se produce un aumento en el requerimiento de energía para enfriamiento.

El comportamiento del consumo de energía eléctrica en estaciones intermedias (Figura 10, Gráfica D) denota una relación estadísticamente significativa (Valor - P menor a 0,05) y moderadamente fuerte entre las variables, con un coeficiente de correlación de 0,66, que podría indicar la utilización equipos de refrescamiento, en determinados momentos de la jornada de clases, para un período que se caracterizan por grandes amplitudes térmicas diarias y estacionarias. En cuanto al gas natural, la tendencia es negativa con una relación débil (coeficiente de correlación -0,206; valor - P = 0,4421).

CONCLUSIONES

El trabajo llevado a cabo permitió alcanzar el objetivo planteado. Los resultados obtenidos generan un significativo aporte al estado del conocimiento, proporcionando datos referidos a los consumos energéticos de edificios escolares del Área Metropolitana de San Juan, de dos tipologías representativas. A partir del estudio, se reconoce un rango de consumo energético anual comprendido entre 23,56 kWh/m² y 80,33 kWh/m² de superficie cubierta, para las escuelas del Plan Quinquenal, y entre 37,34 kWh/m² y

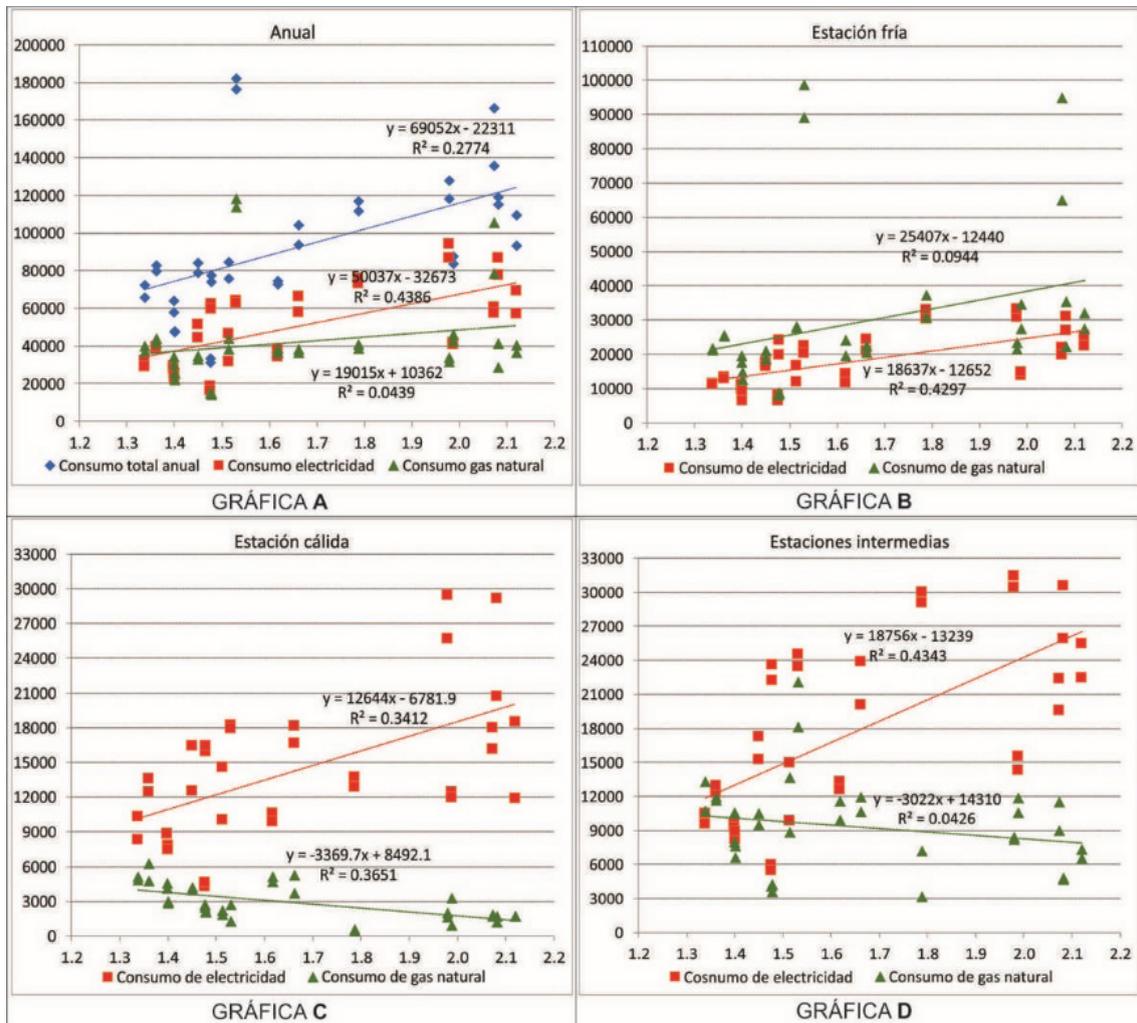


Figura 10: Análisis de regresión simple; K global (W/m².K) en eje X y Consumo de energía (kWh) en eje Y. Gráfico A: Consumos anuales. Gráfico B: Estación fría. Gráfico C: Estación cálida. Gráfico D: Estaciones intermedias. Fuente: Elaboración propia.

111,82 kWh/m², para las que integran el Programa Nacional 700 escuelas. La amplitud de los márgenes de consumo energético en las distintas UA, podrían estar condicionadas por el estado de conservación de las infraestructuras edilicias, las horas y días de uso, y/o los comportamientos de los usuarios y responsables de la operación de los edificios.

La disponibilidad de información de energía consumida condicionó el acotamiento de la muestra a aquellas escuelas con datos ininterrumpidos durante 2014 y 2015. Los resultados revelaron que la electricidad es la más utilizada anualmente, con una participación del 55%, dado que sirve para abastecer la iluminación diurna y nocturna, el funcionamiento de equipamiento (heladeras, freezer, computadoras, impresoras), el refrescamiento de ambientes y, en algunos casos, la calefacción auxiliar en sectores docentes y administrativos. En cuanto al consumo energético estacional, los mayores registros se producen en invierno con un 52%, con una demanda de gas natural que asciende al 71%. El consumo de energía por unidad de

superficie promedio para los casos de estudio, es de 21,80 kWh/m² (superficie cubierta) y 35,50 kWh/m² (superficie climatizada), para el gas natural, y de 26,24 kWh/m² y 42,73 kWh/m² respectivamente, para la electricidad.

El estudio estadístico permitió concluir que, para la muestra analizada, el Área vidriada al Norte es una variable influyente en los consumos energéticos totales y de electricidad, pero no en los de gas natural (principal fuente energética utilizada para calefacción). Las ganancias solares directas en invierno no serían suficientes para contribuir a la climatización de los espacios interiores debido a posibles obstrucciones, pero afectarían negativamente los ambientes en verano por sobrecalentamiento. Fue posible detectar, en los casos que presentan los mayores consumos por unidad de superficie climatizada (EEMMCH, CCUMM, ECC, EPBA), que gran parte de las aulas y los espacios administrativos se encuentran orientados al Sur o al Este, y las áreas vidriadas al Norte corresponden a circulaciones cerradas o galerías.

Respecto a la variable K global, se reconoce una fuerte relación del aumento del consumo eléctrico en los meses de verano y estaciones intermedias ante envolventes menos eficientes; factor que podría indicar la mayor utilización de equipos auxiliares para refrigeración de espacios, como causa de una envolvente edilicia que presenta intercambios de calor en horarios del cursado de clases.

Los análisis realizados con las variables arquitectónicas permitieron ratificar la importancia del diseño de la envolvente y su asociación con el consumo de energía. Dichas variables exhiben un fuerte potencial de mejoramiento: un cambio que apunte a incrementar la eficiencia energética de edificios escolares, preservando y/u optimizando las condiciones de confort térmico y lumínico.

AGRADECIMIENTOS

La información presentada forma parte de la Tesis Doctoral de la Mag. Arq. Guillermina Ré, del Doctorado en Arquitectura, de la Universidad de Mendoza. Se agradece a la Dra. Florencia Ricard por su asesoramiento; y a la Universidad Nacional de San Juan, FAUD, por la contribución en el financiamiento de la investigación en el marco del PROJIVI 2018- 2019.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLASCO LUCAS, Irene. *Arquitectura sustentable en hábitat rural de zona árido-sísmica: Aportes teórico-metodológicos*. Tesis Doctoral en Arquitectura. Universidad de Mendoza. 2013.

BOUTET, M. Laura; HERNÁNDEZ, Alejandro y JACOBO, Guillermo. Thermo-lighting optimization proposal for school buildings in subtropical hot-humid climates: Monitoring and computer simulation on autumn period, *Energy and Buildings*, 2016, vol. 128, pp. 785-797.

BOUTET, María Laura. *Acondicionamiento higrotérmico-lumínico de edificios escolares en zonas urbanas de la región N.E.A. Auditorías energéticas y propuestas de mejoras mediante Diseño Solar Pasivo*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Exactas. Doctorado en Ciencias- Área Energías Renovables, 2017

CZAJKOWSKI, Jorge D. *Análisis y modelización energético-ambiental de la edilicia urbana basado en técnicas de auditoría y procedimientos estadísticos multivariados. Desarrollo de herramientas de diagnóstico y simulación*. Tesis Doctoral. Departamento Construcciones, Facultad de Ingeniería, UNLP, 2009

DROUTSAA, K.G.; KONTOYIANNIDISA, S.; DASCALAKIA, E.G. and BALARASA, C.A. Benchmarking energy use of existing Hellenic Non-Residential buildings. En: BIKAS, Dimitrios (ed.). *International Conference on Sustainable Synergies from Buildings to the Urban Scale, SBE16*. Science Direct. Procedia Environmental Sciences, vol. 38, 2017, pp. 713-720

FILIPPÍN, Celina. Thermal response of solar and conventional school buildings to design- and human-driven factors, *Renewable Energy*, 2005, vol. 30, n° 3, pp. 353 - 376.

GIULIANO, Gabriela y GARZÓN Beatriz. Eficiencia térmica-energética y adecuación bioambiental en escuela rural de Santiago del Estero- Argentina. En: *Actas ASADES*, vol. 5, 2017, pp. 05.143 - 05.153.

GONZALO, Guillermo; NOTA, Viviana; LEDESMA, Sara y MARTÍNEZ, Cecilia. *Programa para el cálculo de Transmitancia térmica (K medio ponderado), retardo y amortiguamiento*. CEEMA: Centro de Estudios Energía y Medio Ambiente. IAA. FAU. UNT, 2000.

LEDESMA, Sara; CISTERNA, Susana; NOTA, Viviana; MARTÍNEZ, Cecilia; QUIÑONES, Graciela; MÁRQUEZ VEGA, Gabriela; LLABRA, Cristina; GONZALO Guillermo; MOSTAJO, María; RAMOS, Mariano y VILLA, Cyntia. Caracterización del sector edilicio educativo de nivel primario de la provincia de Tucumán y evaluación de consumos energéticos en casos de estudio. En: *Actas ASADES*, vol. 4, 2016, pp. 05.83 - 05.94.

MAZZOCCO, María Pía; FILIPPÍN, Celina y FLORES LARSEN, Silvia. Impacto potencial del cambio climático en una escuela solar en Argentina, *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2017, vol. 39, pp. 49-60.

MELCHIORI, Mariana; SAN JUAN Gustavo y DÍSCOLI, Carlos. Comparación del comportamiento energético en dos establecimientos educativos: Campinas (Brasil) y La Plata (Argentina), *Revista Estudios del Hábitat*, 2014, n° 12, pp. 63-81. MICHAUX, M. Celina. *Estudio tipológico y simulación del comportamiento térmico de edificios escolares en la ciudad de San Juan*. Informe Final de Beca CICITCA, Estudiantes Avanzados. UNSJ, 2014.

MOHAMED M., Ouf, MOHAMED H., Issa. Energy consumption analysis of school buildings in Manitoba, Canada, *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2017, vol. 6, n° 2, pp. 359-371.

MUÑOZ, Natalia; MARINO, Beatriz y THOMAS, Luis. Caracterización térmica de edificios aplicando el modelo de regresión lineal múltiple. En: *Actas ASADES*, vol. 4, 2016, pp. 05.31 - 05.42.

Programa Nacional 700 Escuelas. Manual de proyecto. Argentina: Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología Nación. Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, 2004.

RAATIKAINEN, Mika; SKÖNA, Jukka; LEIVISKÄB, Kauko y KOLEHMAINENA, Mikko. Intelligent analysis of energy consumption in school buildings, *Applied Energy*, 2016, vol. 165, pp. 416-429.

RÉ, Guillermina; BLASCO LUCAS, Irene y FILIPPÍN, Celina. Evaluación higrotérmica y energética de un edificio escolar perteneciente al Programa Nacional 700 Escuelas, en el Área Metropolitana de San Juan, Argentina, *Revista Hábitat Sustentable*, 2016, vol. 6, n° 2, pp. 40-51.

RÉ, Guillermina; BLASCO LUCAS, Irene y FILIPPÍN, Celina. Comportamiento higrotérmico y energético en período estival de un edificio escolar típico en la ciudad de San Juan, Argentina, *Revista Estudios del Hábitat*, 2017, vol. 15, n° 2, pp.1-12.

ROSPI, Gianluca; CARDINALE, Nicola; INTINI, Francesca y CARDINALE, Tiziana. Analysis of energy consumption of different typologies of school buildings in the city of Matera (Southern Italy), *Science Direct. Energy Procedia*, 2015, vol. 82, pp. 512-518.

SECRETARIA DE ENERGÍA DE LA NACIÓN. *Balances energéticos 2010* [en línea]. [Consultado 20 junio 2018]. Disponible en: www.energia3.mecon.gov.ar. 2012

SIERRA BRAVO, Restituto. *Diccionario práctico de estadística*. Madrid: Editorial Paraninfo, 1991.

TREBILCOCK KELLY, Maureen; SOTO MUÑOZ, Jaime; FIGUEROA SAN MARTIN, Rodrigo; PIDERIT-MORENO, Beatriz. Metodología para el diseño de edificios educacionales confortables y resilientes, *Revista AUS*, 2016, n° 20, pp. 70-76.

WALTER, Érika; AGÜERO, Matías; WATKINS, María Gabriela y MANSILLA, Gabriela. Escuela bioclimática y sustentable, Secundaria N° 39, Villa de Antofagasta de la Sierra, Catamarca. En: *Acta del I Encuentro Nacional sobre Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable (La Plata)*, 2016, pp. 131-141.

WOO, Kim Tae; GUK, Lee Kang; HWA, Hong Won. Energy consumption characteristics of the elementary schools in South Korea, *Energy and Buildings*, 2012, vol. 54, pp. 480- 489.

YACANTE, María Irene; GUILLÉN RODRÍGUEZ, Sandra; BUSTOS, Pamela; HEREDIA, Sergio y CRUZ INTROÍNI, Melina. Identificación de vulnerabilidad sísmica no estructural y funcional en edificios escolares del Gran San Juan como aporte a la proyectación. En: *Actas del XXI ARQUISUR*. San Juan, Argentina, 2017, Eje 2- Art. 8.

YOSHINO Hiroshi; HONG Tianzhen y NORD Natasa. IEA EBC Annex 53: Total energy use in buildings. Analysis and evaluation methods, *Energy and Buildings*, 2017, vol. 152, pp. 124-136.



COMPORTAMIENTO Y CONFORT TÉRMICO EXTERIOR DE CANALES VIALES URBANOS INSERTOS EN DIVERSAS TRAMAS Y GEOMORFOLOGÍAS DE MENDOZA.

THE BEHAVIOR AND OUTDOOR THERMAL COMFORT OF URBAN CANYONS IN DIFFERENT WEFT AND GEOMORPHOLOGIES OF MENDOZA, ARGENTINA.

ANA LAURA CASTILLO
Arquitecta

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET)
Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0001-8240-455>
alcastillo@mendoza-conicet.gob.ar

MARÍA BELÉN SOSA

Doctora en Arquitectura

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), Mendoza, Argentina
<http://orcid.org/0000-0002-0141-442X>
msosa@mendoza-conicet.gob.ar

ERICA NORMA CORREA
Ing. Química - Doctora

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0003-1690-076X>
ecorrea@mendoza-conicet.gob.ar

María Alicia Cantón
Arquitecta

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-8714-9697>
macanton@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

Este trabajo se desarrolla en el Área Metropolitana de Mendoza (AMM), ciudad de clima árido con dos contextos geomorfológicos diferentes. El objetivo consiste en analizar la relación entre el comportamiento y confort térmico exterior de canales viales urbanos (CVU) insertos en llanura y piedemonte. Para ello, se seleccionó y monitoreó seis CVU insertos en tres formas de trama (racional, orgánica y Cul-de-Sac). Los resultados en cuanto al comportamiento térmico indican que el CVU racional es más caluroso en piedemonte que en llanura; el CVU Cul-de-Sac es más caluroso en llanura que en piedemonte; y el CVU orgánico registra la temperatura máxima más elevada pero la temperatura mínima más fresca en llanura. En términos de confort exterior, el CVU racional en llanura alcanza un 30%, y en el sector de piedemonte representa un 20%; el CVU orgánico en piedemonte alcanza un 30%, y en el sector de llanura alcanza un 20%; siendo el CVU Cul-de-Sac en piedemonte el de mejor habitabilidad (70%); mientras que en llanura alcanza solo un 20%. Esto demuestra que la respuesta térmica y el grado de confort de los CVU insertos en una misma trama urbana tienen diferentes comportamientos de acuerdo a la geomorfología de implantación.

Palabras clave

confort térmico exterior, trama urbana, llanura, piedemonte.

ABSTRACT

This research was carried out in the Mendoza Metropolitan Area (MMA), a city with an arid climate and two different geomorphological contexts. The objective is to analyze the relationship between the behavior and outdoor thermal comfort of urban canyons (UC) located on flatland and hillsides. To this end, six UC were selected in three urban layouts (grid, organic and cul-de-sac) and monitored. The results regarding thermal behavior indicate that the grid UC is hotter on hillsides than on flatland; the cul-de-sac UC is hotter on flatland than on hillsides; and the organic UC has the highest maximum temperature but the coolest minimum temperature on flatland. In terms of outdoor thermal comfort, the grid UC on flatland reaches 30%, and in the hillside area 20%; and the organic UC on the hillside reaches 30%, and in the flatland area 20%. The case with the best habitability was the cul-de-sac UC on the hillside, with thermal comfort reaching 70%, while only 20% in the cul-de-sac UC on flatland. This shows that the outdoor thermal behavior and comfort of the UCs in the same urban layout have different behaviors according to the geomorphology of their location.

Keywords

outdoor thermal comfort, urban layout, flatland, hillside.

INTRODUCCIÓN

El modelo de desarrollo de las áreas urbanas en Latinoamérica ha seguido, durante las últimas décadas, directrices de planificación dominadas principalmente por la valoración económica inmobiliaria especulativa del suelo (Encinas, Marmolejo y Aguirre, 2016; Castrillón y Cardona, 2014; Libertun de Duren, 2014). Esta situación ha generado que los factores sociales y especialmente los ambientales hayan sido relegados, generando así un desequilibrio en el desarrollo de las áreas urbanas y, en algunos casos, un bajo nivel de eficiencia en el uso y preservación de los recursos naturales propios de cada territorio (Ko y Radke, 2014; Dobbs, Hernández y Reyes, 2018).

El crecimiento de las ciudades, a nivel mundial, ha estado acompañado por fuertes cambios en sus características espaciales, un proceso tendiente a la configuración de un modelo cada vez más disperso del territorio. Angel *et al.* (2011) detectaron que el crecimiento de la población en el siglo XX fue del 1.6% anual, mientras que el aumento del uso del suelo fue del 3.6%, produciéndose una disminución de la densidad. Este escenario ha alertado a generar y promover que las existentes y nuevas urbanizaciones sigan patrones de desarrollo sostenibles; constituyendo éste el objetivo número 11, "Ciudades y Comunidades Sostenibles", del *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible* planteado como meta a escala mundial para el año 2030 (UN-Hábitat, 2016; Siclari, 2017).

Las diversas formas de desarrollo y crecimiento de las áreas urbanas modifican las condiciones climáticas naturales propias del sitio de inserción (Mohammed y Chang, 2015; Mawromatis, 2013; Delgado, Campos Chávez y Rentería Juárez, 2012). La transformación de las superficies permeables a impermeables altera localmente los balances de energía haciendo que las ciudades sean más calientes que las áreas rurales perimetrales y dando origen al fenómeno denominado isla de calor urbana (ICU) (Akbari *et al.*, 2016; Levermore *et al.*, 2018; Oke, 1982). Dicha ICU impacta sobre varios factores. Una de las consecuencias más notorias en el balance térmico de las personas es la disminución del grado de habitabilidad térmica de los espacios exteriores (Sun *et al.*, 2017; Tumini, Higuera y Baereswyl Rada, 2016; Tumini, 2013).

En este contexto, varios estudios plantean el desafío de diseñar espacios exteriores confortables que fortalezcan el uso e interacción en las ciudades y que, al mismo tiempo, disminuyan los efectos negativos de la urbanización (Salas Esparza y Herrera Sosa, 2017; Tumini y Pérez, 2015). En efecto, el confort térmico de las personas, en espacios exteriores, es uno de los factores que más influye en la habitabilidad de los espacios públicos de las ciudades (Gómez, Higuera y Ferrer, 2016; Taleghani *et al.*, 2015; Guzmán y Ochoa de la Torre, 2014; Nikolopoulou y Lykoudis, 2006). Los estudios de Givoni (1989), en este sentido, han demostrado cómo la cantidad e intensidad

de actividades que un individuo realiza es afectada por el nivel de incomodidad térmica experimentado cuando se expone a las condiciones climáticas en espacios abiertos. Así, ciertas características urbanas pueden contribuir a mejorar el grado de habitabilidad térmica exterior. La literatura internacional sobre estas temáticas aborda la evaluación del comportamiento y confort térmico de las ciudades, centrándose en el estudio a escala de canal vial urbano (CVU), ya que en entornos construidos los CVU suelen componer más de una cuarta parte de las áreas urbanizadas (Shashua-Bar y Hoffman, 2003; UN-Hábitat, 2013). Existen numerosos estudios a nivel mundial que investigan y discuten cómo ciertas variables que conforman el espacio urbano colaboran a reducir las temperaturas exteriores a escala de CVU (Sanusi *et al.*, 2016; Lin, Matzarakis y Hwand, 2011; Shashua-Bar, Pearlmutter y Erell, 2009; Emmanuel y Fernando, 2007; Golden, 2004; Pearlmutter, Bitan y Berliner, 1999). En relación a ello, el abordaje científico ha avanzado parcialmente a partir de investigaciones que han demostrado, a escala de barrio, que la forma urbana tiene un fuerte impacto en las temperaturas diurnas (Middel *et al.*, 2014; Middel, Chhetri y Quay, 2015). Setaih, Hamza y Townshend (2013) realizan una revisión bibliográfica extensiva de estrategias de mejora térmica que pueden ser implementadas por urbanistas, tales como: materiales reflectantes fríos, superficies de agua, espacios verdes y vegetación, y elementos de sombreado, entre otros. Barakat, Ayad y El-Sayed (2017), en tanto, indican que el uso de vegetación, la selección de materiales apropiados, y la utilización de elementos de agua (fuentes) mejoran el confort térmico en escenarios propuestos con reducciones de hasta 3°C.

A nivel local, Ruiz *et al.* (2015; 2017) y Alchapar y Correa (2015) han evaluado distintas estrategias de reducción de las temperaturas ambientales a escala de CVU. A su vez, Sosa, Correa y Cantón (2017a) consideran a la forma de agrupamiento de las edificaciones "trama + perfil urbano", como estrategia de planificación para contribuir al enfriamiento de las temperaturas del aire urbano. Los resultados demuestran que para el Área Metropolitana de Mendoza (AMM), la combinación entre las estrategias de reducción térmica aplicadas al CVU y a la forma de la trama urbana, alcanzan diferencias de 2.5°C en la temperatura promedio de los conjuntos entre las alternativas evaluadas. Y aunque las estrategias son similares a las utilizadas a nivel internacional, la magnitud de su impacto y su eficiencia en el AMM varía; lo cual revela que los resultados son dependientes de las particularidades de la ciudad (clima, sitio de implantación, forma, materialidad, vegetación).

El *Manual de Sustentabilidad en el Espacio Público*, generado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) (2017), señala que el confort térmico en espacios abiertos está influenciado por diversos factores: condiciones microclimáticas, forma urbana, actividades metabólicas de los usuarios y materialidad del espacio exterior (Figura 1). A partir del análisis de la Figura 1 se infiere que ciertas variables que interactúan con la forma urbana pueden

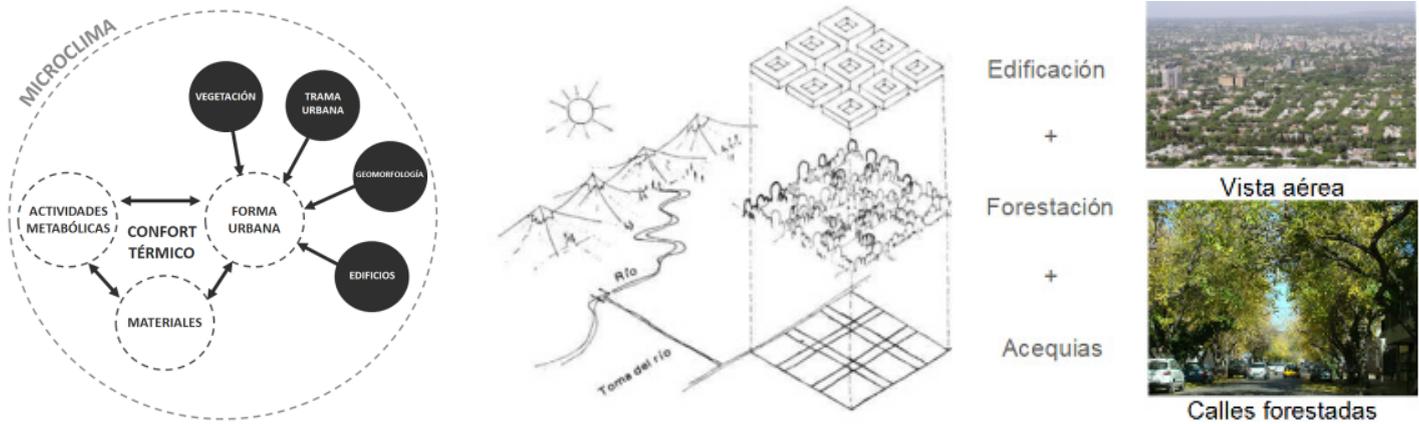


Figura 1. Factores que determinan el confort térmico de una persona y variables que interactúan con la forma urbana. Fuente: Adaptado por las autoras a partir de MINVU (2016).

Figura 2. Superposición de estructuras de la "ciudad oasis". Fuente: Elaboración de las autoras a partir de Bórmida (1984).

alterar las condiciones de confort térmico exterior, entre ellas la geomorfología. Se entiende por "geomorfología" a la variedad de formas del relieve que existen en una superficie de territorio, siendo el relieve un factor de caracterización ambiental relevante ya que condiciona fuertemente las posibilidades de uso del territorio (Abraham, 1996).

Diversos estudios destacan la importancia de considerar la geomorfología en los procesos de planificación del territorio, debido a que éstos plantean limitaciones al desarrollo urbano (Villegas et al., 2015; Cavallaro, Nicosia Burgos y Fontaneto, 2010). Considerables problemas ambientales podrían evitarse si las nuevas urbanizaciones se proyectasen y construyesen teniendo en cuenta las condiciones geomorfológicas propias del terreno a intervenir (Albã, Mititelu-ionuș, y Boengiu, 2017). Esto se refleja, por ejemplo, en la modificación de las trayectorias naturales de vientos y brisas locales, así como en la capacidad de absorción y acumulación de calor del terreno natural (Wang y Oayang, 2016; Castaldo, et al., 2017), lo cual afecta también la infiltración y escorrentía de las precipitaciones (Vich et al., 2014).

Para el caso de estudio, AMM, ciudad de clima árido localizada en el centro oeste argentino, la geomorfología en la extensión del territorio presenta dos escenarios fundamentalmente distintos: llanura (altitud entre 300 y 800 m.s.n.m.) y piedemonte (altitud entre 801 y 1400 m.s.n.m.). En ambos entornos geomorfológicos, los esquemas de desarrollo urbano son de tipo "ciudad oasis", que representa un caso particular en el urbanismo de zonas áridas, ya que ahí los CVU son anchos, tienen forestales de alineación y las construcciones son de baja altura (1-2 niveles, baja densidad). Este modelo peculiar de urbanización busca acondicionar ambientalmente un sector de desierto, mediante una macro-estructura espacial, que consta esencialmente de una red de riego y un entramado de árboles, superpuesta a la estructura arquitectónica (Figura 2).

Desde hace más de 10 años que se documenta en el AMM la existencia de la ICU y sus consecuencias asociadas. La ICU registra incrementos de temperatura máxima del orden de 10°C (Correa, De Rosa y Lesino, 2008). Los estudios a nivel regional demuestran que este fenómeno provoca durante el verano que sus espacios públicos y CVU se encuentren en incomodidad térmica por calor durante el 46 al 62% del tiempo, con la consecuente disminución del grado de habitabilidad y uso de los mismos (Correa, Ruiz y Cantón, 2010; Stocco, Cantón y Correa, 2015; Sosa, Correa y Cantón, 2017b). Sin embargo, aún no se evidencia a nivel local, el abordaje del impacto térmico exterior que ejerce la forma de CVU contenidos en diversas tramas urbanas, en relación a su geomorfología de implantación.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo monitorear y analizar, durante el periodo estival, el comportamiento térmico exterior y estimar el grado de confort a escala de CVU. A partir de ello, se propone determinar si existe alguna relación en cuanto a la forma de los CVU insertos en los dos escenarios geomorfológicos del AMM, que permita generar recomendaciones de diseño a urbanistas y planificadores.

MARCO DE PLANIFICACIÓN SEGÚN ESCENARIO GEOMORFOLÓGICO

El crecimiento urbano del AMM está regulado por dos leyes provinciales: la Ley de loteo o fraccionamiento N° 4341 y la Ley de disposición del suelo de zona oeste del gran Mendoza N° 4886. La Figura 3 contrasta ambas normativas a través de un conjunto de descriptores e indicadores urbanos -ancho de calle, superficie mínima de parcela, frente de la parcela, altura máxima y factor de ocupación del suelo (FOS)-, diferenciados según zonas urbanas y sub-urbanas. Ello, a pesar de que esta condición de diferenciación territorial es poco clara y no existe cartografía específica que delimite ambos sectores dentro del AMM.

Escenario	Llanura		Piedemonte	
Ley	Loteo de terrenos N°4341		Disposición zona oeste N°4886	
Zonificación	Urbana	Sub-urbana	Urbana	Sub-urbana
Ancho calle (m)	16 - 20 - 30	16 - 20 - 30	16	16
Sup. mínima de parcela (m ²)	200	200	200	500
Frente parcela (m)	12	12	14	14
Altura máxima (m)	Según zona	Según zona	10	10
FOS	Según zona (mín 0.40, máx 1.00)	Según zona (mín 0.30, máx 0.60)	0.35	0.35

Figura 3. Comparación de las variables urbanas según dos leyes provinciales vigentes. Fuente: Elaboración las autoras.

En la Figura 3, se aprecia que, en ambos escenarios –llanura y piedemonte-, no existe diferenciación en el modo de ocupación de territorio para distintos usos -zonas urbanas y sub-urbanas- ni para los distintos relieves de territorio. Sólo se observa, en el caso del piedemonte, una variación en la superficie mínima de parcela según usos (200 m² vs. 500 m²) y que los anchos de CVU toman el valor mínimo (16 m). Esto podría ser un promotor importante para fomentar la compacidad de la trama y así disminuir la exposición solar de los CVU, como también para generar mayores superficies de suelos permeables en escenarios como el piedemonte que poseen alta fragilidad ambiental, grandes pendientes, lluvias estivales concentradas, vegetación escasa y degradada, suelos no consolidados y factibles de padecer acelerados procesos de erosión, principalmente hídrica (Abraham, 1990).

Como resultado, el desarrollo urbanístico de piedemonte replica en gran medida el esquema urbano de llanura, sin advertir que en estos sectores las respuestas de planificación y diseño de CVU deben adaptarse a las características inherentes del territorio a intervenir.

De lo descrito se desprende que en el área de estudio la componente ambiental y de adaptación al escenario natural de interacción pareciera no estar considerada dentro de los lineamientos legales de planificación. En consecuencia, esta situación afecta al comportamiento térmico de los desarrollos urbanos, incrementa los consumos de energía e impacta negativamente en las condiciones de confort de los espacios abiertos.

METODOLOGÍA

La metodología del trabajo se divide en cuatro secciones, a saber: (i) selección y descripción de los casos de estudio en llanura y piedemonte; (ii) monitoreo y adquisición de datos microclimáticos; (iii) cálculo de las condiciones de confort térmico exterior con el modelo COMFA -COMFort formula- (Brown y Gillespie, 1995); y, (iv) correlación estadística, coeficiente de Pearson, entre los indicadores urbanos y el comportamiento térmico y de confort.

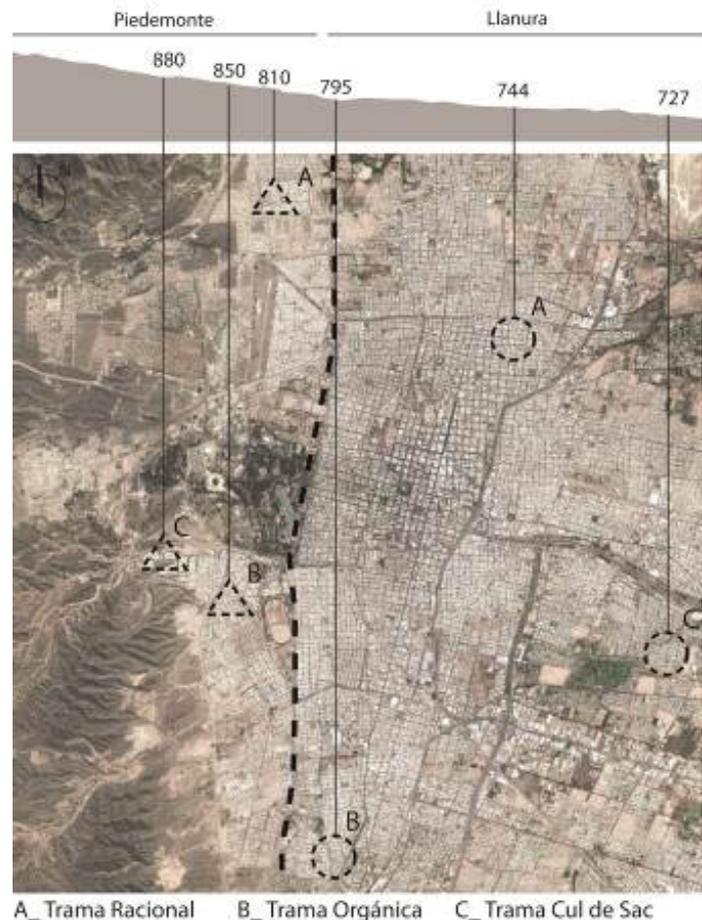


Figura 4. División sector llanura y piedemonte y ubicación casos de estudio A) trama racional; B) trama orgánica y C) trama Cul-de-Sac. Fuente: Elaboración de las autoras.

Trama	Racional		Orgánica		Cul-de-Sac	
	Llanura	Piedemonte	Llanura	Piedemonte	Llanura	Piedemonte
Escenario						
SVF	0.16 	0.30 	0.60 	0.72 	0.57 	0.45
Especie forestal	<i>Tipuana tipu</i>	<i>Morus alba</i>	<i>Ulmus umbraculifera</i>	<i>Melia azedarach</i>	<i>Morus alba</i>	<i>Morus alba</i>
Largo (m)	116	163	226	245	145	145
Ancho (m)	20	16	20	16	20	12
Altó (m)	3	3	3	3	3	3
H/W	0.15	0.19	0.15	0.19	0.15	0.25
% Construido	66	11	32	42	32	27
% Forestado	34	24	36	24	42	18
% Terreno natural	0	65	32	34	26	59
% Calles	35	44	40	45	37	33
% Manzana	65	56	60	55	63	67
Altitud	727	810	795	850	744	880
Pendiente	1.5	3.8	1.9	3.5	1	4.5

Figura 5. Caracterización e indicadores urbanos de los casos de estudio. Fuente: Elaboración de las autoras.

CASOS DE ESTUDIO EN LLANURA Y PIEDEMONTE

Para desarrollar el trabajo se seleccionaron y caracterizaron seis CVU insertos en tres formas de tramas: racional, orgánica y Cul-de-Sac; existentes en cada escenario geomorfológico -llanura y piedemonte-. La Figura 4 muestra su ubicación dentro del territorio del AMM. Se define por "forma de trama Cul-de-Sac" a los conjuntos urbanos con calles que poseen un solo punto de entrada y salida, y que finalizan con un ensanche de forma circular que permite girar con el vehículo.

La caracterización de cada caso se efectuó mediante un grupo de indicadores morfológicos (largo y ancho de calle, H/W), forestales (SVF, especie forestal), geomorfológicos (altitud y pendiente) y de cobertura de suelo (% calles, % construido, % manzanas, % terreno natural y % forestado). Es importante destacar que cada CVU seleccionado, dentro del universo existente en el AMM, mantiene similares ciertas características. Ahora bien, existen diferencias en algunos de los indicadores urbanos, las cuales se presentan en la sección de resultados el análisis, de manera tal que se pueden contrastar las diversas formas existentes en ambos escenarios geomorfológicos. Los CVU analizados dentro de cada trama poseen una orientación E-O, orientación que, por cierto, es la más perjudicial para las condiciones de habitabilidad de los espacios exteriores debido a su mayor exposición al recorrido solar y a que, además, en condiciones de piedemonte, contribuye a la aceleración de los cauces aluvionales. La Figura 5 expone los valores de los indicadores urbanos de los casos de estudio seleccionados.

La clasificación y cuantificación de la cobertura de suelo de cada caso de estudio se llevó a cabo a partir del procesamiento de imágenes satelitales. Se utilizaron, en concreto, imágenes multi-espectrales de tipo ASTER que son capturadas por el satélite TERRA. A su vez, ASTER posee tres sub-sistemas de sensores: VNIR, SWIR y TIR. El sub-sistema VNIR captura imágenes en tres bandas del rango de luz, en un rango espacial de 15m. Siendo esta resolución la más óptima en términos de visualización y análisis, ya que permite distinguir en la imagen los objetos con mayor precisión por el tamaño del píxel, medido en metros sobre el terreno (píxel= 15 x 15m). El procedimiento de clasificación de estas imágenes, con un área de recorte de 560 x 560 m², se realizó con el freeware MultiSpec©. Esta herramienta permite procesar y analizar imágenes de tipo hiper-espectral y multi-espectral, e incluye seis algoritmos de clasificación que hacen posible diferenciar el porcentaje existente de píxeles de cada clase con características espectrales similares. Para esta investigación, se optó por el análisis por componentes principales (módulo de análisis discriminante lineal de Fisher). La clasificación de cada imagen se realizó seleccionando por tipo de clase un campo de píxeles: cada clase coincide con las coberturas de suelo anteriormente descritas.

El indicador SVF fue calculado mediante imágenes hemisféricas capturadas con una cámara digital Nikon® CoolPix equipada con un lente ojo de pez; procesadas con el software Píxel de Cielo. Este software obtiene el valor de SVF en condiciones de cielo despejado, con forestación urbana intensa y en ciudades con alta reflectividad, típica de regiones áridas como es el caso de este estudio. La relación H/W y, ancho y longitud de la calle, fue determinada a partir del relevamiento *in situ* en cada CVU.

Sensor	Estación Hobo Weather Station®						Fluke 66
Variable	Temperatura	Humedad relativa	Velocidad del viento	Dirección del viento	Radiación solar	Presión atmosférica	Temperatura superficial
Rango de medición	-40 a 75°C	0 a 100%	0 a 45 m/s	0 a 355°	0 a 1280 W/m ²	660 a 1070 mbar	-32 a 600°C
Rango de operación	-40°C a 75°C						
Precisión	0.2°C, a 0°C -50°C	±2,5%, desde 10 a 90% HR	±1.1 m/s ó 4%	±5°	±10.0 W/m ² ó ±5%	±3.0 mbar, sobre el rango de máxima presión a 25°C.	± 1% de la lectura ó ± 1°C
Resolución	0.02 a 25°C	0.1%HR a 25°C	0.38 m/s	1.4°	1.25 W/m ²	0.1 mbar	

Figura 6. Descripción equipamiento de medición. Fuente: Elaboración de las autoras.

MONITOREO MICROCLIMÁTICO

Con el fin de conocer el comportamiento microclimático de los seis casos de estudio, se monitoreó mediante campañas de mediciones con sensores fijos (Hobo® H08-003-02) ubicados en cada CVU y dos estaciones meteorológicas móviles (Hobo Weather Station®). El periodo de medición fue entre el 22 de enero al 24 de febrero de 2016. En las mediciones fijas, los sensores se instalaron a 2 m de altura desde el nivel de la calle dentro de una caja perforada de PVC blanco con el objeto de evitar la irradiación y asegurar una adecuada circulación de aire. En las mediciones móviles se utilizó una estación en cada CVU, la cual fue instalada sobre un soporte móvil capaz de desplazarla por 4 puntos de monitoreo para tomar los valores a lo largo de una hora en cada CVU. El periodo de medición con estaciones móviles fue desde las 10:00 h hasta las 20:00 h, por una situación de logística y con el propósito de preservar la seguridad del equipamiento. Simultáneamente, se registraron los valores de temperatura superficial de paredes, veredas y calle con un termómetro infrarrojo (Fluke 66). Los datos de la campaña fueron adquiridos cada 15 minutos. La Figura 6 describe el equipamiento de medición utilizado.

CONFORT TÉRMICO EXTERIOR

A nivel mundial existen varios modelos que sirven para conocer y calcular el grado de confort térmico exterior: PET (Matzarakis, Helmut y Moses, 1999), PMV (Fanger, 1970), COMFA (Brown y Gillespie, 1995), entre otros. En este trabajo las condiciones de confort de cada CVU fueron determinadas mediante el modelo COMFA.

Para el caso de estudio del AMM, y su condicionante de ser una "ciudad oasis", el modelo COMFA resulta ser el indicador más adecuado, ya que posibilita una mayor diferenciación de las características urbanas y forestales, en adición a las variables climáticas consideradas por los demás índices (Ruiz y Correa, 2014). El modelo COMFA resuelve una ecuación de balance de energía S, siendo

el rango de confort térmico S entre -50 a 50 W/m². Si el balance presenta un gran valor positivo, la persona recibe más energía que la que pierde, por lo que podría haber sobrecalentamiento y estaría inconfortable a causa del calor. Por otra parte, si el balance es negativo, la persona podría sentir frío. A continuación, se presenta la fórmula del balance de energía S:

$$S = M + R_{abs} - Conv - Evap - TR_{emitida}$$

Donde: M energía metabólica producida por el organismo; R_{abs} radiación solar y terrestre absorbida; Conv calor sensible perdido o ganado por convección; Evap pérdida evaporativa de calor; TR_{emitida} radiación terrestre emitida. Los valores de los parámetros de cada uno de los cinco términos de la fórmula S fueron obtenidos del monitoreo microclimático; y, asimismo, se definieron valores para las variables forestales, materiales del espacio construido y de condiciones de exposición de los usuarios, que intervienen en el método COMFA. De esa forma, se determinó lo siguiente:

- Permeabilidad de los forestales: *Tipuana Tipu* 0.12, *Melia Azedarach* 0.28, *Morus Alba* 0.31, *Ulmus Umbraculifera* 0.15 (magnitud adimensional)
- Albedo promedio superficies verticales: 0.40 (magnitud adimensional)
- Albedo promedio superficies horizontales: 0.10 (magnitud adimensional)
- Aislamiento vestimenta: 75 clo
- Permeabilidad vestimenta: 150 (magnitud adimensional)
- Tasa metabólica: 120 W/m²

CORRELACIÓN ESTADÍSTICA.

A partir de la caracterización de los seis casos de estudio, mediante los once indicadores urbanos anteriormente descritos (Figura 5), se efectuó un análisis estadístico. El método seleccionado para tal labor fue el de correlación con el coeficiente de Pearson. Este índice es una medida

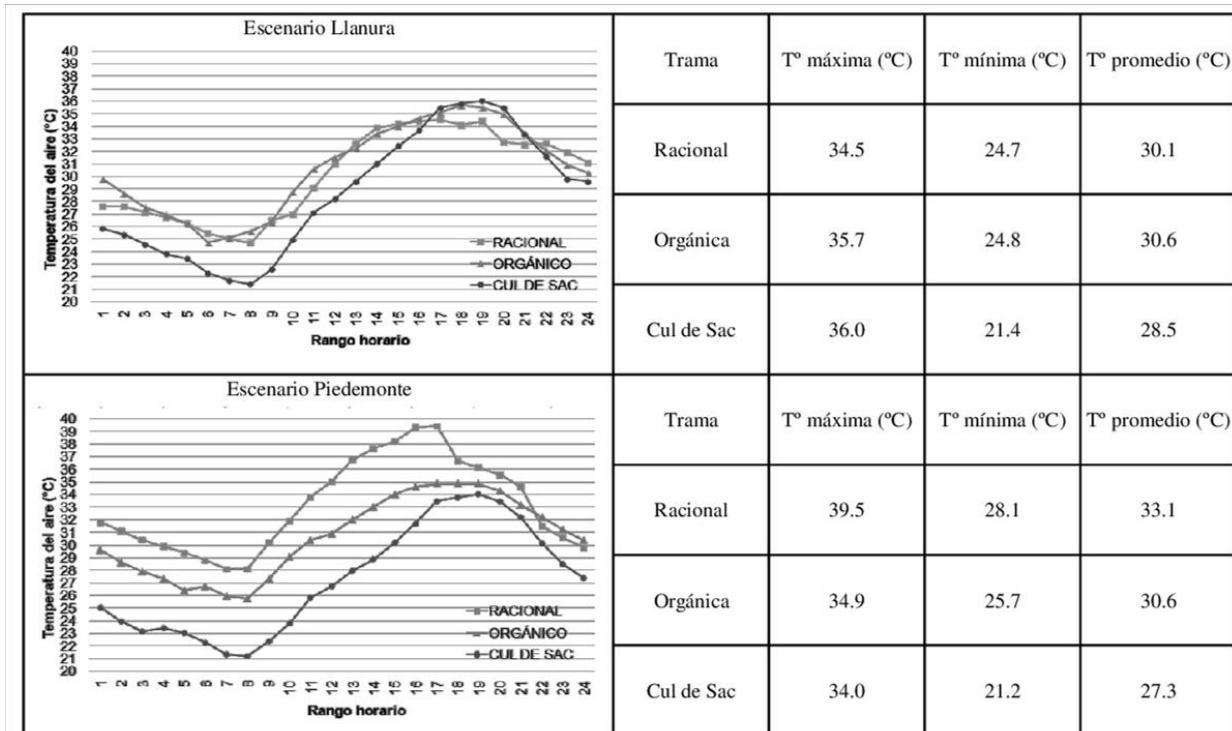


Figura 7. Comportamiento térmico, contraste entre escenarios de llanura y piedemonte. Fuente: Elaboración de las autoras.

lineal e independiente de la escala que permite medir el grado de relación entre dos variables cuantitativas; donde su magnitud indica el grado de asociación entre las variables y los valores absolutos oscilan entre -1 y +1. En este estudio se considera una relación de magnitud de +/-0.5, según corresponda, como significativa. La matriz de correlación se calculó mediante el uso del software InfoStat (Di Rienzo et al., 2011).

A través del análisis recién mencionado fue posible reconocer cómo ciertos indicadores urbanos muestran relación entre sí (mayor a 0.5) para alcanzar mejoras en los aspectos térmicos y de confort del espacio exterior, a efectos de generar recomendaciones de diseño urbano para los planificadores.

RESULTADOS

COMPORTAMIENTO TÉRMICO

Como resultado del monitoreo microclimático, se determinó que la respuesta térmica varía al contrastar los escenarios geomorfológicos de inserción, a pesar de replicarse la forma de trama urbana en ambos sectores.

La Figura 7 exhibe las curvas de comportamiento térmico de los seis CVU monitoreados. Se seleccionó el día 23 de enero de 2016 ya que es representativo de las condiciones climáticas del AMM (día claro, elevada heliofanía, baja velocidad de vientos y baja humedad relativa).

Al analizar y contrastar el comportamiento de los casos, se visualiza que:

- El CVU inserto en la trama racional es más caluroso en el piedemonte que en la llanura; registrándose diferencias entre las temperaturas máximas ($\Delta 4.9^\circ\text{C}$), mínimas ($\Delta 3.4^\circ\text{C}$) y promedios ($\Delta 2.9^\circ\text{C}$).
- El CVU inserto en la trama orgánica tiene la temperatura máxima más elevada en la llanura, con una diferencia de 0.8°C respecto al piedemonte, sin embargo, la temperatura mínima del CVU inserto en la trama orgánica de llanura es 1.0°C más fresco respecto al CVU en el piedemonte. Las temperaturas promedio, en ambos escenarios, son muy similares ($\Delta 0.1^\circ\text{C}$).
- El CVU inserto en la trama Cul-de-Sac es más caluroso en la llanura que en el piedemonte, dándose diferencias entre sus temperaturas máximas ($\Delta 2.0^\circ\text{C}$), mínimas ($\Delta 0.2^\circ\text{C}$) y promedios ($\Delta 1.3^\circ\text{C}$).

Los CVU insertos en la trama Cul-de-Sac muestran mayor refrescamiento nocturno en ambos escenarios geomorfológicos. Asimismo, se observa una mayor diferenciación en el comportamiento térmico de los CVU localizados en el piedemonte, lo que parecería indicar que el impacto de la forma de la trama sobre el desempeño térmico del espacio es más importante en esta geomorfología.

CONFORT TÉRMICO EXTERIOR.

La Figura 8 ilustra los porcentajes acumulados de cada rango de sensación del balance COMFA, siendo el color verde el rango donde las personas se sienten en confort térmico. De este resultado se desprende que:

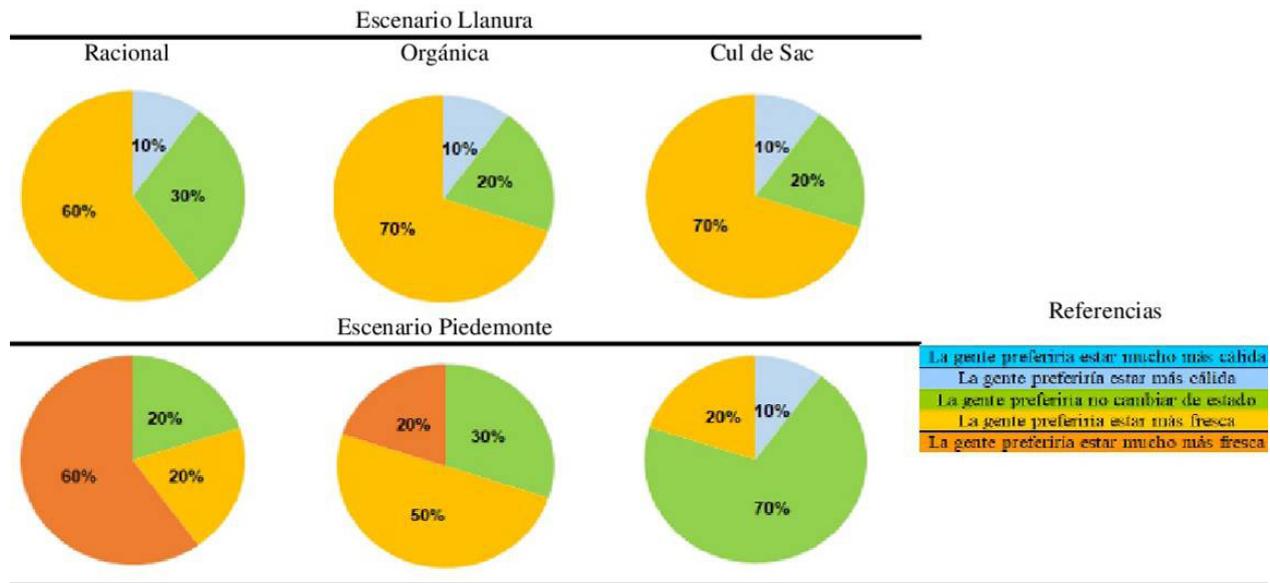


Figura 8. Distribución de la frecuencia (%) en las condiciones de confort térmico en cada caso evaluado. Fuente: Elaboración de las autoras

	Racional		Orgánica		Cul de Sac	
Escenario Llanura	+	+	-	-	-	-
Escenario Piedemonte	--	--	+	+	++	++
Respuesta	Comportamiento térmico	Confort térmico	Comportamiento térmico	Confort térmico	Comportamiento térmico	Confort térmico

Figura 9. Contraste de cada trama analizada según su entorno de inserción. Fuente: Elaboración de las autoras.

- En el sector de llanura, los CVU pertenecientes a la trama racional alcanzan, durante un 30% del tiempo evaluado, condiciones de confort; mientras que en el sector de piedemonte ello representa un 20%.
- En el sector de piedemonte, los CVU pertenecientes a la trama orgánica logran condiciones de confort, durante un 30% del tiempo evaluado; mientras que en el sector de llanura este porcentaje corresponde a un 20%.
- En el sector de piedemonte, los CVU pertenecientes a la trama Cul-de-Sac alcanzan condiciones de confort, durante un 70% del tiempo evaluado; mientras que en el sector de llanura esta situación representa sólo un 20%.

Estas cifras evidencian que:

- Los CVU insertos en la trama de tipo racional, de uso extensivo en las urbanizaciones de ambos escenarios geomorfológicos, presentan mayor disconfort térmico en el piedemonte. Es importante subrayar que este tipo de trama se contradice con las recomendaciones internacionales para el diseño urbano de las áreas de piedemonte que aconsejan respetar la topografía del terreno natural utilizando

- tramas orgánicas, con una distribución tipo "cluster" y el esquema de Cul-de-Sac en sus CVU (Castillo, Correa y Cantón, 2017).
- Los CVU insertos en la trama de tipo Cul-de-Sac u orgánica, que se adaptan a las condiciones naturales del terreno en el sector de piedemonte, muestran mejores condiciones de habitabilidad térmica exterior.

COMPORTAMIENTO TÉRMICO Y CONFORT EXTERIOR

La Figura 9 resume y contrasta la respuesta térmica y las condiciones de confort exterior en cada CVU inserto en diferentes tramas y escenarios geomorfológicos. El signo ++ indica el desempeño óptimo, que se define como el que registra temperaturas máximas y mínimas más bajas y, mayor frecuencia de confort. El signo -- señala el comportamiento más desfavorable, es decir, el que presenta temperaturas máximas y mínimas más altas y, mayor frecuencia de disconfort. Los signos + y - expresan condiciones intermedias.

La Figura 9 muestra que la respuesta térmica y las

	T° máxima	T° mínima	T° promedio	COMFA
Largo	0.0	0.4	0.3	-0.3
Ancho	0.1	0.1	0.2	-0.8*
H/W	-0.3	-0.3	-0.5*	0.9*
SVF	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1
Altitud	-0.1	0.0	-0.1	0.6*
Pendiente	0.1	0.2	0.1	0.6*
% calles	0.6*	0.8*	0.8*	0.6*
% construído	-0.7*	-0.2	-0.2	0.0
% manzanas	-0.6*	-0.8*	-0.8*	-0.6*
% terreno natural	0.5*	0.2	0.2	0.3
% forestado	0.0	-0.2	0.0	-0.7*

Figura 10. Coeficientes de correlación de Pearson, $*R^2 \geq 0.5$. Fuente: Elaboración de las autoras.

condiciones de confort de un CVU inserto en una misma trama urbana tienen un comportamiento diferente de acuerdo a la geomorfología en la cual se inserta. Por ejemplo, el desempeño del CVU dispuesto en una trama racional muestra un comportamiento positivo en escenarios de llanura y muy desfavorable en escenarios de piedemonte. Estos resultados ponen en relieve la necesidad de estudiar el efecto combinado de las características del perfil urbano, la trama en la que se incorpora y la geomorfología de localización.

RECOMENDACIONES DE DISEÑO URBANO.

Los análisis previos han permitido determinar comportamientos térmicos y condiciones de confort de diferentes CVU insertos en distintos tipos de trama y contextos geomorfológicos. Sin embargo, los CVU analizados evidencian ligeras diferencias en los indicadores utilizados para su caracterización que dificultan un análisis univariado para establecer relaciones entre variables de diseño y respuesta térmica. En este sentido, el análisis estadístico persigue identificar el impacto de los indicadores en la respuesta térmica y las condiciones de confort de los distintos casos, a fin de definir pautas o recomendaciones de diseño tendientes a disminuir las temperaturas urbanas y mejorar las condiciones de confort.

La Figura 10 grafica los coeficientes de correlación de Pearson entre las variables respuesta (temperaturas del aire y confort) y las variables independientes (indicadores urbanos). El análisis de los resultados indica que existen correlaciones de significancia estadística con ocho indicadores -identificados con un asterisco-.

El análisis de las correlaciones revela, respecto a las temperaturas del aire, que las temperaturas máximas correlacionan positivamente con los siguientes indicadores: superficie de calle y terreno natural; y negativamente, con la superficie construida y la superficie de manzana. Es decir, las temperaturas máximas se incrementan cuando crece la superficie de calle y de terreno natural, y disminuye la superficie construida y la de la manzana.

Las temperaturas mínimas muestran una correlación positiva con la superficie de calle y negativa con la superficie de manzana. Esto significa que las temperaturas mínimas aumentan cuando crece la superficie de calle y disminuye la superficie de manzana.

Respecto a las temperaturas promedio, estas correlacionan positivamente con la superficie de calle y negativamente con la superficie de manzana y el H/W.

Finalmente, los valores de COMFA correlacionan positivamente con la altitud, pendiente, superficie de calle y H/W. Y lo hacen negativamente con el ancho de calle, superficie de manzana y superficie forestada. Debe tenerse en cuenta que valores de COMFA más altos refieren a mayor desconfort térmico, o sea, que las condiciones de confort térmico mejoran cuando disminuye la altitud, pendiente, superficie de calle y H/W; y se empobrecen cuando disminuye el ancho de calle, superficie de manzana y superficie forestada.

De lo aquí expuesto, se desprende que el confort se encuentra condicionado, entre otras variables, por la geomorfología. Como se dijo previamente, el confort

térmico disminuye cuando aumenta la altitud y la pendiente, características dominantes del piedemonte. Por otra parte, disminuye cuando aumenta la superficie de calle y el H/W. De la combinación del conjunto de variables se infiere que, a mayores exigencias del relieve, asociadas a la condición de piedemonte, es necesario tender a la compacidad del modelo urbano para mejorar las condiciones de confort.

CONSIDERACIONES FINALES

Este trabajo ha permitido determinar el comportamiento térmico y las condiciones de confort de CVU insertos en diferentes tipos de trama y geomorfologías, mediante el monitoreo de las condiciones microclimáticas. Asimismo, ha sido posible analizar la influencia de los indicadores que caracterizan dichos espacios con el desempeño térmico y las condiciones de confort de los mismos a través del análisis estadístico de los datos.

Los resultados obtenidos demuestran que la respuesta térmica y el grado de confort de los CVU implantados en una misma trama urbana tienen diferentes comportamientos de acuerdo a la geomorfología de implantación. En consecuencia, el estudio avala la necesidad de abordar el efecto combinado de las características del perfil urbano, la trama en la que se inserta y la geomorfología de localización. Esto representa un avance en la generación de conocimiento de acuerdo al estado del arte.

En llanura, el CVU de trama racional registra los mejores desempeños, mientras que en piedemonte el mejor desempeño, tanto térmico como de confort exterior, está asociado al CVU de trama Cul-de-Sac, y en menor grado a los CVU de trama orgánica. Por lo tanto, en el caso de relieves signados por mayor altitud y pendiente, la compacidad de la forma genera beneficios asociados a la disminución de las temperaturas máximas, mínimas y promedio, y a la mejora de las condiciones de confort. Esto se traduce en la necesidad de desarrollar tramas con menores superficies de calles, mayores superficies de manzanas y forestación, y bajas densidades constructivas.

En definitiva, el confort se encuentra condicionado, entre otras variables, por la geomorfología dado que los valores de COMFA correlacionan positivamente con la altitud y la pendiente. Es decir, en piedemonte, a igualdad de valores de otros indicadores en llanura, el confort térmico disminuye. En este sentido, la forma de urbanizar el territorio debe considerar las características propias de cada sitio, sobre todo cuando se evidencia que los trazados de la urbanización del piedemonte han continuado las tramas desarrolladas en la llanura, tramas en su mayoría racionales, las cuales, según los datos del presente trabajo, muestran precisamente el peor desempeño en tal sector, tanto en su comportamiento térmico como en el grado de habitabilidad exterior.

Finalmente, hay que recordar que la necesidad de aumentar las tierras urbanizables, debido al aumento de población, impulsa el proceso de expansión urbana. De acuerdo a la tendencia de desarrollo del AMM y el marco regulatorio de los trazados urbanos, se hace patente que el mismo no ha sido planificado ni cuenta con normativas que contemplen la incidencia de la geomorfología en la eficiencia del funcionamiento térmico de las urbanizaciones. Por consiguiente, las conclusiones de este trabajo aspiran a contribuir al ámbito de la planificación a escala regional, como también a reflejar la importancia de abordar la problemática del desarrollo urbano desde un enfoque que considere y valore la definición de la forma urbana en función de las particularidades del territorio a intervenir.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se llevó a cabo gracias a los recursos financiados por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) [PIP 2011-00640] y por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) [PICT 2011-0611].

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHAM, Elena. *Proyecto: Planificación y Ordenamiento Ambiental del Piedemonte al Oeste de la Ciudad de Mendoza*. IADIZA, 1990.
- ABRAHAM, Elena. Mapa Geomorfológico de la Provincia de Mendoza en escala 1:500.000. En: *Atlas básico de recursos de la región andina argentina*. Informe Final. Enviado a Universidad de Granada, Junta de Gobierno Andalucía, España, 1996.
- AKBARI, Hashem; CARTALIS, Constantinos; KOLOKOTSA, Denia; MUSCIO, Alberto; PISELLO, Anna Laura; ROSSI, Federico; SANTAMOURIS, Matheos; SYNNEFA, Afroditis; WONG, Nyuk y ZINZI, Michele. Local climate change and urban heat island mitigation techniques. The estate of the art, *Journal of Civil Engineering and Management*, 2016, vol. 22, pp. 1-16.
- ALBĂ, Claudia; MITITELU-IONUȘ, Oana y BOENGIU, Sandu. "Geomorphological facilities and constraints in urban expansion of Craiova city". En: *Conference: Proceedings of the Romanian Geomorphology Symposium*, 2017, edición 33, pp. 11-14.
- ALCHAPAR, Noelia y CORREA, Érica. Comparison the performance of different facade materials for reducing building cooling needs. En: *PACHECO-TORGAL, Fernando; LABRINCHA, Joao; CABEZA, Luisa y GRANQVIST, Claes (eds.). Eco-efficient materials for mitigating building cooling needs*. Cambridge: Woodhead, 2015, pp. 155-194.
- ANGEL, Shlomo; PARENT, Jason; CIVCO, Daniel; BLEI, Alexander y POTERE, David. The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries, 2000-2050, *Progress in Planning*, 2011, 75 n° 2, pp. 53-107.

- BARAKAT, Asmaa, AYAD, Hany y EL-SAYED, Zeyad. Urban design in favor of human thermal comfort for hot arid climate using advanced simulation methods, *Alexandria Engineering Journal*, 2017, vol. 56, n° 4, pp. 533-543.
- BROWN, Robert y GILLESPIE, Terry. *Microclimate Landscape Design*. Somerset, New Jersey, U.S.A: John Wiley & Sons Inc., 1995.
- CASTALDO, Verónica; PISELLO, Anna; PIGLIAUTILE, Ilaria; PISELLI, Cristina y COTANA, Franco. Microclimate and air quality investigation in historic hilly urban areas: Experimental and numerical investigation in central Italy, *Sustainable Cities and Society*, 2017 vol. 33, pp. 27-44.
- CASTILLO, Ana Laura, CORREA, Érica y CANTÓN, María Alicia. Regulación urbanística de áreas de piedemonte en ciudades latinoamericanas. Análisis crítico de la normativa internacional y el marco regulatorio de la ciudad de Mendoza, Argentina, *ACE: Architecture, City and Environment. Arquitectura, Ciudad y Entorno*, 2017, vol. 12, pp. 39-70.
- CASTRILLÓN, Alberto y CARDONA, Sandra. El urbanismo y la planeación moderna. Glocalidades en la formación de la modernidad urbana de Medellín, *Revista Historia y Sociedad*, 2014, vol. 26, pp. 17-51.
- CAVALLARO, Sandra; NICOSIA BURGOS, Federico y FONTANETO, Patricio Julián. La cartografía ambiental como base para los estudios de planificación ecológica del territorio, *Asociación Geológica Argentina*, 2010, vol. 66, pp. 475-483.
- CORREA, Érica; DE ROSA, Carlos y LESINO, Graciela. Urban heat island effect on heating and cooling degree day's distribution in Mendoza's metropolitan area. Environmental costs. En: SOCIEDADE PORTUGUESA DE ENERGIA SOLAR (SPES) (ed.). *Proceedings of the EUROSUN 2008*. NY, USA: Curran associates, Inc. Red Hook, pp. 951-958.
- CORREA, Érica; RUIZ, María Angélica y CANTÓN, María Alicia. Morfología forestal y confort térmico en "ciudades oasis" de zonas áridas, *Ambiente Construido*, 2010, vol.10, n° 4, pp.119-137.
- DELGADO, Gian Carlo; CAMPOS CHÁVEZ, Cristina y RENTERÍA JUÁREZ, Patricia. Cambio climático y el metabolismo urbano de las Megaurbes Latinoamericanas, *Hábitat Sustentable*, 2012, vol. 2, n° 1, pp. 2-25.
- DI RIENZO, Julio; CASANOVES, Fernando; BALZARINI, Mónica; GONZÁLEZ, Laura; TABLADA, Margot; ROBLEDO, Walter. *InfoStat v. 2011*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 2011.
- DOBBS, Cynnaron; HERNÁNDEZ MORENO, Ángela; REYES PAECKE, Sonia y MIRANDA, Marcelo. Exploring temporal dynamics of urban ecosystem services in Latin America. The case of Bogotá (Colombia) and Santiago (Chile), *Ecological Indicators*, 2018, vol. 85, pp. 1068-1080.
- EMMANUEL, Rohinton y FERNANDO, H. Urban heat islands in humid and arid climates: role of urban form and thermal properties in Colombo, Sri Lanka and Phoenix, USA, *Climate Research*, 2007, vol. 34, n° 3, pp. 241-251.
- ENCINAS, Felipe; MARMOLEJO, Carlos y AGUIRRE, Carlos. El impacto de los proyectos inmobiliarios y sus atributos de sustentabilidad sobre el valor del suelo: ¿causa o consecuencia? Dos estudios de casos para Santiago de Chile, *Hábitat Sustentable*, 2016, vol. 6, n° 2, pp.70-79.
- FANGER, Ole. *Thermal Comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970, pp. 244.
- GIVONI, Baruch. *Urban design in different climates*. World meteorological organization, 1989.
- GOLDEN, Jay. The Built Environment Induced Urban Heat Island Effect in Rapidly Urbanizing Arid Regions. A Sustainable Urban Engineering Complexity, *Environmental Sciences*, 2004, vol. 1, n° 4, pp. 321-349.
- GÓMEZ, Nersa; HIGUERAS, Ester y FERRER, Mercedes. Análisis del Confort Térmico Social para el Control sostenible del Microespacio Urbano entre edificaciones, *Revista Portafolio*, 2016, vol. 2, n° 34, pp. 59-70.
- GUZMÁN, Francisco y OCHOA DE LA TORRE, José. Confort térmico en los espacios públicos urbanos. Clima cálido y frío semi-seco, *Hábitat Sustentable*, 2014, vol. 4, n° 2, pp. 52-63.
- KO, Yekang y RADKE, John. The Effect of Urban Form and Residential Cooling Energy Use in Sacramento, California, *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2014, vol. 41, n° 4, pp. 573- 593.
- LEVERMORE, Geoff; PARKINSON, John; LEE, Kwanho; LAYCOCK, Patrick y LINDLEY, Sarah. The increasing trend of the urban heat island intensity, *Urban Climate*, 2018, vol. 24, pp. 360-368.
- LIBERTUN DE DUREN, Nora. Urbanización rápida y desarrollo: cumbre de América Latina y China. En: *Cumbre de América Latina y China de Políticas y Conocimiento: Impactos de la urbanización rápida y la prosperidad nacional* (Lima, 15 y 16 de julio de 2014) [en línea]. Banco Inter-Americano del Desarrollo, 2014, pp. 9-11. [Consultado 12 octubre 2018]. Disponible en: <https://publications.iadb.org/handle/11319/6732>
- LIN, Tzu-Ping; MATZARAKIS, Andreas y HWAND, Ruey-Lung. Shading effect on long-term outdoor thermal comfort, *Building and Environment*, 2011, vol. 45, pp. 213-211.
- MATZARAKIS, Andreas; HELMUT, Mayer y MOSES, Iziomon. Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature, *Int J Biometeorol*, 1999, vol. 43, pp.76-84.
- MAWROMATIS, Constantino. Tensiones y convergencia: el diseño urbano contemporáneo como alternativa a la ciudad dispersa y difusa, *Revista INVI*, 2013, vol. 28, n° 79, pp. 125-163.
- MIDDEL, Ariane; HÄB, Kathrin; BRAZEL, Anthony; MARTIN, Chris y GUHATHAKURTA, Subhrajit. Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones, *Landscape and Urban Planning*, 2014, vol. 122, pp. 16-28.

- MIDDEL, Ariane; CHHETRI, Nalini y QUAY, Ray. Urban forestry and cool roofs: Assessment of heat mitigation strategies in Phoenix residential neighborhoods, *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, vol. 14, pp. 178-186.
- MINVU - Ministerio de Vivienda y Urbanismo. *Manual de elementos urbanos sustentables tomo I: Sustentabilidad en el espacio público y recomendaciones para Chile, versión n° 2*. Santiago: MINVU, 2017.
- MOHAMMED, Bakarman y CHANG, Jae. The influence of height/width ratio on urban heat island in hot-arid climates, *Procedia Engineering*, 2015, vol. 118, pp. 101-108.
- Multispec software (v.9)*. School of Electrical and Computer Engineering Purdue University [en línea]. [Consultado 8 julio 2018]. Disponible en: <https://engineering.purdue.edu/~biehl/MultiSpec/>
- NIKOLOPOULOU, Marialena y LYKOURDIS, Spyros. Thermal comfort in outdoor urban spaces: analysis across different European countries, *Building and environment*, 2006, vol. 41, pp.1455-1470.
- OKE, Timothy. The energetic basis of the urban heat island, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, vol. 108, pp. 1-24.
- PEARLMUTTER, David; BITAN, Arieh y BERLINER, Pedro. Microclimatic analysis of "compact" urban canyons in an arid zone, *Atmospheric Environment*, 1999, vol. 33, pp. 4143-4150.
- RUIZ, María Angélica y CORREA, Érica. Suitability of different comfort indices for the prediction of thermal conditions in tree-covered outdoor spaces in arid cities, *Theoretical Applied Climatology*, 2014, vol. 122, pp. 69-83.
- RUIZ, Angélica; SOSA, Belén; CORREA, Érica y CANTÓN, Alicia. Suitable configurations for forested urban canyons to mitigate the UHI in the city of Mendoza, Argentina. *Urban Climate*, 2015, vol. 14, pp. 197-212.
- RUIZ, Angélica; SOSA, Belén; CORREA, Érica y CANTÓN, Alicia. Design tool to improve daytime thermal comfort and nighttime cooling of urban canyons, *Urban Planning and Landscape*, 2017, vol. 167, pp. 249-256.
- SALAS ESPARZA, María Goretti y HERRERA SOSA, Luis Carlos. La vegetación como sistema de control para las islas de calor urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua, *Hábitat Sustentable*, 2017, vol. 7, n° 1, pp. 14-23.
- SANUSI, Ruzana; JOHNSTONE, Denise; MAY, Peter y LIVESLEY, Stephen. Street orientation and side of the street greatly influence the microclimatic benefits street trees can provide in summer, *Journal of Environmental Quality*, 2016, vol. 45, pp. 167-174.
- SETAIH, Khalid; HAMZA, Neveen y TOWNSHEND, Tim. Assessment of outdoor thermal comfort in urban microclimate in hot arid areas. En: 13th International Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, 2013.
- SHASHUA-BAR, Limor y HOFFMAN, Milo. Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees, *Energy and Buildings*, 2003, vol. 35, n° 1, pp. 61-68.
- SHASHUA-BAR, Limor; PEARLMUTTER, David y ERELL, Erell. The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate, *Landscape and Urban Planning*, 2009, vol. 92, pp. 179-186.
- SICLARI BRAVO, Paola. Desafíos urbanos latinoamericanos y caribeños de cara a los objetivos de desarrollo sustentable y a la nueva agenda urbana, *Revista INVI*, 2017, vol.32, n° 89, pp. 199-211.
- SOSA, Belén; CORREA, Érica y CANTÓN, Alicia. Urban grid forms as a strategy for reducing heat island effects in arid cities, *Sustainable Cities and Society*, 2017a, vol. 32, pp. 547-556.
- SOSA, María Belén; CORREA, Érica y CANTÓN, María Alicia. Influencia de la morfología urbana sobre la habitabilidad térmica exterior en una ciudad de clima árido, *Hábitat Sustentable*, 2017b, vol. 7, n° 1, pp. 44-53.
- STOCCO, Susana; CANTÓN, María Alicia y CORREA, Érica. Design of urban green square in dry areas: Thermal performance and comfort, *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, n° 14, pp. 323-335.
- SUN, Shibo; XU, Xiyan; LAO, Zhaoming; LIU, Wei; LI, Zhandong; HIGUERAS, Ester; HE, Li y ZHU, Jianning. Evaluating the impact of urban green space and landscape design parameters on thermal comfort in hot summer by numerical simulation, *Building and Environment*, 2017, vol. 123, pp. 277-288.
- TALEGHANI, Mohammad; KLEEREKOPER, Laura; TENPIERIK, Martin y VAN DEN DOBBELSTEEN, Andy. Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands, *Building and Environment*, 2015, n° 83, pp. 65-78.
- TUMINI, Irina. *El microclima urbano en los espacios abiertos. Estudio de casos en Madrid*. Tesis doctoral inédita, Universidad Politécnica de Madrid, 2013.
- TUMINI, Irina y PÉREZ, Alexis. Aplicación de los sistemas adaptativos para la evaluación del confort térmico en espacios abiertos, en Madrid, *Hábitat Sustentable*, 2015, vol. 5, pp. 55-67.
- TUMINI, Irina; HIGUERAS, Ester y BAERESWYL RADA, Sergio. Urban microclimate and thermal comfort modelling: Strategies for urban renovation, *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 2016, vol. 1, n° 7, pp. 1-16.
- UN-HÁBITAT. *The relevance of street patterns and public space in urban*, 2013.
- UN-HÁBITAT. *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2016*.
- VICH, Alberto; LOÓPEZ RODRÍGUEZ, Mariela; LAURO; Carolina y VACCARINO, Emilce. Proposals for Flashflood Management in Western Argentina. Case Study: The Metropolitan Area of Greater Mendoza, *Urban Studies* [en línea], 2014, vol. 2, pp. 37-48. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/cus.2014.21004>

VILLEGAS, Ernesto; CIFUENTES, Alejandra; CONTRERAS, Diana y FERNÁNDEZ, Libardo. Ordenamiento territorial como instrumento, para la zonificación ambiental a través de la Estructura Ecológica Principal, como apoyo a la formulación de los POTs y los POMCAS en Colombia, *Revista de Tecnología*, 2015, vol. 14, n° 2, pp. 49-76.

WANG Jiong y OUYANG, Wanlu. Attenuating the surface Urban Heat Island within the Local Thermal Zones through land surface modification, *Journal of Environmental Management*, 2016, vol. 187, pp. 239-252.

