



Revista
Hábitat
Sustentable

ISSN 0719-0700
Vol. 9 N°. 2
Diciembre
2019



UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO



**Revista
Hábitat
Sustentable**

ISSN 0719-0700
Vol. 9 N°. 2
diciembre
2019



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

EDITORIA RESPONSABLE:

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

PRODUCTORA EDITORIAL:

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

CORRECCIÓN DE ESTILO:

Dra. OLGA OSTRIA REINOSO, Departamento Estudios Generales

GESTIÓN INFORMÁTICA:

KARINA LEIVA / Universidad del Bío-Bío, Chile

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

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

CONSEJO EDITORIAL:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

TRADUCCIONES:

THERESA ST JOHN, ABSTRACT

CECILIA AGUAYO QUEZADA, ARTÍCULOS

DIRECTOR DE ARTE Y DIAGRAMACIÓN:

IGNACIO A. SÁEZ ARANEDA

FOTOGRAFÍA PORTADA:

Claudia Muñoz / 2019 Villa San Pedro de la Paz, Concepción, Chile

DIRECCIÓN:

Avda. Collao 1202

CP: 4081112. Concepción, Chile

TEL.(56-41)3111409

Revista HS indexada en Emerging Source Citation Index de Clarivate Analytics, SciELO, ERIHPLUS, Latindex Catálogo 2.0, Avery Index, Dialnet, Redib, DOAJ y REBIUN, y ARLA (Asociación Latinoamericana de Revistas de Arquitectura). HS se adhiere a la Declaración de San Francisco Sobre la Evaluación de la Investigación (DORA).

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

Revista Hábitat Sustentable es editada por el Facultad de Arquitecturas Construcción y Diseño de la Universidad del Bío-Bío, es financiada por el Fondo de Publicaciones Periódicas de la Vicerrectoría Académica, la Dirección General de Investigación, Desarrollo e Innovación y la Dirección de Postgrado de la Universidad del Bío-Bío.



05 EDITORIAL

Dra. Claudia Muñoz Sanguinetti

06 HABITAR EN UNA ZONA DE SACRIFICIO. ANÁLISIS MULTIESCALAR DE LA COMUNA DE PUCHUNCAVÍ

Sandro Maino Ansaldo, Nina Hormazabal Poblete, Magdalena Vergara Herrera, Matias Vergara Herrera

16 OASIS URBANO: UNA PROPUESTA DE ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO PARA EL METRO DE SANTIAGO

Esteban Omar Bugueño Lara

30 EVALUACIÓN DEL MEJORAMIENTO DEL CONFORT TÉRMICO CON LA INCORPORACIÓN DE MATERIALES SOSTENIBLES EN VIVIENDAS EN AUTOCONSTRUCCIÓN EN BOSA, BOGOTÁ

Franz Calderon Uribe

42 POTENCIAL DE ENFRIAMIENTO GEOTÉRMICO PARA EDIFICACIONES EN ZONA ÁRIDA

Mario Cúnsulo, Alejandra Kurbán, Santiago Tosetti, Eduardo Montilla

52 METODOLOGÍA PARA ELABORAR UNA CARTOGRAFÍA REGIONAL Y APLICAR ESTRATEGIAS BIOCLIMÁTICAS SEGÚN LA CARTA DE GIVONI

Fernando da Casa Martín, Flavio Celis D'Amico, Ernesto Echeverría Valiente

64 COSTE ÓPTIMO Y VIABILIDAD ECONÓMICA DE LA REHABILITACIÓN ENERGÉTICA DE VIVIENDAS EN ESPAÑA

Pablo Fernández Ans

78 EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL MEDIANTE LA INTRODUCCIÓN DE INDICADORES A UN MODELO BIM DE VIVIENDA SOCIAL

María del Pilar mercader Moyano, Patricia Edith Camporeale, Elías Cózar-Cózar

94 INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMÁTICAS SOCIO-PRODUCTIVAS LOCALES. CASO DE ESTUDIO: CONCORDIA, ENTRE RÍOS-ARGENTINA

Valeria Fenoglio

EDITORIAL

Han pasado casi seis meses de la publicación de nuestro último número, en junio 2019, cuando nada hacía presagiar el escenario que vivimos hoy en el país. Un Chile convulsionado, que experimenta una explosión social sin precedente, resultado de una crisis multidimensional e histórica originada principalmente en una abismante desigualdad social, económica y ambiental: pilares fundamentales de los principios de la sustentabilidad.

La sociedad chilena exige cambios profundos en la manera en que hemos venido desarrollándonos como país. En ese contexto y producto de las visibles demandas y movilizaciones sociales, la clase política chilena ha suscrito un Acuerdo por la Paz Social y la Nueva Constitución, impulsando para el mes de abril del año 2020 un plebiscito, el cual permitiría democráticamente decidir si Chile quiere o no una nueva Constitución. Ello señalará indudablemente un hito histórico: la posibilidad de repensar nuestra Carta Fundamental, tema impensable hace seis meses atrás y que relevo aquí como uno de los acontecimientos más importantes de los últimos 30 años, desde el retorno a la democracia.

Este escenario que trae consigo altas expectativas de avanzar sustancialmente en temas profundos de sustentabilidad, obliga a referirse a los paupérrimos resultados de la tan esperada COP25; la cumbre más importante de acción climática organizada y presidida en esta ocasión por Chile, la cual más allá de los alcances conocidos mediáticamente, no logró acuerdos relevantes en la materia y evidenció la falta de una mayor ambición en mitigación, adaptación y financiación para combatir la inminente crisis climática que nos afecta globalmente. Si bien es cierto se consiguieron ciertos acuerdos -mejor dicho, declaraciones voluntarias más exigentes-, para una importante parte de la comunidad científica, académica y civil, los resultados de la esperada cumbre constituyen un franco retroceso, que nos sitúa en un nivel de avances comparable al que se poseía previamente al Acuerdo de París, del año 2015. De acuerdo a ello, no se vislumbran acciones concretas a corto plazo para la reducción de 1,5°C del aumento de la temperatura global, marco en el que una de las acciones más esperadas y controversiales

era la aprobación de reglamentos sobre los mercados de carbón, como asimismo mecanismos tácitos para la financiación para pérdidas y daños vinculantes a la crisis climática. En suma, habrá que esperar las propuestas y resultados del año 2020 en Glasgow, encuentro para el cual ya sobre 80 países, entre ellos Alemania, Francia, España y UK, se han comprometido a presentar planes más "duros", pero en el que continúan ausentándose las señales esperadas de China, EEUU, India y Rusia, naciones que en conjunto aportan más de 55% de las emisiones de GEI.

Frente a este desafiante panorama local y global, los invitamos a no caer en tal vez justificados pesimismos sino, por el contrario, a persistir en la aportación desde nuestras veredas a la construcción de una sociedad más equitativa en todas las dimensiones, en donde el hábitat y ambiente construido deben conjugarse armónicamente.

Cierro esta editorial presentando un nutrido y variado repertorio de ocho artículos de autores iberoamericanos, provenientes de Chile, España, Colombia y Argentina, los cuales fueron seleccionados rigurosamente y representan sólidas aportaciones al conocimiento para el desarrollo sostenible.

Finalmente, expreso, como ya es costumbre, mis sinceros agradecimientos a todos(as) los autores(as) y revisores que han confiado en HS y también al compromiso permanente del equipo editorial: Dra. Olga Ostría en su rol de Correctora de Estilo, Ing. Jocelyn Vidal como Productora Editorial, Ing. Karina Leiva en Soporte Informático y Arq. Ignacio Sáez en Diagramación.

Claudia Muñoz Sanguinetti
Doctora en Arquitectura y Urbanismo
Profesora Asociada Dpto. Ciencias de la construcción
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-4859-478X>
clmunoz@ubiobio.cl







Recibido 15/11/2019
Aceptado 21/12/2019

HABITAR EN UNA ZONA DE SACRIFICIO: ANÁLISIS MULTIESCALAR DE LA COMUNA DE PUCHUNCAVÍ

LIVING IN A SACRIFICE ZONE: A MULTI-SCALE ANALYSIS OF PUCHUNCAVÍ DISTRICT, CHILE

Nina Hormazabal Poblete
Doctora en Filosofía
Docente asociada, Coordinadora Laboratorio Arquitectura Bioclimática
Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-7607-7675>
nina.hormazabal@usm.cl

SANDRO MAINO ANSALDO
Doctor en Historia y Teoría de la Arquitectura
Jefa de Carrera Departamento de Arquitectura
Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile
<https://orcid.org/0000-0003-3159-9231>
sandro.maino@usm.cl

MAGDALENA VERGARA HERRERA
Arquitecta Independiente
Puchuncaví, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-6089-630X>
magdalena.evh@gmail.com

MATIAS VERGARA HERRERA
Magister in Public Policy
Universidad de Playa Ancha, Valparaíso, Chile
<https://orcid.org/0000-0001-6011-6206>
matias.vh@icloud.cl

RESUMEN

El presente artículo expone los impactos que el desarrollo del Complejo Industrial Ventanas (CIV) ha tenido en la comunidad de Puchuncaví, entendiendo este como origen y causa de la crisis socioambiental de la denominada "Zona de Sacrificio". A partir de autores como Lefebvre (2013) y Augé (1993) y sus planteamientos sobre la coproducción del espacio y el no lugar, se realiza un análisis multiescalar que persigue sentar las bases para la discusión y argumentación de una planificación basada en la comunidad y sus experiencias. Consecutivamente, se propone una metodología consistente en un taller participativo con miembros de la comunidad, cuyo objetivo es identificar, reconocer y caracterizar tanto el habitar en esta zona, como también los impactos que el desarrollo industrial ha tenido en el territorio. En definitiva, se observa que los actuales Instrumentos de Planificación Territorial perpetúan las lógicas de reproducción de la Zona de Sacrificio, impactando negativamente en la identidad territorial de la población de Puchuncaví, identidad que es validada por la comunidad. Finalmente, se abre la discusión sobre la necesidad de nuevas racionalidades que impliquen la revaloración del territorio, y su consiguiente reapropiación, como lógicas catalizadoras de propuestas productivas divergentes a la que hoy se encuentra materializada en el CIV.

Palabras clave

contaminación ambiental, planificación territorial, identidad comunitaria, zona de sacrificio.

ABSTRACT

This article presents the impact the development of the Ventanas Industrial Complex (VIC) has had on the Puchuncaví (Chile) community. The VIC is understood to be the origin and cause of the socio-environmental crisis of this so-called Sacrifice Zone. Based on references such as Lefebvre (2013) and Augé (1992), and their approaches to the co-production of space and non-place, a multi-scale analysis is carried out that seeks to lay the foundations for the discussion and argumentation of planning based on the community and its experiences. Subsequently, a methodology consisting of a participatory workshop with members of the community is proposed that aims to identify, distinguish and characterize living in this area, in addition to the impact industrial development has had on the territory. The conclusions reveal that the existing Territorial Planning Regulations perpetuate the logic behind the development of the Sacrifice Zone. This negatively impacts the regional identity of the residents of Puchuncaví, which is validated by the community. Finally, the article opens the discussion on the need for new rationales that imply the (re)valuation -and the consequent (re)appropriation- of the territory as catalytic logics for productive proposals that diverge from that currently embodied in the VIC.

Keywords

environmental pollution, territorial planning, community identity, sacrifice zone.

INTRODUCCIÓN

La comuna de Puchuncaví ha sido históricamente conocida por su actividad pesquera, agrícola y ganadera, su eslogan "dónde el campo se junta con el mar" refleja su condición geográfica y la relación histórica de sus actuales 18.546 habitantes (Biblioteca Congreso Nacional, 2017) con el territorio. No obstante, desde los años 60s Puchuncaví se ha visto envuelta en un contexto donde su pasado histórico como zona agrícola, ganadera, balnearia y pesquera se desvanece ante el desarrollo de una zona industrial dirigida centralmente por el Estado de Chile (Badal, 2014). El proyecto productivo nacional del Complejo Industrial de Ventanas (CIV) destruye la vida local en nombre del desarrollo y las aspiraciones de crecimiento económico (Shade, 2015, p. 2) (Figura 1). El componente histórico de la degradación ambiental se ha traducido en un crecimiento constante del CIV y, en consecuencia, de las externalidades de sus procesos productivos; principales y más graves contaminantes del suelo, agua, aire y tierra del territorio y de la precarización de la salud de la población (v.g. Salmani-Ghabeshi *et al.*, 2016; Poblete, Macari y Rodríguez, 2015; González, Mueña, Cisternas y Neaman, 2008; Sánchez, Romieu, Ruiz, Pino y Gutiérrez, 1999). Debido a lo anterior, es que el concepto de Zona de Sacrificio toma relevancia dado que, independiente de sus acepciones, conceptualmente permite enmarcar, imaginar, identificar y clasificar un lugar con el propósito de cuestionar actividades productivas percibidas como destructivas (Holifield y Day, 2017, p. 269).

Específicamente, en ese contexto puchuncavino, contexto distópico con características nacionales dispares de precarización socioambiental, las comunidades reaccionan a través de una "nueva racionalidad eco-socio-ambiental fundada en sistemas comunitarios y colectivos que buscan recuperar la reciprocidad e interdependencias en las relaciones entre naturaleza y cultura" (Bolados, 2016, p. 123). Sin embargo, considerando dichos elementos como epistemológicamente divergentes a los estructurantes de una Zona de Sacrificio, es pertinente formularse una pregunta relevante: ¿Qué cabida poseen esas visiones en el contexto institucional formal? Para responder dicha pregunta, en este artículo se elabora primero una introducción a la problemática definida bajo la existencia de la Zona de Sacrificio. Luego, se presentan los elementos estructurantes de la planificación territorial actual, y se discute cómo esta promueve y perpetúa la existencia de la Zona de Sacrificio en Puchuncaví, a partir de un marco referencial que respalda la exploración de este caso de estudio y que se basa en teorías sobre la coproducción del espacio.

Siguiendo a Lefebvre (2013) y Augé (1993), la metodología empleada en la investigación aquí expuesta consistió en la realización de un taller de mapeo participativo y colectivo que buscó identificar, reconocer y caracterizar, por una parte, las experiencias personales del habitante de esta zona y, por otra, los impactos que el desarrollo industrial ha



Figura 1. Localidad de Las Ventanas, Comuna de Puchuncaví, bahía de Quintero. Fuente: Fotografía de los autores.

tenido en el territorio. Finalmente, se concluyó que la Zona de Sacrificio se sirve de los Instrumentos de Planificación Territorial (IPT) como mecanismos institucionales para su desarrollo y perpetuación. La no divergencia del proyecto productivo caracterizado como Zona de Sacrificio logra explicarse, en parte, a través de las observaciones de la investigación que logran enmarcar una visión territorial local que no encuentra cabida para la participación institucional del territorio, lo que en consecuencia promueve, debido a las características productivas del CIV, la devastación territorial vista como precarización de la población y del ecosistema que la sustenta.

ZONA DE SACRIFICIO

La existencia de la Zona de Sacrificio de Puchuncaví no constituye un hecho aislado. En Chile, es posible contar cinco de ellas: Tocopilla, Mejillones, Huasco, Coronel y Quintero-Puchuncaví (Instituto Nacional de Derechos Humanos, 2018). En ellas se albergan 27 de las 28 termoeléctricas del país -20% de la capacidad energética instalada (CNE, 2019)-, las que generan a nivel nacional el 88% de las emisiones de material particulado (MP), 91% de NOx, entre otras (Chile Sustentable, 2018). Además de las termoeléctricas, hay otras industrias que incrementan las emisiones nocivas para estas zonas, evidenciando el modelo productivo chileno basado en la explotación de ecosistemas y sus recursos (Terram, 2016). Entre los sectores productivos que se implantan en estas zonas, el principal es el minero, siguiéndole la construcción (cementeras), el portuario, el energético (fósil) y el agropecuario intensivo. La degradación ambiental y social consecuente de la producción industrial provoca un conflicto latente, cuya problemática alrededor de las Zonas de Sacrificio es transversal al modelo productivo nacional y, por extensión, al modelo de desarrollo chileno.

Entender las Zonas de Sacrificio como productos de un modelo de desarrollo específico, permite explorar componentes estructurales del mismo y, por ende, visibilizar ciertos elementos concretos que son capaces de generar, perpetuar o promover dichas zonas en Chile. Investigaciones que han explorado las Zonas de Sacrificio desde esa mirada, las contextualizan en Latinoamérica en un marco particular de planificación territorial caracterizada como planificación territorial neoliberal (v.g. Tellez, Name y Veríssimo, 2017; Bolados, 2016; Espinoza, 2015; Shade, 2015), es decir, una planificación diseñada desde lógicas de liberación de mercados que busca acentuar procesos masivos de industrialización del capital basado en una narrativa de aprovechamiento de las ventajas comparativas del país (Piñera, 2018; Bachelet, 2014). Adicionalmente, y desde un enfoque global, Klein (2014) explica el origen de las Zonas de Sacrificio, caracterizándolas también como un fenómeno influenciado por el proceso contemporáneo de globalización del capital alineado y convergente con los instrumentos formales de planificación. Para el caso de Puchuncaví, esto tiene implicancias socioambientales concretas, las que se originan y visualizan en el crecimiento histórico del CIV regulado a través de los Instrumentos de Planificación Territorial (IPT).

En ese sentido, en el contexto chileno, comprender la producción de las Zonas de Sacrificio implica, entre otras cosas, estudiar los elementos institucionales que permiten su existencia, en otras palabras, los elementos del modelo de desarrollo neoliberal chileno que han demostrado incrementar el nivel de explotación medioambiental. Dichos elementos se articulan, según la literatura, a través de políticas públicas que incentiven la inversión de capital –nacional e internacional– en sectores extractivos a través de la (des)regulación medioambiental e IPTs que priorizan la renta a la producción (Bolados, 2016; Carruthers, 2001; Altieri y Rojas, 1999). Es en estos últimos que este artículo busca centrar su atención dado su rol como vehículos gatillantes de procesos de urbanización y globalización del territorio determinantes para el sector industrial y, por consiguiente, determinantes también en el conflicto socioambiental de Puchuncaví como Zona de Sacrificio. Específicamente, se explorará en este artículo la problemática alrededor de los IPTs como puentes para una visión específica del territorio que ha logrado reproducir, desde hace ya 60 años, la degradación socioambiental en Puchuncaví.

Por una parte, el Estado por medio del ordenamiento territorial responde a las lógicas del mercado, permitiendo la instalación de empresas y la degradación ambiental del territorio donde se instalan, por sobre el cuidado del ecosistema y las comunidades que lo habitan. Las consecuencias de los impactos ambientales no distinguen clases sociales, tal como Svampa y Viale mencionan, son los sectores vulnerables de la población los que sufren de forma más desproporcionada los daños ambientales (2014, p. 83); impactos que, en el mundo de la economía, son considerados como externalidades negativas de



Figura 2. Esquema Instrumentos de Planificación Territorial. Elaboración del autor a partir de Esquema IPT. Fuente: Consultora PRO-Ciudad.

las empresas. Por otra parte, es importante recalcar que el problema de la injusticia ambiental relacionada a las Zonas de Sacrificio es un hecho irrefutable y radica en el estado de la legislación ambiental chilena actual (Infante, 2016), cuyos instrumentos regulatorios aplicables a distintas escalas del territorio se hallan aún en un estado muy incipientes respecto de la inclusión de participación en la toma de decisiones, oposición y negociación por parte de las comunidades vulnerables, para influir en los IPTs actuales. Por ende, hoy en día estos instrumentos propician la devastación medioambiental y la violación de los derechos fundamentales de los habitantes que viven en situación de pobreza y extrema pobreza en territorios vulnerables.

ORDENAMIENTO TERRITORIAL

Los Instrumentos de Planificación Territorial (en adelante IPT) (Figura 2) tienen un orden de jerarquía entre sí, lo que definirá el rango de acción que estos puedan tener en el territorio en donde se encuentren. Lo que definen los IPT son las zonificaciones –en el caso de los instrumentos mayores, se tratará de “macro-zonificaciones”–, a través de las cuales se define el uso de suelo y, por lo tanto, aquello que se puede o no desarrollar en el lugar; ya sean proyectos industriales, residenciales, áreas verdes, etc.

Los IPT aplicados en la Comuna de Puchuncaví son los siguientes:

1. Plan Regulador Metropolitano De Valparaíso (PREMVAL)
2. Plan Regulador Borde Satélite Costero Norte (PRI-ZBSCN)
3. Plan Regulador Comunal De Puchuncaví (PRC)
4. Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC)

COPRODUCCIÓN DEL ESPACIO

Lefebvre (2013) afirma que el concepto de *espacio* se ha definido desde distintas áreas del conocimiento (geografía, economía, demografía, sociología, ecología, política, comercio, etc.). En el ámbito del urbanismo y la arquitectura el espacio es regulado a través de diversos políticas e instrumentos de planificación establecidos por la ordenanza y las legislaciones (Infante, 2016) lo que, en consecuencia, determina a su vez la construcción de los espacios que habitamos.

Lefebvre define tres espacios relacionados con quien lo habita: el *espacio mental*, referido a lógicas y abstracciones formales; el *espacio físico*, a lo práctico, sensible y la percepción de la naturaleza; y el *espacio social* o el espacio de la interacción humana. El *espacio social* es producido en diferentes escalas por las fuerzas sociales y políticas estatales, es múltiple en su número yuxtaponiéndose e interpenetrándose. Es un espacio abstracto, de la propiedad y el desarrollo económico, que se apoya en vastas redes bancarias, comerciales e industriales, parte de una red económica y productiva que fragmenta el trabajo. Este espacio abstracto se ha superpuesto al espacio construido previamente, espacio de quienes han habitado el territorio, viéndose así obligados a vivir bajo un sistema que desarrolla proyectos en pos de una economía global, invisibilizando o eliminando la economía local.

Uno de los componentes de esta red económica son los polígonos industriales, zonas que para los efectos de esta investigación han sido categorizadas como *no lugares* (Augé, 1993). En oposición al *lugar antropológico*, el *no lugar* se define como un espacio sin identidad, sin relación y sin historia. Los polígonos industriales son *no lugares*, impersonales, no apropiables, donde no es posible la alteración pues son espacios de mero tránsito, donde difícilmente se pueden generar sentimientos de pertenencia y relaciones con los otros sujetos que también son transeúntes. Pero la posibilidad del *no lugar* está siempre presente en cualquier *lugar*, pues ambos se entrelazan e interpenetran.

Las disociaciones entre los múltiples espacios que cohabitan en un *lugar* y *no lugar*, en el caso aquí expuesto, entre el espacio del polígono industrial y el espacio de la cotidianidad, puede ser analizado a través de la *transducción* de Lefebvre, una operación intelectual que busca comprender la realidad por los hechos y sus posibilidades (Lefebvre, 2013, p. 97). La *transducción* se propone desde tres tipos de espacio: el *espacio producido*, que corresponde a construcciones abstractas y técnicas impuestas; el *espacio vivido*, sujeto a las construcciones abstractas y simbologías; y el *espacio percibido*, referido a las prácticas cotidianas y como vínculo entre los dos espacios mencionados anteriormente (Harvey, 1990). De esta manera, se incorporarían en el análisis urbano y territorial a la dimensión física y material, las dimensiones subjetivas e imaginativas (Lindón, 2007). Por su parte,

Gudynas propone una *ecología social* y plantea “una articulación entre las diferentes formas de conocimiento, incluyendo experiencias sensibles o subjetivas. Las diferentes percepciones y valoraciones de las personas sobre su entorno pueden sumarse entre sí, apelando a procedimientos interactivos de encuentro y diálogo” (Gudynas, 2004, p. 129), para definir de una forma más concreta y latinoamericanista los espacios abstractos de Lefebvre.

METODOLOGÍA

MÉTODO

El estudio develó que para comprender el habitar con relación al desarrollo industrial es necesario utilizar una metodología mixta. Para analizar el proceso y delimitar el estudio al área urbana y arquitectónica es que se buscan variables de estudio que, desde una perspectiva cuantitativa se asocien con datos específicos y, desde una perspectiva cualitativa, con información que deriva de las voces quienes habitan el territorio en estudio. Desde una lógica integral, en el sentido de asumir la realidad contextual como un campo de estudio complejo, diverso y dinámico, es que las metodologías se complementan.

ESTUDIO POR ESCALAS

La investigación persigue vincular el estudio del desarrollo industrial con el desarrollo comunal. En ese marco, se definen los impactos en el habitar sistematizando el acercamiento a la realidad en tres escalas: MACRO-Escala, MESO-Escala y MICRO-Escala, las cuales responden a los tres espacios propuestos por Lefebvre en la teoría de la *transducción*. Cada escala se asoció, a su vez, con un Instrumento de Investigación, la MACRO-Escala, con la búsqueda bibliográfica en relación al Ordenamiento Territorial y la Contaminación (nivel Comunal, ligado al espacio producido), la MESO-Escala con una actividad diseñada denominada *Maqueteo/Mapeo Colectivo* (nivel Comunidad, ligado al espacio vivido), y la MICRO-Escala con cuestionarios individuales (nivel Individual, ligado al espacio percibido). Específicamente, para cada escala se trabaja con grupos determinados en cuanto al número de personas: para la MESO-escala se trabajó con dos grupos de 10 personas, con informantes claves entre ellos, y para la MICRO-escala se aplicó un cuestionario a 83 personas, para el diagnóstico socioambiental se trabajó con grupos de 10 personas de 4 escuelas rurales diferentes, entre ellas, “La Quebrada”. En esta publicación se presentará, en concreto, la MESO-Escala en detalle.

OBJETIVO DEL INSTRUMENTO

El objetivo del *Maqueteo/Mapeo Colectivo* es construir el sentido del habitar comunal desde una mirada colectiva a partir del reconocimiento territorial y del desarrollo económico comunal.

En esa línea, se desarrolló una metodología consistente en un reconocimiento territorial de los lugares antropológicos, seguido de la descripción del desarrollo comunal (pasado-presente, actividades productivas) y, por último, del estudio del *no lugar* (Augé, 1993). Con relación al no lugar, se utilizó la Guía de Mapeo Colectivo de los Iconoclasistas (Ares y Risler, 2013), rescatando parte de la simbología propuesta para la actividad y reconociendo los impactos provocados en el territorio por el desarrollo industrial.

La actividad consiste en tres partes que a continuación se describen.

1. Reconocimiento territorial.

Al comenzar el taller se plantea un ejercicio cartográfico que consiste en que cada participante identifica y sitúa en un mapa del territorio sus zonas, espacios, rutas, lugares, itinerarios y todos los lugares de su agrado y también, los lugares que le producen angustia e incomodidad. La suma de estos puntos muestra de qué manera cada individuo define y caracteriza el territorio que luego se mapeará colectivamente. (Ares y Risler, 2013, p. 20).

[PASO 1] *Aproximación a la Maqueta*. Situar su lugar de residencia y un lugar significativo en la comuna (c/ participante).



[PASO 2] *Hitos Geográficos*. A partir de los hitos geográficos que Augé propone, se caracteriza el territorio a través de la identificación por parte de los participantes de los puntos vinculados a los siguientes hitos:



2. Desarrollo comunal

[PASO 3] *Actividades Productivas del PASADO* y [PASO 4] *Actividades Productivas del PRESENTE*. La segunda parte trata de una comparación entre lo que fue la comuna y lo que es actualmente, para lo cual se les presenta a los participantes las actividades productivas identificadas previamente, y las fichas siguientes:



3. No lugar.

[PASO 5] *Impactos negativos del Desarrollo Industrial*. Se propone estudiar los impactos que ha tenido el desarrollo industrial y se presentan los posibles impactos que éste ha tenido en la comuna. Los impactos se identifican con estos iconos:



METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

El Instrumento *Maqueteo Colectivo* se analizó cuantitativa y cualitativamente. El primer análisis consideró tres pasos: 1. Transcripción de puntos y recorridos resultantes de la actividad desde la maqueta/plano base al plano comunal (manteniendo la cantidad y posición de los puntos señalados) (Figura 3). 2. Contabilización de puntos (Figuras de la 4 a la 10) y recopilación en tablas para cuantificar lo obtenido. 3. Determinación de áreas que involucraran los puntos señalados por capas.

Por otro lado, el análisis cualitativo consideró la transcripción y análisis de las *Notas de Campo* en función del registro realizado de la actividad y clasificación de relatos de los participantes, dando cuenta de sus percepciones sobre el habitar al momento de situar los puntos propuestos. Esta actividad se realizó bajo tres categorías: reconocimiento territorial (lugar antropológico), desarrollo comunal (actividades productivas) y desarrollo industrial (no lugar). En la sección siguiente se incluyen transcripciones literales de los relatos más relevantes expresados por los participantes.

La actividad descrita se aplicó en dos contextos diferentes; el primero en el marco de la investigación que originó el

diseño de la actividad¹, en la cual se analizó la comuna por medio de la maqueta comunal con dos grupos de 10 personas cada uno. En una segunda instancia se aplicó al Diagnóstico Socioambiental del entorno local en el marco del Proceso de Certificación de Sello Escuelas Sustentables de la Comuna de Puchuncaví, en donde se analizaron las localidades en las que se encuentran las escuelas².

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en ambas actividades, según las etapas definidas en la metodología, se compararon con el objetivo de relevar las repercusiones en las percepciones de los participantes.

RECONOCIMIENTO TERRITORIAL

Teniendo como marco de análisis la teoría de Augé (1993) sobre los lugares antropológicos, los participantes identificaron su lugar de residencia y los lugares significativos [PASO 1], realizando una primera aproximación a la maqueta/mapa con el fin de ubicar los hitos geográficos correspondientes al territorio de análisis [PASO 2].

Las respuestas obtenidas en cuanto al reconocimiento territorial fueron acompañadas por explicaciones de los participantes respecto al apego y valoración del territorio, en las cuales se manifestaban vínculos provenientes de la memoria individual y colectiva. Los lugares significativos identificados decían relación con: la memoria, la belleza del lugar y la valoración de la flora y fauna existente en la comuna. A continuación, se citan frases de los participantes que reflejan lo antes mencionado: “Las caletas, vengo de una familia de pescadores, y es patrimonio que está olvidado”, “Localidad de Los Maquis por la historia familiar, crianza y toda la vida ahí”; “Las Ventanas, lugar bello para ir caminando cerca de la casa”.

Los hitos geográficos [PASO 2] identificados permiten dar cuenta de una valoración territorial a nivel de localidad, en los que resalta la cantidad y variedad de puntos situados, además de los aspectos esenciales del habitar, con relación a la vida cotidiana y al imaginario colectivo. Esto hace posible reconocer en los resultados líneas de diseño urbano capaces de evidenciar posibilidades productivas potenciales de la economía local y, por ende, de carácter endógeno, vinculándolas a una planificación urbana que incluya el habitar y la vida cotidiana como base del desarrollo comunal.



Figura 3. Registro maqueteo colectivo. Fuente: Fotografía de los autores.

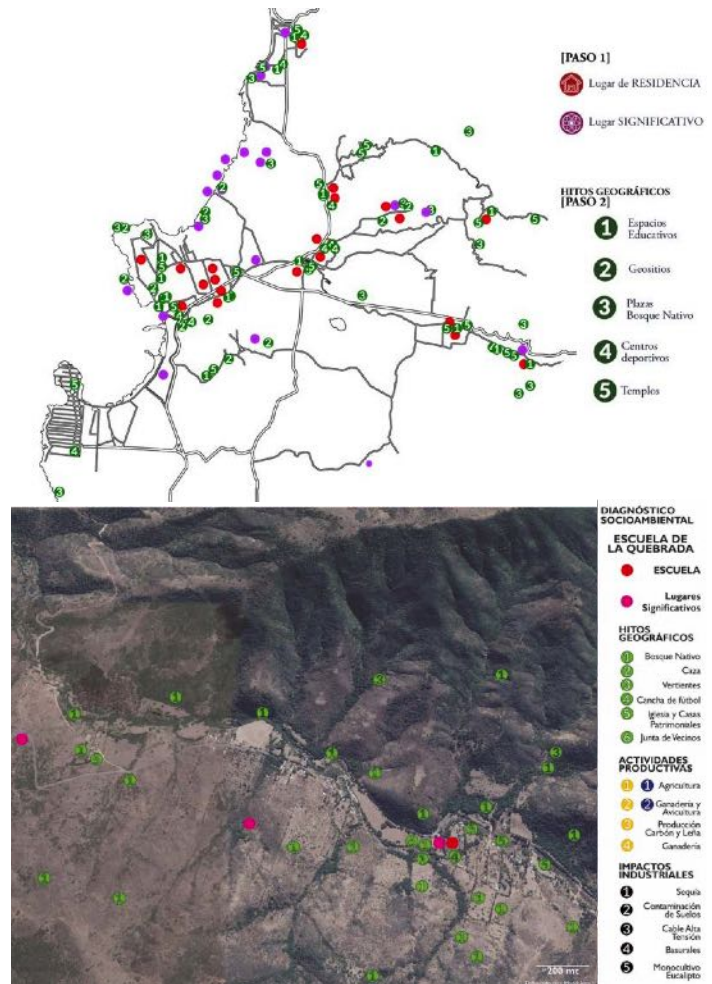


Figura 4 y 5. Pasos 1/2. Maqueteo Colectivo - Comuna de Puchuncaví. Fuente: Elaboración de los autores.

[1] VERGARA, Magdalena. *Perjuicio en la Comuna de Puchuncaví: crisis territorial*. Tesis de pregrado, UTFSM, Valparaíso, 2019.

[2] Este diagnóstico fue llevado a cabo en conjunto con la Fundación Superación de la Pobreza, junto a la ONG Puchuncaví Nativo y respaldada por la Ilustre Municipalidad de Puchuncaví, como actividad de campo realizada durante el proceso de la tesis (idém).

DESARROLLO COMUNAL.

[PASO 3] Identificación de actividades productivas del pasado.

Continuando la metodología con el [PASO 3], los participantes describieron el pasado como una época de abundancia productiva, reconociendo una identidad territorial común, basada en las actividades productivas que creaban cercanías y relaciones entre las localidades, uniéndose territorial y geográficamente. Estas actividades eran parte de la vida cotidiana de quienes habitaban el territorio, debido a las prácticas relacionadas con ellas, i.e. trilla, arreo. Así, por ejemplo, se relató: "Hasta el año 1971 se producía en cantidades industriales (sacos de lentejas, arvejas, porotos y trigo); "Antiguamente, en la tarde, los animales eran parte de la rutina, volvían a las casas por lo que los caminos se llenaban de ellos".

Comparativamente, el desarrollo del CIV ha sido acelerado en relación al desarrollo comunal, con una dinámica distinta, lo que condujo a un deterioro del medioambiente en la comuna, Ello ha afectado las actividades productivas que conectaban a las distintas localidades. Repercutiendo, por tanto, en la identidad territorial a nivel comunal (fragmentación territorial) y en el habitar (vida cotidiana), lo que se puede apreciar en los testimonios que siguen: "Con la instalación de la primera chimenea el humo que se liberaba se encajonaba en el valle y todas las localidades fueron muriendo, se llenaba con humo azul"; "Con la llegada de la industria, los pescadores no quisieron trabajar en la industria porque ganaban más en el mar, con el paso del tiempo se quedaron sin recursos"; "Hasta los 70's los agricultores no pudieron cultivar más (Maitenes)".

[PASO 4] Actividades productivas del presente.

Si bien tanto la agricultura como la ganadería y la pesca disminuyeron significativamente en toda la comuna, hoy en día aún se practican en recintos más reducidos y próximos a las localidades, como se constata en los siguientes tres relatos de los participantes: "Es un error decir que la agricultura está muerta"; "Proceso climático sumado al proceso de la industrialización ha sido una sumatoria. No hay agua para regar, aunque no hubiese industrias, no hay agua para riego por lo que no podríamos tener el mismo nivel de producción que teníamos antes"; "Última data de PRODESAL (ganaderos) se contabilizaron en cabeza de ganado 17.000 (en toda la comuna), antes había el doble."

NO LUGAR

Al comparar las actividades productivas del presente con los impactos del desarrollo industrial, se advierte como estos amenazan lo existente, repartidos por todo el territorio (Figuras 6 y 7), abarcando la mayor superficie de todas las localidades. Por lo mismo es que algunos íconos no se ubicaron en la maqueta, debido a la generalización a nivel

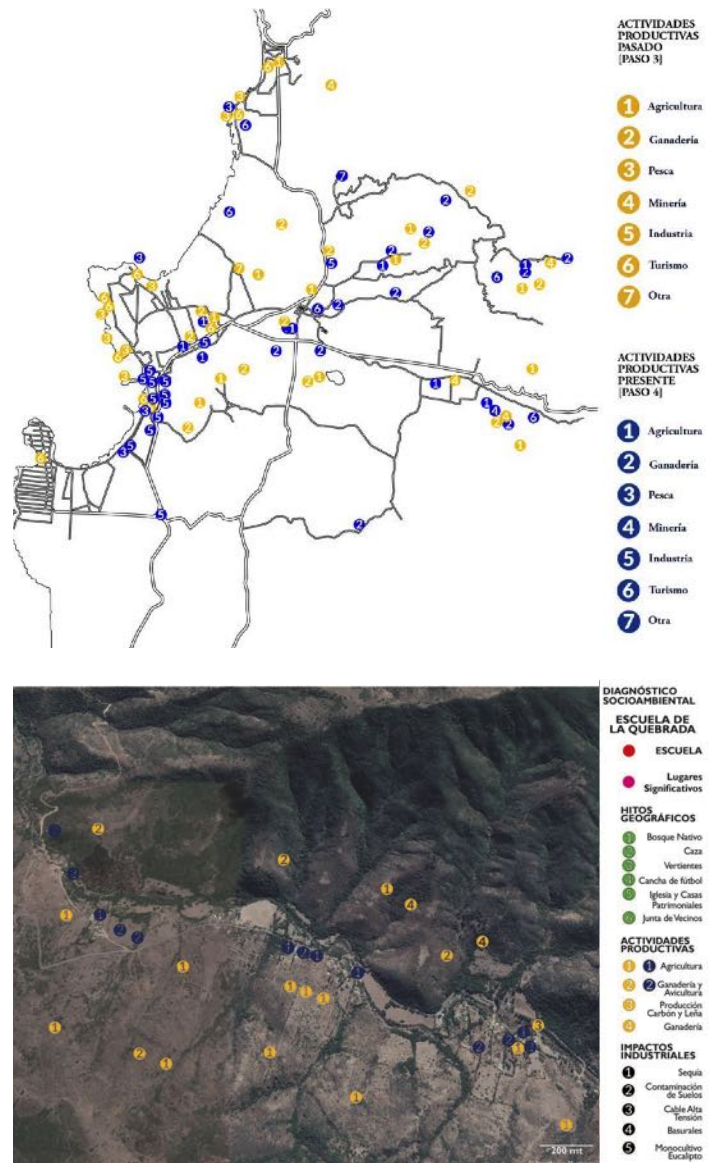


Figura 6 y 7. Pasos 3 y 4. Actividades productivas del pasado y del presente. Fuente: Elaboración de los autores.

comunal de la contaminación atmosférica y la sequía, como lo expresa claramente uno de los participantes: "habría que llenar toda la maqueta porque todo está contaminado. Donde tú vayas en la comuna, hay contaminación".

La agricultura y la ganadería, símbolos de unión territorial entre las localidades, disminuyen significativamente a causa de las externalidades negativas del desarrollo industrial, segregando las localidades de la comuna y reduciendo las actividades productivas a los centros poblados. Estos impactos dañan de forma irreparable el medioambiente, lo que repercute en los símbolos e imágenes que definen el espacio vivido y la identidad territorial, en consecuencia, el espacio social. El espacio pasivamente experimentado se define por esta ausencia de identidad comunal, como resultado de la Zona de Sacrificio, lo que a su vez perpetúa una crisis social-ambiental (Figuras 8 y 9).

En lo que refiere al desarrollo comunal, se percibe una falta de servicios urbanos básicos, una necesidad básica de los habitantes que no está cubierta, lo cual revela hacia dónde apunta el desarrollo urbano y los IPTs que privilegian el desarrollo industrial por sobre un desarrollo urbano comunal integral. Así lo expresa precisamente otro de los participantes: “Hay un problema en la política, en vez de preocuparse de producir agua para el consumo humano, hay preocupación por las industrias, entonces no se compatibilizan, el recurso agua está claro que está escaso.”

CONCLUSIONES

El espacio es producido bajo ciertos cánones que responden a un modelo cultural y económico de la sociedad. El Estado nacional se ha ido consolidando a escala mundial, organizando y planificando racionalmente la sociedad, imponiendo medidas homogéneas, cualesquiera que sean las ideologías políticas, el pasado histórico o el origen social de los individuos en el poder. El impacto de estas decisiones estatales en un sistema neoliberal capitalista como el chileno repercute en todas las escalas: global-planetaria, continental, nacional, regional, comunal e individual.

EN RELACIÓN AL ORDENAMIENTO TERRITORIAL

El desarrollo industrial, sustentado en los IPT, ha vulnerado por décadas la vida cotidiana de quienes habitan la Zona de Sacrificio, privilegiando la economía nacional/global por sobre la economía local, a través del crecimiento indiscriminado del CIV y sus consecuentes daños ambientales y sociales. La comuna de Puchuncaví es una muestra de lo que sucede a nivel país, con las diferentes Zonas de Sacrificio, las cuales son planificadas y perpetuadas a través de los actuales IPTs, al servicio del modelo económico dirigido centralmente y de manera jerárquica, lo que termina olvidando a los habitantes del lugar dentro de la planificación urbana, quedando todo el ecosistema local sometido, perjudicado y sacrificado. En ese sentido, el maqueteo colectivo permitió evidenciar a través de la caracterización que realizaron los participantes (30 personas en tres actividades), la posición de la localidad frente al CIV como un no lugar, como un agente externo a lo local que promueve una economía basada en la devastación socio-ambiental.

EN RELACIÓN A LA IDENTIDAD TERRITORIAL

Los impactos del desarrollo industrial en el habitar y en la población dicen relación con un deterioro acelerado del territorio en cuestión, lo que repercute en la memoria colectiva y, por consiguiente, en la identidad territorial. Los instrumentos de análisis utilizados comprueban que lo que produce el CIV (o este tipo de desarrollo) es una desorientación territorial en el individuo, debido a la pérdida de la identidad territorial basada en la abundancia, en el sentido de constituir una imagen que se verbaliza como “un pasado abundante” y una actual “de escasez”. Quienes participaron denotaron una conciencia territorial, pero la nueva identidad que impone la Zona de Sacrificio hace pensar que todo está deteriorado por lo que no

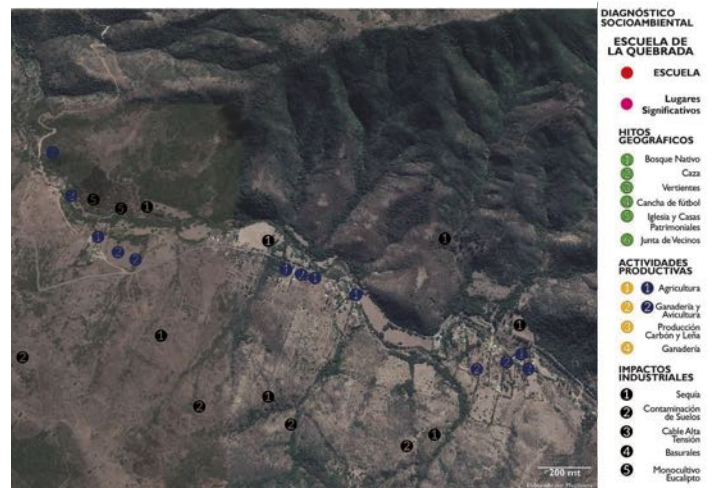
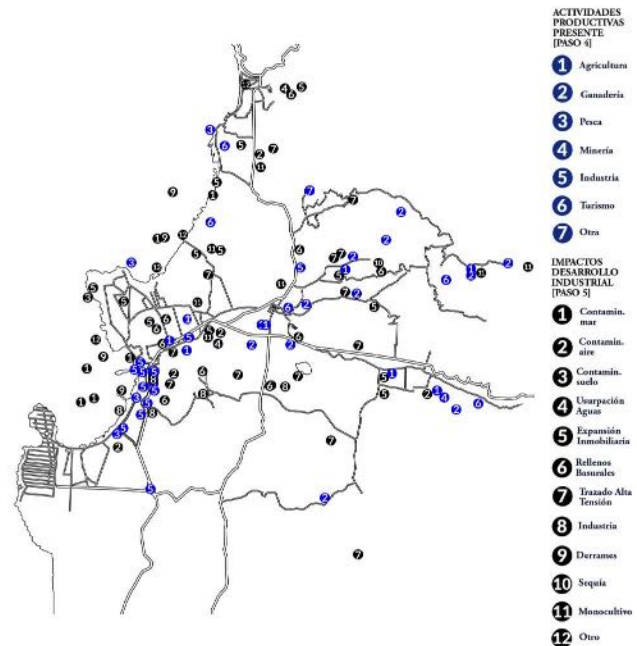


Figura 8 y 9. Paso 5 y 6. Impactos Negativos del no lugar (negro) con actividades productivas del presente (azul). Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 10. Imagen del maqueteo colectivo. Fuente: Fotografía de los autores.

hay un conocimiento de lo que aún resiste, como plantea Augé: “Ya no una génesis sino el desciframiento de lo que somos a la luz de lo que ya no somos” (1993, p. 32). El no lugar revela el surgimiento de una nueva identidad basada en el deterioro y la contaminación, quedando la Zona de Sacrificio validada y, al mismo tiempo, resistida por la consciencia colectiva.

EN RELACIÓN A LA RE-APROPIACIÓN TERRITORIAL.

La apropiación territorial implica una nueva racionalidad a partir de la revalorización del territorio, el cual ha sido deteriorado, pero aún conserva atributos descritos en los instrumentos. Visualizar colectivamente la situación actual de la comuna es de gran importancia para la transmisión de los conocimientos sobre la comuna y sus localidades a las nuevas generaciones, de manera que ellas puedan revalorizar el territorio y generar conciencia sobre estos atributos que la comuna posee con miras a fortalecer la identidad territorial, lo que conlleva la reconstrucción de una identidad territorial, por lo tanto, una nueva racionalidad territorial. Identificar las percepciones en la MACRO y MICRO escala puede ayudar a establecer una perspectiva más amplia sobre este tema, como al mismo tiempo identificar formas de organización que permitan articular proyectos que desarrollen una transición hacia sistemas más socialmente inclusivos, ambientalmente más sustentables y económicamente más inclusivos. Por último, coincidiendo con la *ecología social*, resulta más acertado para nuestra realidad latinoamericana, zarpar desde el compromiso con la vida, a pesar de no encajar precisamente con el método de la práctica científica (Gudynas, 2004).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Altieri, M. y Rojas, A. (1999). La tragedia ecológica del milagro neoliberal chileno. *Persona y Sociedad*, (1), 127-141.

Ares, P. y Risler, J. (2013). *Manual de mapeo colectivo: recursos cartográficos críticos para procesos territoriales de creación colaborativa*. Buenos Aires: Tinta Limón. Recuperado de https://geoactivismo.org/wp-content/uploads/2015/11/Manual_de_mapeo_2013.pdf

Augé, M. (1993). *Los “no lugares”. Espacios del anonimato. Una antropología de la sobremodernidad*. Barcelona: Gedisa editorial.

Bachelet, M. (2014). *Presidenta de la República, Michelle Bachelet: Si a la Universidad de Chile le va bien, al país le va bien*. Recuperado de <http://www.uchile.cl/noticias/102234/pdta-bachelet-si-a-la-u-de-chile-le-va-bien-al-pais-le-va-bien>

Badal, L. (2014). *Valoración de pérdidas económicas generadas por la degradación de las tierras. Valle de Puchuncaví, Región de Valparaíso, Chile*. Tesis de Pregrado. Universidad de Chile, Santiago, Chile. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/147799>

Biblioteca Congreso Nacional (2017). *Reportes Estadísticos Regionales 2017. Indicadores demográficos Comuna Puchuncaví*. Recuperado de <http://reportescomunales.bcn.cl/2017/index.php/Puchuncav%C3%AD/Poblaci%C3%B3n>

Bolados, P. (2016). Conflictos socio-ambientales/territoriales y el surgimiento de identidades post neoliberales (Valparaíso-Chile). *Izquierdas*, (31), 102-129.

Carruthers, D. (2001). Environmental politics in Chile: Legacies of dictatorship and democracy. *Third World Quarterly*, 22(3), 343-358.

Chile Sustentable (2018). *Cartilla Impactos de las Termoeléctricas a Carbón en la Salud de la Población Local | Contaminación | Infarto agudo de miocardio*. Recuperado de <https://www.scribd.com/document/389070940/Cartilla-Impactos-de-las-Termoelectricas-a-Carbon-en-la-Salud-de-la-Poblacion-Local>

Espinoza, L. (2015). El polo industrial Quintero-Ventanas ¿Hacia dónde fue el desarrollo? *MILLCAYAC – Revista Digital de Ciencias Sociales*, 11(3), 245-269.

González, I., Muena, V., Cisternas, M. y Neaman, A. (2008). Acumulación de cobre en una comunidad vegetal afectada por contaminación minera en el valle de Puchuncaví, Chile central. *Revista Chilena de Historia Natural*, 81(2), 279-291.

Gudynas, E. (2004). *Ecología, Economía y Ética del Desarrollo Sostenible*. Montevideo: CLAES.

Harvey, D. (1990). *The Condition of Postmodernity: An Enquiry into the Origins of Cultural Change*, Oxford: Blackwell Publishers.

Holifield, R. y Day, M. (2017). A framework for a critical physical geography of ‘sacrifice zones’: Physical landscapes and discursive spaces of frac sand mining in western Wisconsin. *Geoforum*, 85, 269-279.

Infante, P. (2016). (In)justicia ambiental en Chile y principales mecanismos para mitigar la inequidad: planificación territorial y derechos de comunidades vulnerables. *Revista de Derecho Ambiental*, 14(6), 143-163.

Instituto Nacional de Derechos Humanos (2018). *Informe Misión de Observación Zona de Quintero y Puchuncaví*. 11 al 13 de septiembre de 2018. Recuperado de: <https://bibliotecadigital.indh.cl/bitstream/handle/123456789/1168/mision-quintero.pdf?sequence=1>

Lindón, A. La ciudad y la vida urbana a través de los imaginarios urbanos, *Revista Eure*. 2007, vol. XXXIII, n° 99, pp. 7-16.

Lefebvre, H. (2013). *La producción del espacio*. Madrid: Editorial Capitán Swing.

Piñera, S. (2018). *Presidente Piñera reafirma potencial agroalimentario de Chile en el Encuentro Nacional del Agro*. Recuperado de <https://prensa.presidencia.cl/discurso.aspx?id=85228> <https://prensa.presidencia.cl/discurso.aspx?id=85228>

Poblete, N., Macari, O. y Rodríguez, C. Enriquecimiento y distribución espacial de arsénico en los suelos de las comunas de Quintero y Puchuncaví. En *XIV Congreso Geológico Chileno*. La Serena: Chile, 2015, pp. 288-291.

Tellez, L., Name, L. y Verísimo, C. Injusticia ambiental en un contexto industrial: el caso de villa hayes (Paraguay) como zona de sacrificio. En *Encuentro de Geógrafos de América Latina*, La Paz: Bolivia, 2017.

Salmani-Ghabeshi, S., Palomo, C., Bernalte, E., Rueda-Holgado, F., Miró, C., Cereceda-Balic, F., Fadic, X., Vidal, V., ... y Pinilla-Gil, E. (2016). Spatial gradient of human health risk from exposure to trace elements and radioactive pollutants in soils at the Puchuncaví-Ventanas industrial complex, Chile. *Environmental pollution*, 218, 322-330.

Sánchez, J., Romieu, I., Ruiz, S., Pino, P. y Gutiérrez, M. (1999). Efectos agudos de las partículas respirables y del dióxido de azufre sobre la salud respiratoria en niños del área industrial de Puchuncaví, Chile. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 6(6), 384-391.

Shade, L. (2015). Sustainable development or sacrifice zone? Politics below the surface in post-neoliberal Ecuador. *The Extractive Industries and Society*, 2(4), 775-784.

Svampa, M. y Viale, E. (2014). *Maldesarrollo: La Argentina del extractivismo y el despojo*. Buenos Aires: Katz Editores.

TERRAM, Fundación. *INFOGRAFÍAS: Conoce las Zonas de Sacrificio ambiental del país – Fundación Terram*. Recuperado de <https://www.terram.cl/2016/02/infografias-conoce-las-zonas-de-sacrificio-ambiental-del-pais-2/>





OASIS URBANO: UNA PROPUESTA DE ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO PARA EL METRO DE SANTIAGO

URBAN OASIS: A THERMAL RETROFITTING PROPOSAL FOR THE SANTIAGO METRO

ESTEBAN OMAR BUGUEÑO LARA
Magister Integrado en Diseño Arquitectónico
Estudiante de Tesis de Magister
Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile
<https://orcid.org/0000-0001-5627-886X>
ebuguenolara@gmail.com

RESUMEN

Las estaciones subterráneas del Metro de Santiago pueden llegar a experimentar temperaturas de alrededor de 32°C en la zona de andenes durante la época estival, afectando directamente a los usuarios del transporte público. Situaciones similares se repiten en otros sistemas ferroviarios subterráneos del mundo y las soluciones implementadas no han logrado resolver el problema por completo, lo que se traduce incluso en altos costos de operación y mantenimiento. Este trabajo expone una propuesta de acondicionamiento térmico pasivo que toma como caso de estudio la estación Tobalaba L1 del Metro de Santiago. Aprovechando los pozos de ventilación existentes, se simuló un sistema de enfriamiento evaporativo que busca reducir la temperatura al interior de la zona de andenes y, al mismo tiempo, contribuir a reactivar el espacio público en la superficie. La solución propuesta permitió una disminución de la temperatura promedio de 2,5°C en verano y 3,6°C en invierno, evidenciando que es posible llegar a igualar los alcances de algunas soluciones activas, pero con menores costos involucrados gracias al nulo gasto energético y al aprovechamiento de las preexistencias; y con mejoras en las condiciones del espacio público dada la incorporación del factor cualitativo aportado por la arquitectura.

Palabras clave

Climatización, estaciones de subterráneo, espacio público.

ABSTRACT

The underground stations of the Santiago Metro can experience temperatures of around 32°C in the platform area during the summer season, thereby directly affecting public transport users. Similar situations occur in other subway systems of the world and the solutions implemented have not been able to solve the problem entirely, even resulting in high operating and maintenance costs. This article presents a passive thermal retrofitting proposal that takes the Tobalaba L1 Santiago Metro station as its case study. Taking advantage of the existing ventilation shafts, an evaporative cooling system was simulated that seeks to reduce the temperature in the platform area and at the same time contribute to reviving the public space on the surface. The proposed solution made it possible to decrease the average temperature 2.5°C in the summer and 3.6°C in the winter. This demonstrates that it is possible to match the scope of some active solutions, but with lower costs associated with zero energy consumption and the use of existing elements, and with improvements in the conditions of public space by incorporating the qualitative factor from architecture.

Keywords

heating and cooling, subway stations, public space

INTRODUCCIÓN

EL CALOR EN LAS ESTACIONES DEL METRO

Año tras año, en el Metro de Santiago se repiten escenas de gente abanicándose, sacudiéndose la polera y, sobre todo, sudando mucho, producto de las altas temperaturas registradas al interior de las estaciones, principalmente subterráneas, donde se pueden alcanzar temperaturas de alrededor de 32°C (Liencura, 2019). Los problemas de calidad ambiental ligados a la temperatura tienen una incidencia variable a lo largo del año, pero comúnmente se asocian al período estival (septiembre a marzo).

Diversas fuentes periódicas vinculan las altas temperaturas fundamentalmente al tramo central de la línea 1 del Metro (entre Estación Central y Tobalaba), atribuyendo esta situación, por una parte, a "...la mayor afluencia de pasajeros ocasionada por la implementación del Transantiago" ("Instalan megaventiladores", 2010) y, por otra, a "...la mayor frecuencia de trenes que transitan

en ese tramo (principal fuente generadora de calor)" (Metro S.A., 2013).

Para el estudio de las cargas térmicas internas en el Metro es importante conocer la situación espacial y temporal de los focos, distinguiendo regiones diferenciadas, que se esquematizan en la Figura 1. Las zonas de andenes y de circulación de los trenes concentran la mayor cantidad de cargas internas, mientras que las zonas de acceso y mezanina se consideran al margen del estudio por contener cargas menos evidentes.

El calor generado por el funcionamiento de los trenes constituye, por lejos, la principal carga existente (92%), debido primordialmente al sistema de frenado que ocupa cerca de la mitad de la carga térmica interna total. Luego le siguen las instalaciones (6%) y en menor cantidad los ocupantes (2%) (Figura 2).

La exposición a ambientes muy calurosos puede derivar en una serie de consecuencias, que afectan por igual a los pasajeros y al personal del Metro. Aquí pueden distinguirse

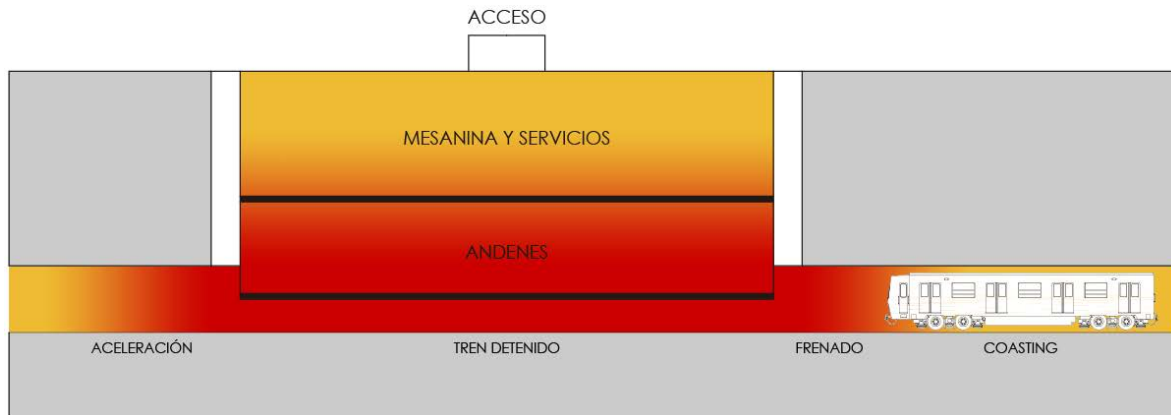


Figura 1. Esquema de cargas térmicas internas. Fuente: Elaboración del autor.

Fuente	Carga térmica	Leyenda
Funcionamiento de los trenes	Frenado	■
	Tracción	■
	Fenómenos aerodinámicos	■
	Contacto rueda-riel	■
	Climatización de trenes	■
Instalaciones	Alumbrado y distribución eléctrica	■
	Equipamientos	■
	Locales comerciales	■
	Climatización de salas técnicas	■
Ocupantes	Calor sensible	■
	Calor latente	■

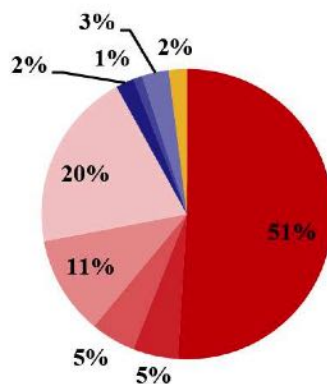


Figura 2. Distribución y clasificación de cargas térmicas internas. Fuente: Elaboración del autor en base a Herrero (2009).

tanto malestares o incomodidades, como afecciones a la salud, en los casos más graves. Además, esto mismo deriva en exclusión social de aquellas personas que puedan ser más vulnerables a los efectos por su condición específica (infantes, adultos mayores, embarazadas, etc.).

MEDIDAS ADOPTADAS FRENTE AL PROBLEMA

SISTEMA DE VENTILACIÓN PASIVA.

En las estaciones subterráneas, donde el problema es más crítico, el calor generado debe ser evacuado al exterior del sistema. Los sumideros principales son, en este sentido, la atmósfera y, en menor medida, el terreno circundante. Es por ello que la ventilación se ha convertido en la principal alternativa de enfriamiento, constituyendo un sistema que opera a través de los siguientes componentes:

Pozos de extracción: Se sitúan en las proximidades del punto medio de los tramos del túnel inter-estación y su función es extraer el aire caliente desde el interior (Figura 3).

Pozos de compensación: Se localizan en los piñones de entrada y salida de cada estación. Su función es evitar las molestias de aire generadas por el efecto pistón, fenómeno que ocurre cuando el tren, al circular por el túnel, empuja el aire que se encuentra a su paso de manera que ante este

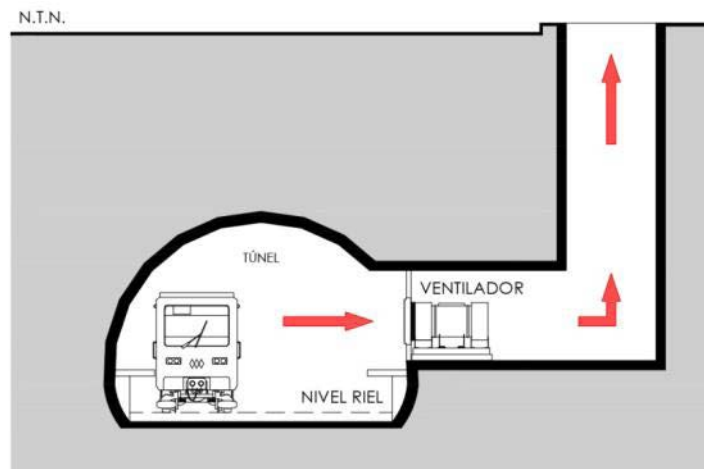


Figura 3. Corte transversal pozos de extracción. Fuente: Elaboración del autor en base a Herrero (2009).

se genera una capa de aire con una presión superior a la normal (Figura 4).

Pozos de inmisión: Se ubican en el andén y a través de ellos se impulsa aire desde el exterior con ayuda de ventiladores con el fin de aumentar las renovaciones de aire. Generalmente, se prescinde de pozos de inmisión (salvo escasas excepciones), cuando, en su lugar, se asocia la entrada de aire desde el exterior a los pozos de compensación en períodos donde no ocurre el efecto pistón (Figura 5).

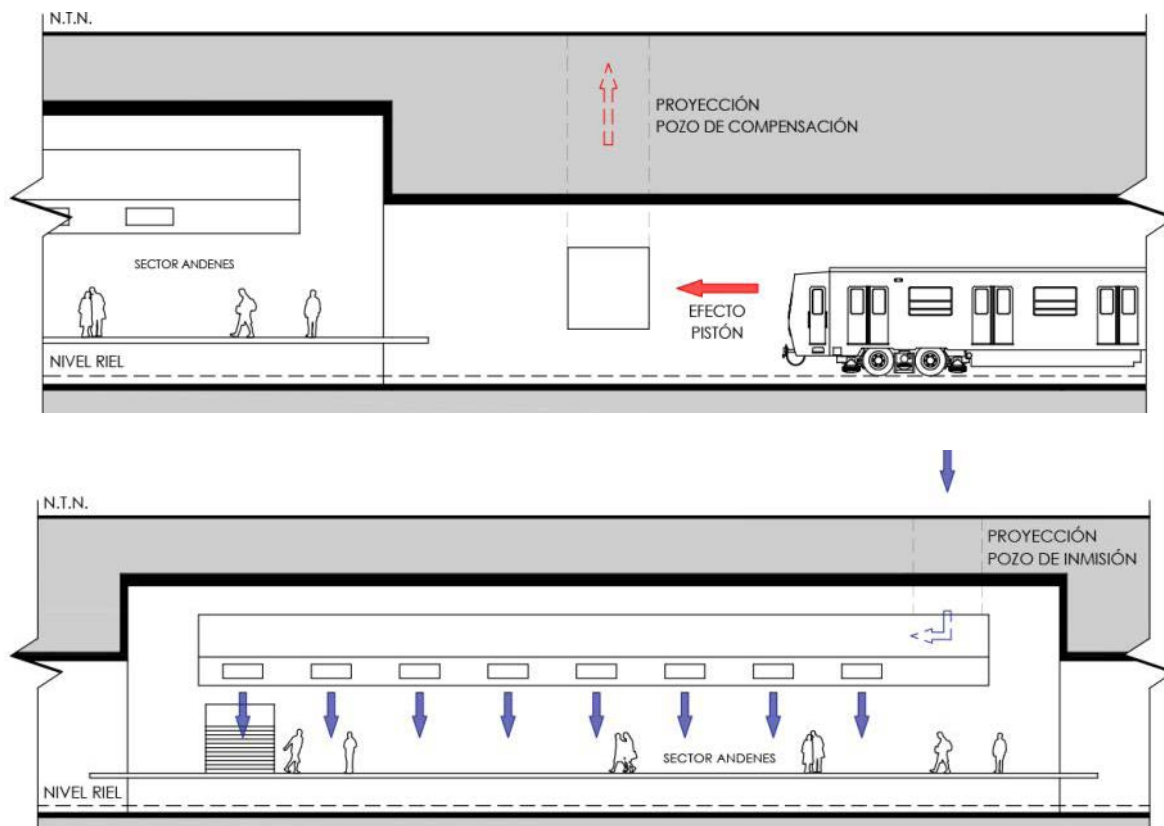


Figura 4. Corte longitudinal pozos de compensación. Fuente: Elaboración del autor en base a Herrero (2009)

Figura 5. Corte longitudinal pozos de inmisión. Fuente: Elaboración del autor en base a Herrero (2009).

SISTEMA DE VENTILACIÓN ACTIVA

Como forma de complementar a los sistemas de ventilación pasiva, que no resuelven el problema central, la empresa Metro ha implementado planes de verano que contemplan la incorporación de trenes con aire acondicionado y sistemas de ventilación activa en estaciones, con costos de inversión que solo hasta el año 2010 sobrepasaban los \$2.000.000.000 (Metro S.A., 2010). Concretamente, en la actualidad, el reciente plan de verano 2018-2019 contempló la instalación de 106 megaventiladores en 8 estaciones diferentes, la instalación de puertas con rejillas de ventilación en los coches de las líneas 2 y 5, y la dotación de aire acondicionado para la flota completa de las líneas 1 y 6 ("Con 106 ventiladores", 2018).

La Figura 6 grafica el parque instalado de sistemas de ventilación activo al año 2015 en las estaciones del Metro, donde se advierten los siguientes:

Ventiladores nebulizadores: Equipos de ventilación que utilizan una bomba eléctrica de alta presión y boquillas especiales para enfriar la temperatura del aire, utilizando agua nebulizada.

Ventiladores convencionales: Equipos de ventilación que aumentan el movimiento de las masas de aire en el interior.

Megaventiladores: Sistemas de ventilación industrial que aprovechan el efecto pistón para inducir el movimiento de masas de aire caliente a través del mismo al generar un flujo de aire adicional. Operan mediante celosías y/o ventiladores que pueden ser tanto de inyección como de extracción, dependiendo de las necesidades.

Ventiladores de túnel: Sistemas de ventilación industrial instalados en los pozos de extracción, que tienen como objetivo reforzar la aspiración del aire interior.

SOLUCIONES IMPLEMENTADAS EN OTROS PAÍSES

ESTACIÓN SÉ, METRO DE SÃO PAULO, BRASIL

En la estación Sé del Metro de São Paulo se implementaron estrategias de acondicionamiento pasivo donde se ubicaron grandes aberturas hacia la Praça da Sé, un amplio espacio público abierto que incorporó vegetación y espejos de agua. La estrategia buscaba implementar la técnica de enfriamiento evaporativo, mediante la cual el aire que ingresara a la estación disminuyera su temperatura por efecto del agua que aporta el entorno. Sin embargo, dado el clima de São Paulo, caracterizado por la alta presencia de humedad relativa, el enfriamiento evaporativo resultó no ser factible, pues requiere de un clima particularmente seco (Figura 7).

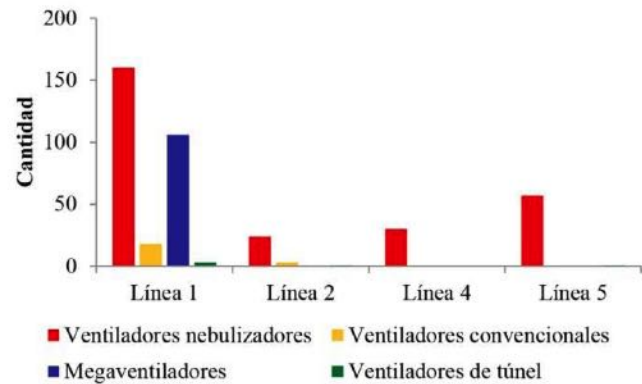


Figura 6. Parque de equipos de ventilación activa por línea. Fuente: Elaboración del autor en base a Metro S.A. (2015).



Figura 7. Vinculación entre Praça da Sé y estación Sé. Fuente: Fotografía del autor.

ESTACIÓN PACÍFICO, METRO DE MADRID, ESPAÑA

En la estación Pacífico del Metro de Madrid se incorporó un sistema geotérmico basado en el aprovechamiento de la temperatura del subsuelo como sistema de climatización. En este se emplea un mecanismo de bomba de calor geotérmico que utiliza el subsuelo, en invierno como fuente de calor, y, en verano como disipador del calor, de manera de mantener niveles de temperatura estables todo el año. Dicha bomba se conecta al subsuelo a través de un intercambiador de calor terrestre que permite conducir la carga térmica (Figura 8).

NORTHERN LINE, METRO DE LONDRES, REINO UNIDO

En la Northern Line del Metro de Londres (London Underground), y teniendo en cuenta el clima oceánico de la ciudad, se aprovecha el calor generado por el sistema para calefaccionar viviendas mediante la incorporación de tubos captadores de aire que desvían el calor a la red de calefacción de la central de energía del Consejo de Bunhill, que a su vez se conecta con cientos de hogares que pueden hacer uso de la energía térmica a través de radiadores (Figura 9).

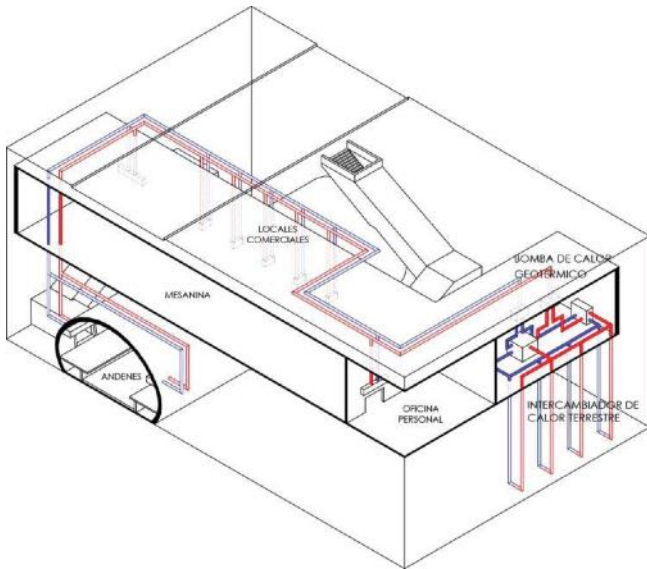


Figura 8. Funcionamiento del sistema geotérmico. Fuente: Elaboración del autor en base a Hendriks, Cubillo y Cuesta (2011).

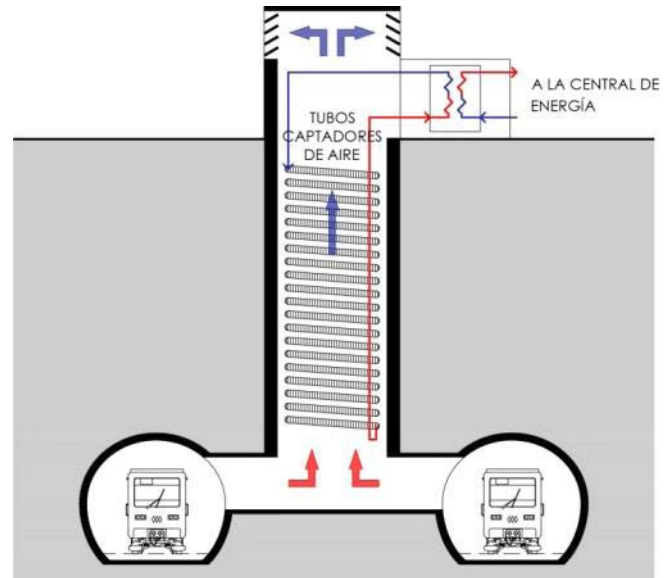


Figura 9. Funcionamiento del sistema de calefacción en la Northern Line. Fuente: Elaboración del autor en base a Arden (2013).

METODOLOGÍA

Para el estudio y diagnóstico se decidió trabajar en función de las variables clave del problema: la temperatura ambiental, la ventilación y la humedad del aire. La radiación solar pasa a segundo plano, puesto que en estaciones subterráneas -consideradas la tipología más crítica en este contexto- el problema está ligado fundamentalmente a las cargas térmicas internas.

Con el fin de responder al problema, se determinó un caso de estudio en el que se desarrolló una propuesta de intervención, teniendo como condicionantes el uso de preexistencias y la incorporación de estrategias de acondicionamiento pasivo para alcanzar un diseño replicable y de bajo costo. La alternativa propuesta se sometió a evaluación y análisis en función de lo existente para validar la hipótesis de trabajo.

MEDICIONES EN TERRENO

Se buscó determinar los niveles de temperatura y humedad al interior de la estación, por medio de registros bisemanales (día laboral y fin de semana) durante 2 semanas cada mes, entre los meses de octubre a marzo. Las mediciones se realizaron en horario punta mañana, horario valle y horario punta tarde, para luego promediar los resultados.

Se utilizó un termómetro ambiental marca EXTECH modelo 44550, considerando un período de aclimatación de 5 minutos para la toma de resultados.

Los datos del clima exterior se obtuvieron de datos del Instituto Meteorológico de Noruega (The Norwegian Meteorological Institute, 2016), extrapolados a la ubicación de la estación objeto de estudio, según sus coordenadas.

Tipo	Parámetro	Horario			
		Bajo	Punta mañana	Valle	Punta tarde
Actividad	Ocupación (personas/m ²) ¹	1,8	5,9	2,9	5,3
	Tasa metabólica (W/persona) ²	De pie, relajado = 1,2			
	Factor metabólico	0,9			
	Vestimenta (clo)	Invierno = 1,0 / Verano = 0,5			
Cerramientos	Estructura de obra gruesa	Hormigón armado			
		Equipos fluorescentes T8			
Iluminación	Tipo de luminaria	Equipos fluorescentes T8			

¹ Metro S.A., 2007.

² American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2017.

Tabla 1. Parámetros para la simulación energética del modelo. Fuente: Elaboración del autor en base a las fuentes indicadas.

SIMULACIÓN ENERGÉTICA

Se llevaron a cabo simulaciones energéticas del modelo en el software DesignBuilder acorde a los parámetros que se resumen en la Tabla 1.

Según los antecedentes estudiados, se definieron las siguientes instancias de análisis:

6:00 A.M. del 1 de agosto: Horario bajo en día laboral, con el registro de temperaturas más bajas del año (situación en invierno).

18:00 P.M. del 20 de diciembre: Horario punta tarde en día laboral, con el registro de temperaturas más altas del año (situación en verano).

Para determinar la escala de sensación térmica, se recurrió al método Fanger (Fanger, 1973): una herramienta para la valoración del confort térmico en espacios interiores, que contempla diversas variables presentes en los intercambios térmicos persona-ambiente y cuantifica los valores a través de un índice de valoración medio denominado voto medio estimado (PMV) y del porcentaje estimado de insatisfechos (PPD) (Figura 10).

Los resultados arrojados por el *software* se introdujeron en la herramienta CBE Thermal Comfort Tool (Hoyt *et al.*, 2017), la cual se basa en la Norma UNE-EN 15251 que establece una clasificación de los resultados de acuerdo a distintas categorías (Tabla 2).

EVALUACIÓN COSTO/BENEFICIO

En vista de determinar las ventajas comparativas de la propuesta, estas fueron evaluadas en relación a los principales sistemas de ventilación activa empleados en el Metro de Santiago (megaventiladores y ventiladores nebulizadores), a partir de los siguientes puntos:

1. Costos de inversión.
2. Costos de operación.
3. Costos de mantención.
4. Rango de alcance y unidades por estación.
5. Funcionamiento y efectividad en la reducción de temperatura.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IDENTIFICACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Como caso de estudio, se determinó trabajar con la estación Tobalaba, al reunir esta la mayor cantidad de condicionantes determinantes del problema:

Ubicación: Se posiciona en el tramo más crítico de la línea 1, siendo la estación con la mayor afluencia en la red, ya que contempla un estimado de 83.593 pasajeros diarios en días laborales (Herrera, 2018).

Tipología: Corresponde a una estación subterránea, por lo que puede experimentar mayores concentraciones de calor al existir una dificultad en la ventilación desde el exterior. Además, es punto de combinación entre las

PMV	PPD	Sensación
3	99 %	Muy caluroso
2	77 %	Caluroso
1	26 %	Ligeramente caluroso
0	5 %	Confort (neutro)
-1	26 %	Ligeramente frío
-2	77 %	Frío
-3	99 %	Muy frío

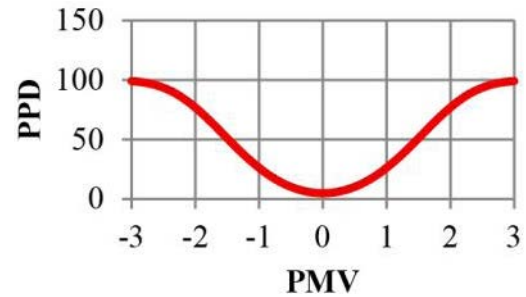


Figura 10. Escala de sensación térmica según método Fanger. Fuente: Elaboración propia en base a Arballo Kuchen, Alamiño-Naranjo y Alonso-Frank (2016).

Categoría	PPD	PMV	Descripción
I	< 6 %	-0,2 a +0,2	Alto nivel de expectativa. Recomendado para espacios ocupados por personas débiles y/o sensibles con requisitos especiales.
II	< 10 %	-0,5 a +0,5	Nivel normal de expectativa. Debería utilizarse para edificios nuevos y renovados.
III	< 15 %	-0,7 a +0,7	Aceptable y moderado nivel de expectativa. Puede utilizarse en edificios ya existentes.
IV	> 15 %	<-0,7 ó >+0,7	Valores fuera de los criterios de las categorías anteriores. Esta categoría sólo debería aceptarse durante una parte limitada del año.

Tabla 2. Categorización por niveles de expectativa térmica según norma UNE-EN 15251. Fuente: AENOR, 2008.

líneas 1 y 4, por lo que incide en una mayor afluencia de pasajeros al suplir trayectos en más sentidos y permite estudiar eventuales diferencias de temperaturas entre los andenes de ambas líneas.

Gasto energético: La estación Tobalaba presenta la mayor cantidad de equipos de ventilación activa en la red, entre los cuales la mayor parte corresponde a ventiladores nebulizadores (Metro S.A., 2015).

PROPUESTA DE INTERVENCIÓN

La propuesta se desarrolla desde el nivel de superficie mediante la intervención de los pozos de compensación existentes para generar un sistema de enfriamiento evaporativo. Esto, incorporando el concepto de "Oasis Urbano", a través del cual, en analogía a un oasis en el desierto, la iniciativa busca contrastar con el entorno construido y generar un microclima que se convierta en la antesala para la entrada de aire a la estación, el que, una vez acondicionado, será introducido mediante la incorporación de torres de viento que se vincularán con el interior. Al mismo tiempo, se contribuye a reactivar las áreas sobre los pozos de compensación mediante la generación de espacios para la interacción social.

Para efectos del estudio de la propuesta y optimización de los tiempos, se determinó desarrollar una única intervención en el pozo de compensación poniente en la línea 1 (Figuras 11 y 12).



Figura 11. Vista de la propuesta desde vereda sur. Fuente: Elaboración del autor.

VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA

MEDICIONES EN TERRENO

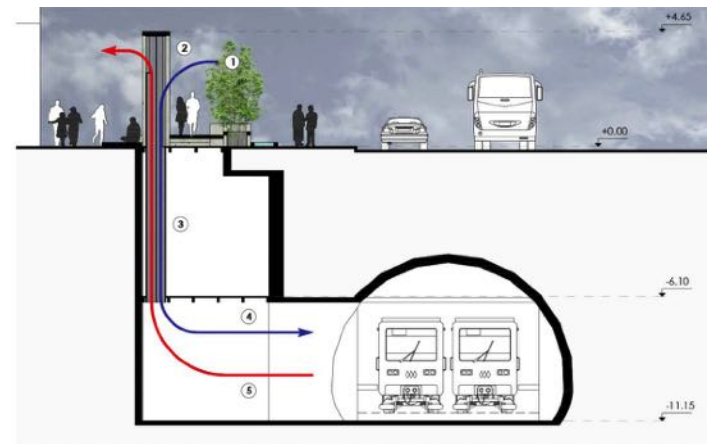
Según esquematiza la Figura 13, la línea 1 de la estación Tobalaba concentra las más altas temperaturas, mientras que hacia la línea 4, a pesar de experimentar diferencias de solo 2,0°C con respecto a la anterior, el problema solo es evidente en los momentos más críticos. Ello puede deberse a la menor circulación de trenes hacia la subestación de la línea 4 por ser terminal, en el entendido de que el funcionamiento de los trenes representa el mayor porcentaje de cargas térmicas internas. Por otra parte, la ubicación de la línea 4 a mayor profundidad puede generar una tendencia hacia la estabilidad térmica, sobre todo, considerando su ubicación bajo el canal San Carlos, lo que repercute en una temperatura radiante menor.

Las diferencias de la estación con respecto al exterior pueden alcanzar los 7,9°C en promedio, llegando a máximas que bordean los 33°C, lo que se explica por la nula incidencia de la radiación solar al interior y por la presencia de altas cargas térmicas internas, principalmente en función de la afluencia de pasajeros y la frecuencia de trenes (mayor en horarios punta y días laborales). Mientras tanto, la humedad relativa al interior alcanza niveles muy bajos, en torno al 40%, lo cual obedece más bien a la temperatura, en un sentido inversamente proporcional, y evidencia la sequedad del aire.

SIMULACIÓN ENERGÉTICA

Clima

Debido a la amplia oscilación térmica que experimenta Santiago, se perciben grandes diferencias climáticas en invierno y verano. Para el día 20 de diciembre, la temperatura registrada es alta, alcanzado la máxima durante el año, lo



1 EL AIRE EXTERIOR ES ENFRIADO POR ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO (AGUA Y VEGETACIÓN)
 2 LAS TORRES DE VIENTO CAPTURAN EL AIRE FRESCO
 3 EL AIRE ES CONDUCCIONADO AL INTERIOR MEDIANTE DUCTOS
 4 EL AIRE FRÍO ES INYECTADO AL SISTEMA POR EFECTO VENTURI Y DISTRIBUIDO POR EFECTO PISTÓN
 5 EL AIRE VICIADO ES EXTRAÍDO AL EXTERIOR POR EFECTO CONVECTIVO Y ACCIÓN DEL EFECTO PISTÓN

Figura 12. Corte transversal A-A' propuesta. Fuente: Elaboración del autor.

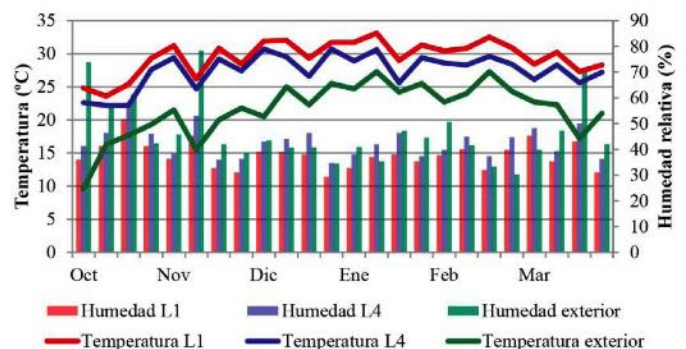


Figura 13. Registros de temperatura y humedad en estación Tobalaba. Fuente: Elaboración del autor.

Parámetro	Invierno		Verano	
	1 de agosto		20 de diciembre	
	6:00		18:00	
Temperatura de bulbo seco	-5,8°C	32,0°C		
Temperatura de bulbo húmedo	-5,8°C	18,3°C		
Humedad relativa	100%	26%		
Velocidad del viento	0,0m/s	4,1m/s		
Dirección del viento		Sur – norte		

Tabla 3. Parámetros climatológicos promedio para Santiago. Fuente: Elaboración del autor.

que se traduce en una baja humedad relativa. Para el día 1 de agosto, en cambio, ocurre la situación a la inversa, registrándose la temperatura más baja del año, con una humedad relativa del 100%, que implica que el vapor de agua que ya no admite el aire se condense en forma de rocío. El comportamiento del viento igualmente varía en ambas situaciones, pero en general la velocidad no es considerable, lo que podría perjudicar las estrategias que contempla la propuesta (Tabla 3).

Estación

La concentración de altas temperaturas en el andén se da, sobre todo, el día 20 de diciembre, cuando la temperatura del aire alcanza el parámetro más crítico (Tabla 4). Esto es consecuencia directa de las cargas térmicas internas

Parámetro	Invierno		Verano		Rango óptimo
	1 de agosto		20 de diciembre		
	6:00		18:00		
	Existente	Propuesta	Existente	Propuesta	UNE-EN ISO 7730
Temperatura del aire	28,2°C	24,6°C	34,3°C	31,8°C	10 a 30°C
Humedad relativa	45%	45%	35%	50%	30 a 70 %
Velocidad del aire	0,0m/s	0,1m/s	0,0 m/s	0,1 m/s	<1 m/s

Tabla 4. Resultados de la simulación energética. Fuente: Elaboración del autor en base a AENOR, 2006.

al interior de la estación, que también se acentúan por la nula velocidad del aire más allá de la producida por efectos convectivos. En términos generales, la propuesta no cambia en mayor medida esta situación, pero sí se empieza a evidenciar el ingreso de aire desde el pozo de ventilación, pudiendo aumentarse y llegar a valores más aceptables con el aumento del tiraje en el punto de salida (Figuras 14 y 15).

Cabe mencionar, sin embargo, que no se considera el movimiento de aire asociado a sistemas de ventilación activos ni el flujo de aire inducido por el efecto pistón de los trenes, que puede alcanzar valores cercanos a los 1,8m/s en zonas y momentos muy determinados (Herrero, 2009, p. 79).

SITUACIÓN EN VERANO



SITUACIÓN EN INVIERNO

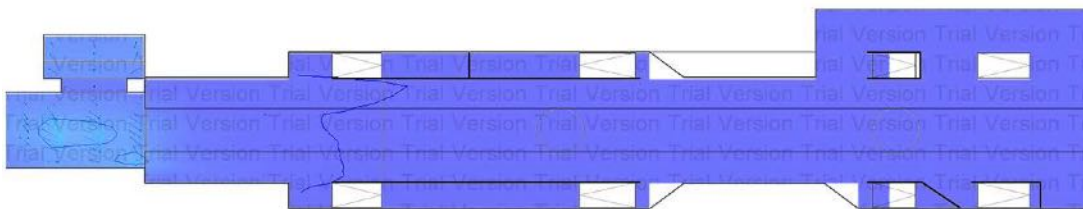


Figura 14. Velocidad del aire para la situación existente. Fuente: Elaboración del autor.

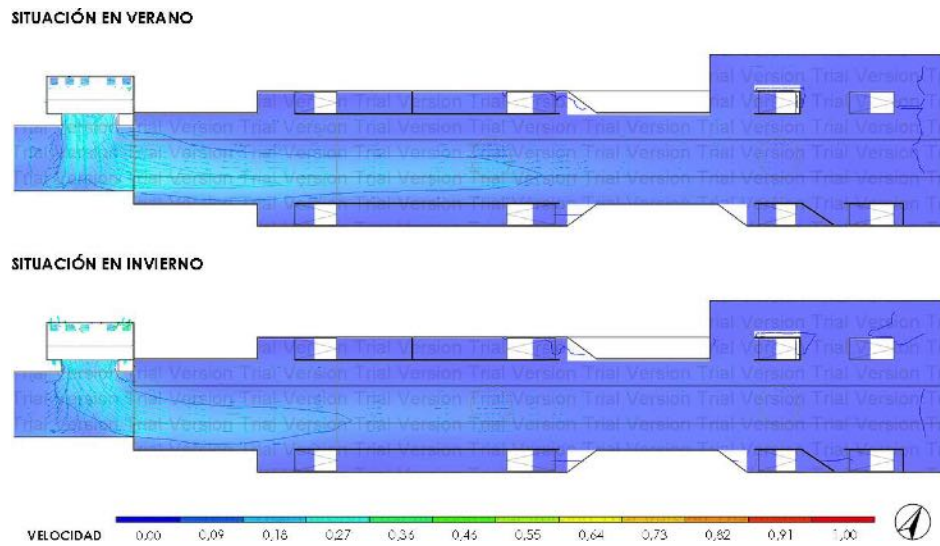


Figura 15. Velocidad del aire para la situación existente. Fuente: Elaboración del autor.T

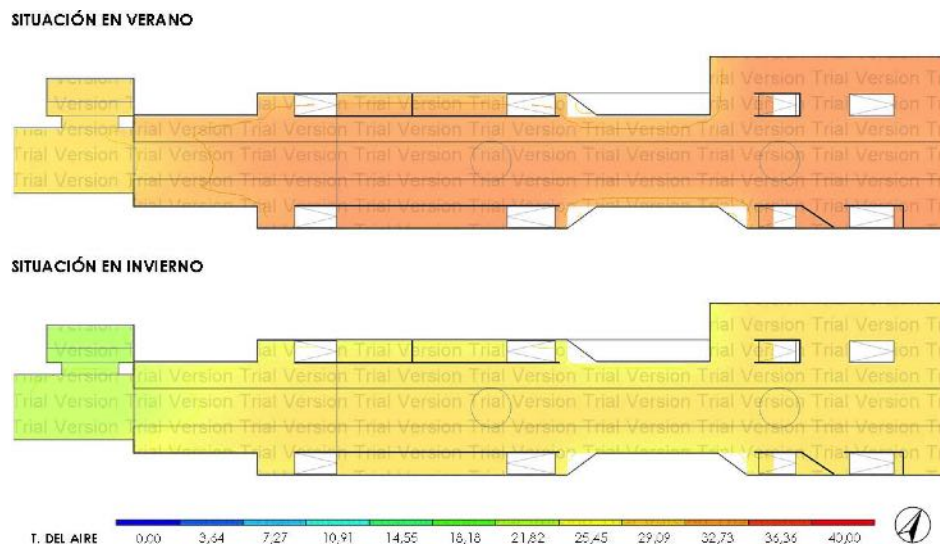


Figura 16. Temperatura del aire para la situación existente. Fuente: Elaboración del autor.

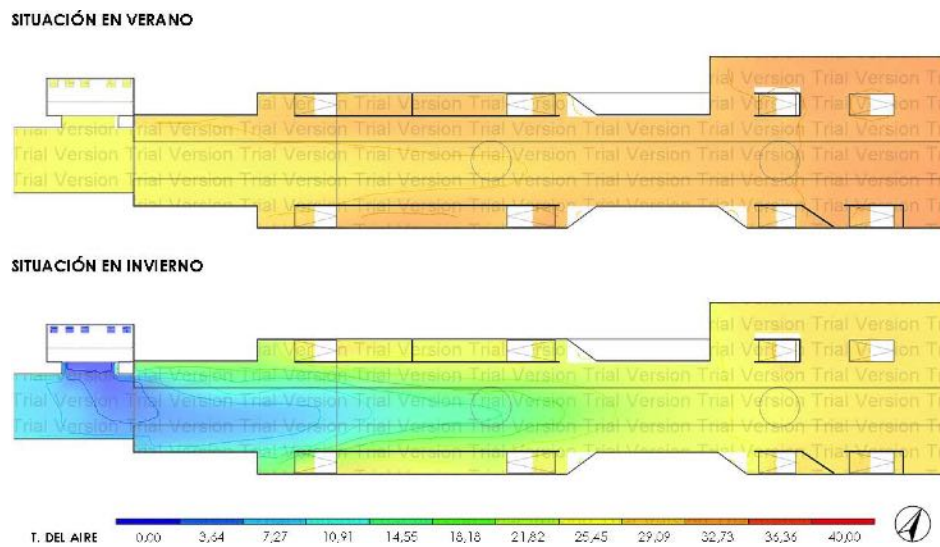


Figura 17. Temperatura del aire para la propuesta. Fuente: Elaboración del autor.

Índice	Invierno		Verano		Rango óptimo	
	1 de agosto		20 de diciembre			
	6:00		18:00			
	Existente	Propuesta	Existente	Propuesta	UNE-EN ISO 7730	UNE-EN 15251
PMV	1,36	0,81	2,65	2,35	-2,0 a +2,0	-0,7 a +0,7
PPD	44%	19%	96%	90%	<77 %	<15 %
Categoría	IV	IV	IV	IV		I a III

Tabla 5. Indicadores de sensación térmica. Fuente: Elaboración del autor en base a las fuentes indicadas.

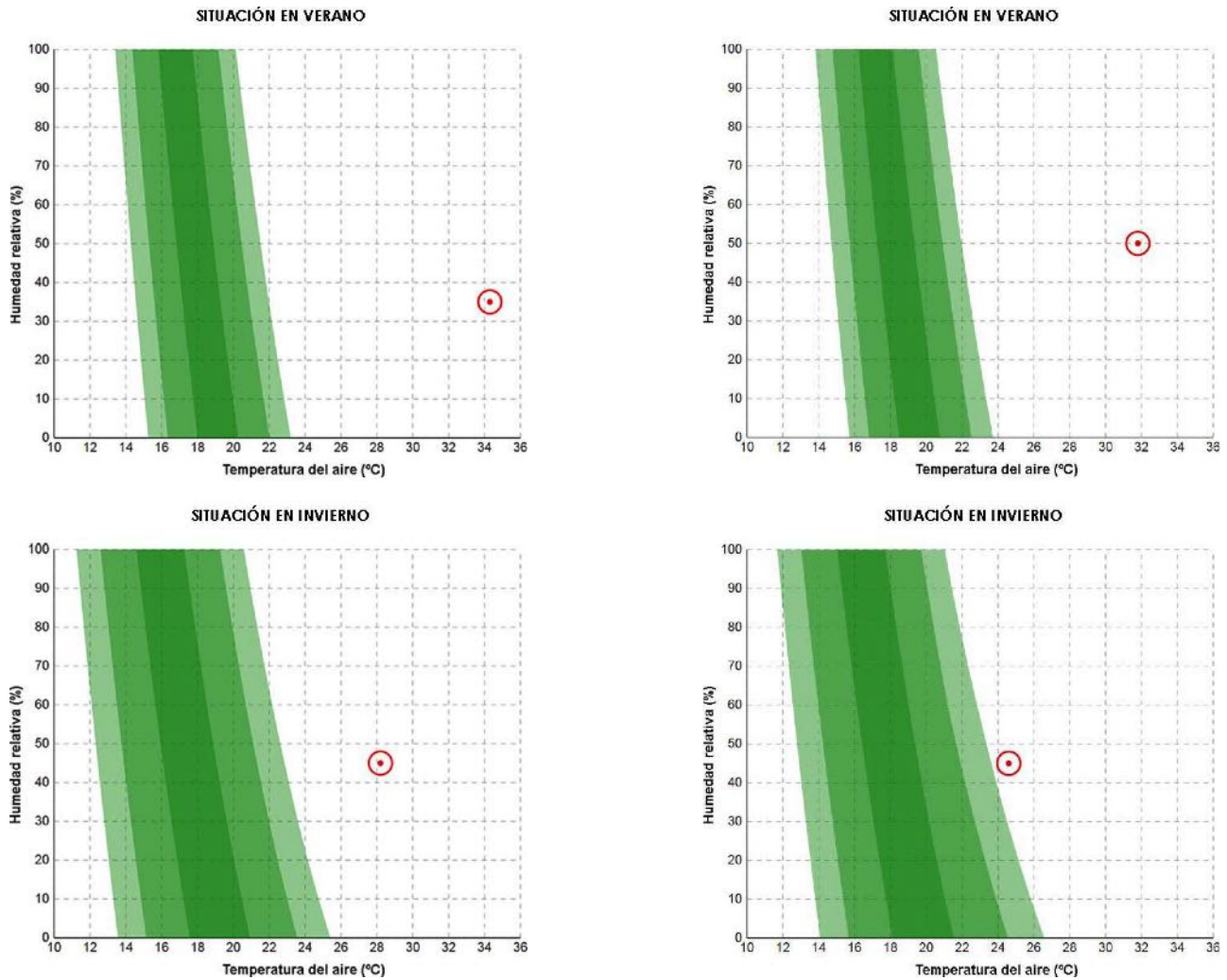


Figura 18. Confort higrotérmico de la situación existente según norma UNE-EN 15251. Fuente: Elaboración del autor en base a Hoyt et al., 2017.
 Figura 19. Confort higrotérmico de la propuesta según norma UNE-EN 15251. Fuente: Elaboración del autor en base a Hoyt et al., 2017.

Respecto a la temperatura del aire, la implementación de la propuesta logra una reducción promedio de 3,6°C en invierno y 2,5°C en verano. Estos valores son incluso más favorables que los obtenidos de las mediciones en terreno para la subestación de la línea 4 donde, a pesar de la escasa diferencia, se percibe ya un cambio considerable.

La humedad relativa al interior es baja para ambas situaciones, lo que garantiza el buen funcionamiento del sistema de enfriamiento evaporativo que, además, contribuye a estabilizar estos valores por efecto de la evaporación del agua y la humidificación del aire.

Los problemas de temperatura se van acentuando, en general, a medida que se toma distancia del pozo de compensación existente, lo que demuestra que, para ambas situaciones, la temperatura producto de las cargas térmicas internas es superior a la temperatura del exterior (Figuras 16 y 17).

Al determinar la escala de sensación térmica por el método Fanger (Tabla 5), se obtienen valores que representan un ambiente muy caluroso (PMV ≈ 3) y caluroso (PMV ≈ 2) en verano y un ambiente ligeramente caluroso (PMV ≈ 1) en invierno. Si bien en la práctica durante el invierno podría resultar agradable la estadía en el andén, el método Fanger considera la vestimenta, con el objetivo de determinar un confort tal que no sea necesario variar las prendas de vestir para adecuarse a un determinado ambiente.

La propuesta, si bien mantiene valores similares, logra disminuir el porcentaje estimado de insatisfechos en la zona de andenes en 6%, al 20 de diciembre, y en 25%, al 1 de agosto, clasificándose, por tanto, en la categoría IV que es aceptable solo para los períodos más críticos.

Si estos los valores se adecúan a la norma UNE-EN ISO 7730, en ninguno de los dos casos se cumpliría con esta para el día 20 de diciembre, mientras que al día 1 de agosto la situación sería favorable. Sin embargo, la norma UNE-EN 15251, siendo más precisa, determina valores fuera del confort para ambas situaciones, aunque de cualquier forma el escenario crítico se sitúa en verano.

Las Figuras 18 y 19 permiten determinar los valores de humedad relativa y temperatura del aire que se requerirían bajo el resto de las condiciones registradas según la norma UNE-EN 15251, pudiéndose concluir que, a pesar de las reducciones de temperatura obtenidas con la intervención, sigue sin cumplirse el confort para ambas situaciones. Lo anterior hace necesario reducir la temperatura del aire en alrededor de 10°C, considerando una humedad relativa entre 30 y 50% para la situación más desfavorable en verano.

EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE LA PROPUESTA

COSTO

Según muestra la Tabla 6, referente a los costos de inversión, la propuesta representa la inversión por unidad más alta, pero como solo se requieren dos en estación, la inversión

		Megaventiladores	Ventiladores nebulizadores	Propuesta
Unidades por estación		2	28	2
Costo unidad	Inversión (M\$)	12.000,0 a 15.000,0 ¹	1700,0 a 2000,0 ¹	18906,1
	Operación (M\$) ³	210	70	
	Mantenimiento (M\$)	10.074,5	10.074,5	98,1 ⁵
Costo total	Inversión (M\$)	24.000,0 a 30.000,0 ¹	47600,0 a 96.000,0 ¹	37.812,2
	Operación (M\$) ³	420	1.960,00	
	Mantenimiento (M\$)	10.074,5	10.074,5	196,2 ⁵

¹ Metro S.A., 2013.

² Valor estimado según presupuesto estimado de las obras en base a Ondac, 2018.

³ Valor estimado considerando un período de funcionamiento de 7 meses (período estival).

⁴ Valor estimado según costos estimados de mantenimiento para ventilación activa en base a Instituto Nacional de Estadísticas, 2019.

⁵ Valor estimado en base al costo por m2 de área verde para la comuna de Providencia (Guzmán, 2017)

* M\$= Miles de pesos chilenos.

Tabla 6. Costos unitarios y totales para las alternativas analizadas.
 Fuente: Elaboración del autor en base a las fuentes indicadas.

total resulta menor a lo contemplado por ventiladores nebulizadores, mas no así por los megaventiladores. Lo anterior se explica por la cantidad de materiales y mano de obra requeridos para la propuesta que, sumado a los tiempos de construcción mayores con respecto a las otras alternativas, puede resultar la opción menos rentable en este punto.

No obstante, en relación a los costos de operación y mantenimiento involucrados, se evidencia que la propuesta constituye la opción más conveniente distando por mucho de las otras alternativas. Esta es una de las principales características de los sistemas de acondicionamiento pasivo, que no requieren personal especializado para su mantenimiento ni consideran gastos por el uso de electricidad. A largo plazo, dichas condiciones determinan la rentabilidad de la propuesta, que se estima podría resultar rentable entre el primer y segundo año de operación, con respecto a los megaventiladores.

BENEFICIO

Una vez comparados los atributos asociados a cada alternativa (Tabla 7), se estima que, si bien la propuesta logra por sí sola una menor contribución en cuanto a reducción de temperatura, sus valores podrían igualarse al funcionamiento de los megaventiladores si se consideran 2 unidades por estación, pudiendo la situación ser más favorable o no dependiendo de la zona en que se determine.

Los ventiladores nebulizadores lideran en cuanto a reducción de temperatura se refiere, pero su alcance es muy limitado en comparación a las otras alternativas. Aun así, los modos de funcionamiento de cada alternativa permiten determinar que estas podrían ser complementarias.

Pese a lo anterior, la iniciativa asocia otros beneficios ligados al aporte del espacio público en superficie que pueden favorecer la efectividad de la inversión.

CONCLUSIÓN

El problema de las altas temperaturas al interior de las estaciones ferroviarias subterráneas, aunque muchas veces resulta no ser un tema prioritario a abordar, conlleva desde afecciones a la salud a exclusión social, en los períodos más críticos, y no solo se presenta en el Metro de Santiago, sino también en sistemas ferroviarios subterráneos de todo el mundo, independiente de las condiciones climáticas. Esto debido a que el problema está ligado a la presencia de altas cargas térmicas internas, principalmente producto del funcionamiento de los trenes, lo que puede derivar en temperaturas de hasta 34°C en verano para la zona de andenes.

Las medidas que se han tomado en el Metro de Santiago comprenden el uso de sistemas de ventilación activa que, además de contemplar un alto gasto energético, no han logrado resultados del todo efectivos, lo que lleva a implementar nuevos planes año tras año. En otras partes del mundo la situación es similar, destacándose soluciones basadas en sistemas de acondicionamiento mixto (pasivo y activo), pero que pueden no resultar viables en países que cuentan con recursos más limitados o cuando se tiene en mente otras prioridades. Por ello, la arquitectura tiene mucho que aportar desde la introducción de estrategias de acondicionamiento pasivo y de factores cualitativos que pongan como prioridad al usuario.

La propuesta "Oasis Urbano", si bien no resuelve de lleno el problema, contribuye al demostrar que es posible igualar y/o complementar los alcances de los sistemas activos mediante la implementación de sistemas de acondicionamiento pasivos, teniendo la ventaja de reducir ampliamente los costos de mantención y operación por el nulo gasto energético, y pudiendo reducir los costos de inversión cuando se aprovechan las preexistencias.

Sistema	Unidades por estación	Alcance	Reducción de Temperatura (°C)	Funcionamiento
Mega ventiladores	2	Andén	3 a 5 en horario punta	Efecto pistón
Ventiladores nebulizadores	28	Hasta 2 metros en andén	6 por unidad	Agua nebulizada
Propuesta	2	Andén	Alrededor de 3 por unidad	Ingreso de aire fresco

Tabla 7. Eficacia de las alternativas analizadas. Fuente: Elaboración del autor en base a Metro S.A., 2010.

En este punto, el aprovechamiento de los pozos de compensación existentes le otorga a la propuesta una doble funcionalidad, al permitir aportar al espacio público en superficie mediante espacios basados en la versatilidad y ambigüedad espacial.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al profesor Mg. Arquitecto Rodrigo Aguilar de la Universidad de Santiago de Chile, por su constante apoyo y guía durante el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AENOR (2006). *Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local (ISO 7730:2005)*. UNE-EN ISO 7730:2006. Madrid: AENOR.
- AENOR (2008). *Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo la calidad del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido*. UNE-EN 15251:2008. Madrid: AENOR.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. (2017). *AHSRAE Handbook Fundamentals*. Atlanta: ASHRAE.
- Arballo, B., Kuchen, E., Alamino-Naranjo, Y. y Alonso-Frank, A. (2016). Evaluación de Modelos de Confort Térmico para Interiores. En: *VIII Congreso Regional de Tecnología de la Arquitectura – CRETA*, Universidad Nacional de San Juan, Islas Malvinas.
- Arden, C. (2013). *London underground tunnels to heat homes. Islington now*. Recuperado de <http://islingtonnow.co.uk/london-underground-tunnels-to-heat-homes/>.

Con 106 ventiladores gigantes en 8 estaciones Metro capeará el calor (2018). *La Hora*. Recuperado de <http://www.lahora.cl/2018/11/106-ventiladores-gigantes-8-estaciones-metro-capeara-calor/>.

Fanger, P. O. (1973). *Thermal Comfort*. New York: McGraw-Hill Book Company.

Guzmán, J. M. (2017). *La Gestión Municipal de áreas verdes en el gran Santiago*. Santiago: Fundación Mi Parque.

Hendriks, M., Cubillo, J. M. y Cuesta, M. (2011). Refrigeración del Metro con Geotermia. Retos y experiencias de un caso real: Metro Madrid - Estación Pacífico. *El Instalador*, (482), 118-126.

Herrera, J. (2018). Tobaraba, Manquehue y La Cisterna son las estaciones de metro con mayor afluencia. *El Mercurio* recuperado de <https://gobierno.udd.cl/cpp/noticias/2018/07/03/tobaraba-manquehue-y-la-cisterna-son-las-estaciones-de-metro-con-mayor-afluencia-el-mercurio/>.

Herrero, R. (2009). Sistemas de Ventilación en Ferrocarriles Metropolitanos: Panorámica y Estrategias de Diseño. Proyecto fin de Carrera - Ingeniería Industrial. Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España.

Hoyt, T., Schiavon, S., Piccioli, A., Cheung, T., Moon, D. y Steinfeld, K. (2017). CBE Thermal Comfort Tool. *Center for the Built Environment*. Recuperado de <http://comfort.cbe.berkeley.edu/EN>.

Instalan megaventiladores para disminuir el calor en estaciones de Metro (2010). *La Tercera*. Recuperado de <https://www.latercera.com/noticia/instalan-megaventiladores-para-disminuir-el-calor-en-estaciones-de-metro/>.

Instituto Nacional de Estadísticas (INE) (2019). Índices de Remuneraciones y Costo de Mano de Obra - IR ICMO. *Instituto Nacional de Estadísticas Chile*. Recuperado de <https://www.ine.cl/estadisticas/laborales/ir-icmo>.

Liencura, J. (2019). ¡Estamos fritos! Hasta 38° deben soportar pasajeros del transporte público en Santiago. *Publimetro Chile*. Recuperado de <https://www.publimetro.cl/cl/noticias/2019/01/04/hasta-38oc-soportar-pasajeros-transantiago-metro.html>.

Metro S.A. (2007). *Anexos Estadísticos 2007*. Santiago.

Metro S.A. (2010). Metro implementa mega ventiladores para disminuir calor en estaciones. *Web Metro de Santiago*. Recuperado de <https://www.metro.cl/noticias/detalle/923>.

Metro S.A. (2013). Metro inicia plan de verano 2013-2014. *Web Metro de Santiago*. Recuperado de <https://www.metro.cl/noticias/detalle/1339>.

Metro S.A. (2015). Especificaciones técnicas. Servicio de mantenimiento de sistemas de ventilación industrial y nebulizadores en estaciones de Metro S.A. Santiago.

ONDAC. *Manual de Costos: Materiales y Actividades para la Construcción*. Santiago: ONDAC, 2018.

The Norwegian Metereological Institute (2016). *WeatherSpark*. Recuperado de <https://weatherspark.com/#!dashboard;loc=-33.4184,-70.6020>.





EVALUACIÓN DEL MEJORAMIENTO DEL CONFORT TÉRMICO CON LA INCORPORACIÓN DE MATERIALES SOSTENIBLES EN VIVIENDAS EN AUTOCONSTRUCCIÓN EN BOSA, BOGOTÁ, COLOMBIA

Recibido 12-08-2019

Aceptado 09-12-2019

AN EVALUATION OF THE IMPROVEMENT OF THERMAL COMFORT WITH THE INCORPORATION OF SUSTAINABLE MATERIALS IN SELF-BUILD DWELLINGS IN BOSA, BOGOTA, COLOMBIA.

FRANZ CALDERON URIBE

Doctor en Comunicación visual en Arquitectura y Diseño

Investigador Asociado

Universitaria Agustiniana, Uniagustiniana, Colombia

<https://orcid.org/0000-0002-3008-7552>franz.calderon@uniagustiniana.edu.co

RESUMEN

En este artículo se evalúa cómo la incorporación de materiales sostenibles mejoró el confort térmico en un hábitat en proceso de autoconstrucción, en el barrio San José de Bosa, en Bogotá, Colombia. El problema del confort se ha abordado como una condición fundamental del hábitat que responde a una necesidad de cobijo, de tener un espacio propio, sin importar la forma en que este espacio responda a las variables climáticas. Por otra parte, el uso de materiales sostenibles ha ido incorporando beneficios ambientales, en especial en las grandes ciudades, debido a los altos índices de contaminación actuales. En los barrios periféricos, como el aquí abordado, el cemento, el ladrillo y el acero son los materiales más usados en la construcción. Concretamente, se expone en lo que sigue un estudio de caso en el que se hicieron mediciones periódicas con el objetivo de determinar el balance térmico y el modo en que los materiales empleados respondían a las condiciones climáticas existentes. Con el fin de optimizar no solo el confort térmico sino la sostenibilidad del hábitat, se incorporaron materiales sostenibles, para luego realizarse nuevas mediciones, a partir de las cuales se determinó que los nuevos materiales mejoraron el confort térmico del hábitat, al comprobarse un aumento de 6°C en la temperatura media interior.

Palabras clave

hábitat, materiales alternativos, diseño sustentable, balance térmico

ABSTRACT

This article evaluates how the incorporation of sustainable materials improved thermal comfort in a habitat using the self-build process, in the San José de Bosa neighborhood in Bogota, Colombia. The problem of comfort was addressed as a fundamental condition of the habitat. The habitat responds to a need for shelter, understood as the need to have one's own space regardless of the way this space responds to climate variables. The use of sustainable materials provides environmental benefits, especially for large cities due to the current high levels of pollution (Fernández-Agüera, Domínguez-Amarillo, Alonso, & Martín-Consuegra, 2019). In these peripheral neighborhoods, cement, brick and steel are the most commonly used construction materials. A case study was carried out in which periodic measurements were made with the objective of determining the thermal balance and how the materials used responded to the existing climate conditions. In order to improve not only the thermal comfort but also the sustainability of the habitat, sustainable materials were used. Finally, new measurements were made to determine if the new materials improved the thermal comfort of the habitat and an increase of 6 °C in the average indoor temperature was established.

Keywords

habitat, alternative materials, sustainable design, thermal balance.

INTRODUCCIÓN

Este artículo es el resultado de un proyecto de investigación académico cuyo objetivo principal es el análisis térmico de un hábitat informal en proceso de autoconstrucción ubicado en Bosa, un distrito popular situado al sur occidente de Bogotá. El estudio determinó que, con la incorporación de una solución constructiva sostenible, es posible optimizar el confort térmico en un hábitat autoconstruido. El análisis térmico en esta tipología de vivienda informal no ha sido estudiado en Colombia, sin embargo hay antecedentes en este tema en otras ciudades latinoamericanas, como la de Guayaquil (Ecuador) donde se han llevado a cabo estudios de casos que revelaron que los materiales empleados, especialmente en la cubierta, no generaban confort térmico (Macias, Soriano, Sanchez y Canchingre, 2015).

El análisis comparativo de diferentes trabajos e investigaciones pudo determinar que en los países desarrollados se dan algunos factores diferenciadores: existe una normativa muy clara que obliga a las empresas constructoras a cumplir con unos estándares mínimos de calidad, sobre todo en torno a los materiales empleados, además de tener parámetros de evaluación del confort térmico y acústico. En algunos países en vías de desarrollo latinoamericanos se ha evidenciado que el hábitat popular y autoconstruido no tiene en cuenta aspectos bioclimáticos ni referidos al confort térmico, y que los materiales empleados son reutilizados o temporales, debido a la informalidad del hábitat construido.

El proyecto evaluó el mejoramiento del confort térmico en un hábitat autoconstruido, con materiales tradicionales, cemento, ladrillo, materiales reutilizados, tejas de zinc, tejas de asbesto cemento y elementos de madera, entre otros. Se reemplazaron los materiales existentes por elementos constructivos obtenidos a partir del reciclaje de envases de Tetrapak y aislamiento de origen vegetal. La investigación pudo determinar que el elemento constructivo que más afectaba el confort térmico del hábitat era la cubierta, por esta razón esta se reemplazó incorporando materiales sostenibles que fortalecieran el aislamiento térmico del hábitat y, por ende, aumentarían el confort térmico del interior del hábitat objeto de estudio.

ESTADO DEL ARTE.

El confort térmico se define en la Norma ISO 7730 como "esa condición de la mente en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico" (Robledo-Fava et al., 2019) *we analyze the influence of the designer's choice of values for the human metabolic index (met. Si bien esta definición se encuentra aceptada ampliamente, es difícil su traducción a parámetros físicos cuantificables. Básicamente, y en términos generales, el hombre califica un ambiente como confortable cuando ningún tipo de incomodidad térmica está presente. La primera condición de confort es la neutralidad térmica, lo que significa que*

la persona no se siente demasiado calurosa, ni demasiado fría (Godoy Muñoz, 2012).

En los últimos 30 años este concepto ha tomado un carácter muy relevante en el diseño y construcción de viviendas, producto de los avances de la ingeniería, de los sistemas de aire acondicionado y la climatización. Las diversas implicaciones sociales y de consumo energético que ello conlleva obligan a analizar y reinterpretar los modos tradicionales de vida en regiones con climas tropicales, y a buscar soluciones relacionadas directamente la arquitectura bioclimática. Por ejemplo, los edificios ventilados naturalmente no solo dan sensación de confort a los ocupantes y consumen menos energía, sino también están vinculados con su cultura, con una manera particular de entender la relación interior-exterior e, incluso, la privacidad (Godoy Muñoz, 2012).

Además de los aspectos bioclimáticos, es importante mencionar las teorías de Fanger, basadas en experimentos realizados a 1296 jóvenes en cámaras térmicas, en los que se usó modelos estáticos de transferencia de calor. En estos estudios, se analizó la ropa y la actividad de los participantes, mientras eran expuestos a diferentes ambientes térmicos. Los participantes debían indicar cómo se sentían en relación al calor y el frío, usando los siete puntos de la escala de sensación térmica de ASHRAE, de (-3) hasta (+3), que considera solo los valores enteros y donde los valores negativos representan la sensación de frío; los positivos, la de calor; y el valor 0, la sensación térmica neutral. Otra parte del estudio consistió en que los participantes controlaran las condiciones térmicas ambientales, ajustando estas hasta que se sintieran en confort. El modelo de Fanger combina las teorías de balance térmico con la fisiología y la termorregulación para determinar un rango de temperaturas de confort, en las cuales los ocupantes del edificio se sienten bien. De acuerdo con estas teorías, el cuerpo humano emplea procesos fisiológicos como sudoración, temblor y vasodilatación, con el objetivo de mantener el balance térmico entre el calor producido por el metabolismo y la pérdida de calor a través del cuerpo. Mantener este balance de calor es la primera condición para conseguir una sensación térmica neutral. Sin embargo, Fanger observó que el sistema termorregulador del hombre es tan eficiente que es capaz de crear equilibrio térmico dentro de amplios límites de variables ambientales, incluso aunque no exista confort (Godoy Muñoz, 2012).

Para ser capaz de predecir las condiciones en las que tiene lugar la neutralidad térmica, Fanger investigó los procesos fisiológicos del cuerpo que se suceden cerca de la neutralidad. Finalmente, determinó que los únicos procesos fisiológicos que influyen en el balance térmico en este contexto son: la temperatura media de la piel y la tasa de sudoración, procesos que están en función del nivel de actividad. Con posteriores investigaciones, Fanger obtuvo una relación lineal, justamente, entre nivel de actividad y tasa de sudoración. Otra investigación, donde

participantes con una ropa estándar tomaban parte de una serie de pruebas dentro de una cámara térmica mientras realizaban cuatro niveles de actividad diferentes, sirvió para evidenciar una relación lineal entre nivel de actividad y temperatura de la piel. Tras sustituir estos dos valores por sus respectivas regresiones lineales en la ecuación de balance térmico, Fanger obtuvo su ecuación de confort, la cual predice las condiciones necesarias para que el ocupante sienta neutralidad térmica (Macias *et al.*, 2015).

El análisis del confort térmico constituye un tema recurrente en los estudios de caso y los análisis de consumo de energía asociados a la sostenibilidad de una construcción. En los últimos cinco años se advirtió que los países en vías de desarrollo están empezando a incorporar conceptos de sostenibilidad asociados a la resolución de problemas típicos de la región, como los sismos y el uso de materiales reciclados (Sekhar y Nayak, 2018). Un ejemplo de esta nueva tendencia es el desarrollo de un suelo construido sobre neumáticos reciclados que absorben los movimientos producidos por un terremoto, destinado a la construcción de hábitats en Ecuador.

Tradicionalmente, estos estudios se centraban en medir los espacios interior y exterior con el fin de determinar las características físicas de los materiales, consumos de energía relacionados con la normativa del país en el que se hiciera la investigación. Hoy, existe una creciente preocupación en Europa occidental de que un mayor aislamiento y estanqueidad de los edificios residenciales aumenta el riesgo de sobrecalentamiento. En tal sentido, Jones, Goodhew y de Wilde (2016) efectuaron el monitoreo de la temperatura de dos casas idénticas en el suroeste del Reino Unido que fueron construidas con bajos estándares de energía (Código para hogares sostenibles Nivel 5). Los datos de temperatura se examinaron utilizando los criterios establecidos de sobrecalentamiento estático (Guía CIBSE A) y un estándar de confort térmico adaptativo (BSEN15251). Se encontró que las casas pueden considerarse incómodamente cálidas durante el verano y corren el riesgo de sobrecalentarse. El estudio sugirió que el comportamiento de los ocupantes juega un papel importante en la reducción o aumento de las temperaturas internas.

Así también, se ha asociado el confort térmico al consumo de recursos naturales el cual afecta el medio ambiente de la región respectiva. Eso ocurrió en el estado de Jammu y Cachemira en la India, que experimentó una grave crisis energética debido a la baja disponibilidad de energía *per cápita*. Tal situación obligó a la población a un extensivo consumo de madera, que condujo a la deforestación del entorno, por lo que fue obligatorio avanzar hacia una estrategia energética sostenible completa. Un estudio (Ahmed, Qayoum y Mir, 2019) pudo determinar que un eficiente y sostenible aislamiento térmico de los edificios era una gran oportunidad para generar e incentivar el ahorro de energía. Este se centró en el uso de nuevos materiales aislantes que incorporan componentes reciclados y

sostenibles. El uso constante de materiales aislantes en los edificios, no solo redujo el consumo de energía, sino que además redujo la emisión de gases de efecto invernadero y proporcionó un mejor confort térmico interior. De esta forma, se empleó aislantes naturales como lana de oveja, lana de cabra y crin de caballo, que se procesan y caracterizan mejor en términos de absorción de humedad, conductividad térmica, análisis termo-gravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC).

Entre otro de los trabajos revisados destaca el de Fernández, Domínguez, Alonso y Martín (2019), sobre confort térmico y calidad del aire interior (IAQ) en edificios residenciales con diferentes grados de hermeticidad, en dos climas en España. El proyecto comparó el comportamiento de las áreas ocupadas de día y las de noche. El IAQ de los edificios estudiados, erigidos antes de que las regulaciones de eficiencia energética estuvieran vigentes (1939-1979) y carentes de ventilación mecánica, se comparó con su estanqueidad. La razón de ese enfoque fue que, en tales circunstancias, el cambio de aire depende de una ventilación natural no controlada (= abrir ventanas), en consecuencia, de la temperatura exterior. La humedad relativa también se tuvo en cuenta, dada la condensación que puede inducirse cuando la ventilación es insuficiente. Finalmente, se pudo determinar que, en invierno, en ambos climas, los niveles de CO₂ fueron superiores a 1200 ppm, con promedios del orden de 1900 ppm en Madrid y 1400 ppm en Sevilla, y más altos durante la noche que durante el día. Los cambios de aire cada hora, mediados por la infiltración, parecían ser insuficientes para mantener la casa en condiciones saludables, además de presentarse un alto riesgo por condensación superficial en las viviendas más herméticas. Es decir, y a pesar de tener ventilación forzada, los edificios necesitaban de una ventilación natural.

Por último, cabe mencionar la investigación de Chowdhury y Neogi (2019), cuyo propósito fue analizar el rendimiento térmico de paredes y techos, de uso común en el sector de la construcción residencial en la India. Esto se llevó a cabo mediante la determinación del coeficiente global de transferencia de calor o el valor U, utilizando la instalación de prueba de caja caliente protegida. El procedimiento de prueba general estuvo de acuerdo con BS EN ISO 8990: 1996. Posteriormente, se estudió el efecto de la variación de la temperatura diferencial del aire sobre el coeficiente global de transferencia de calor del techo de concreto de cemento reforzado y tres tipos de tipologías usados en la construcción de paredes de ladrillo hechos en arcilla cocida. A partir del análisis de regresión, se pudo evaluar fácilmente el valor U de las paredes y el techo para cualquier temperatura diferencial, según lo experimentado por los edificios en varias zonas climáticas en la India. Asimismo, fue posible determinar que los edificios proporcionaban confort térmico a través de la interacción entre el ambiente externo y los elementos constructivos que lo conforman, paredes, techos y acristalamientos. Un buen reconocimiento y análisis previo del rendimiento térmico de los materiales empleados en paredes, techos

y acristalamientos puede, en definitiva, ayudar a estimar las cargas de calefacción o refrigeración en los sistemas de ventilación y aire acondicionado propuestos.

METODOLOGÍA

El presente proyecto expone un estudio de caso, en el cual se emplearon dos métodos: el primero, definido por el protocolo dado por la norma ISO 7730, corresponde al análisis de aspectos climatológicos del entorno, habitual en este tipo de estudios (temperatura, humedad, velocidad del viento, entre otros); y el segundo, a una caracterización de los materiales existentes que tiene como objetivo evaluar su inercia térmica a través de herramientas estáticas de análisis de confort térmico (figura de Mahoney y diagrama de Givoni).

La norma ISO 7730 Método Fanger establece que no solo el balance térmico es necesario en un espacio para tener confort térmico; además de tener una temperatura adecuada, se debe tener en cuenta:

- Las características del vestuario: aislamiento y área total del mismo.
- Las características del tipo de trabajo: carga térmica metabólica y velocidad del aire.
- Las características del ambiente: temperatura seca, temperatura radiante media, presión parcial del vapor de agua en el aire y velocidad del aire.

Tomando como punto de partida el modelo, se establecieron las siguientes características:

a) Características del vestuario.

En este caso, se determinó un aislamiento medio vestuario completo, 1.0 clo. (clothig). Unidad térmica equivalente una resistencia térmica de 0,18 m² hr °C/Kcal (Castillo y Huelsz, 2017)-

Aquí, los usuarios del hábitat analizado llevaban ropa para protegerse del frío de la zona.

b) Características del trabajo.

Considerando la carga térmica metabólica y la velocidad del aire, se usó la figura establecida por la norma UNE ISO 7726:2002 que determina este valor a partir de las características del vestuario, la temperatura media y la velocidad del aire (Figura 4).

c) Características del ambiente.

En esta fase de la investigación se recopiló toda la información del entorno del hábitat analizado, la cual luego se comparó con los datos obtenidos en el interior del hábitat. Para ello se emplearon dos equipos que midieron directamente el índice térmico WBGT (Wet Bulb Globe Temperature), además de la temperatura, humedad y temperatura del globo negro. El instrumento empleado fue el modelo HT30 Extech: un medidor de la velocidad del aire y la humedad (Figura 1).

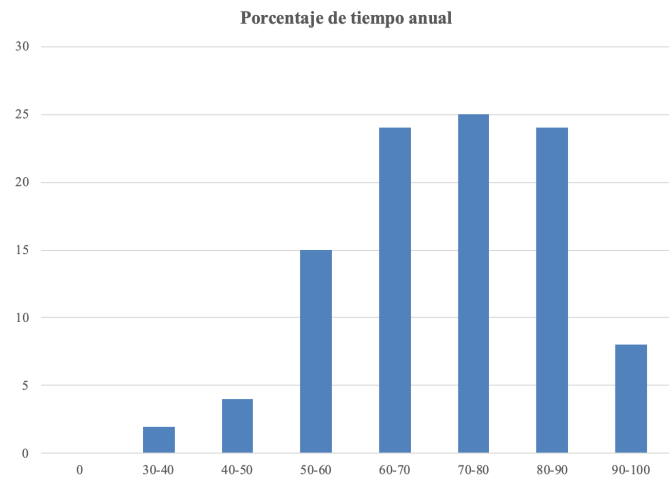


Figura 1. Temperatura del aire. Fuente: Elaboración del autor.

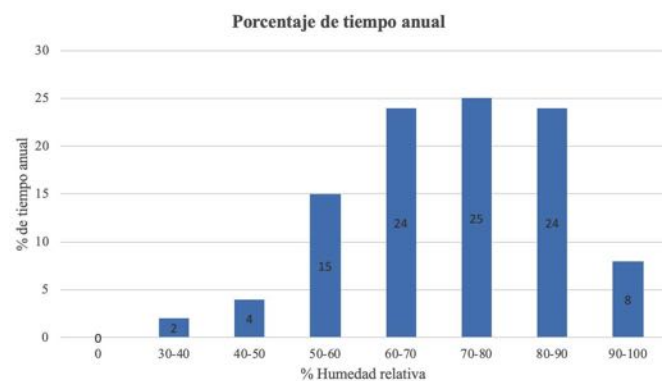


Figura 2. Humedad relativa. Fuente: Elaboración del autor.

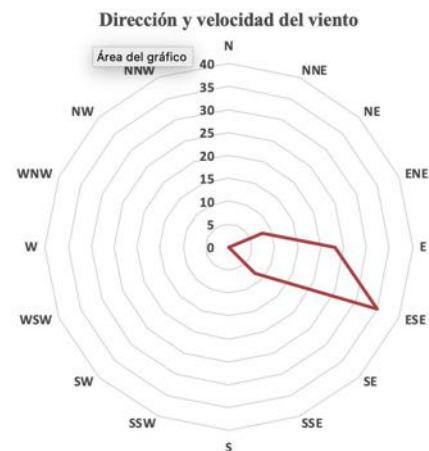


Figura 3. Rosa de los vientos de la zona. Fuente: Elaboración del autor.

Estos son los valores que se tomaron para el cálculo:
 Tg: 17.7 ; Ta:16.2 ; Va:0.20 m/s ; Hr:67% ; M:1.2met.

Vestuario Clo	Temperatura Operativa °C	Velocidad relativa del aire m/s							
		<0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,0
0,5	18	-2,01	-2,01	-2,17	-2,38	-2,70			
	20	-1,41	-1,41	-1,58	-1,76	-2,04	-2,25	-2,42	
	22	-0,79	-0,79	-0,97	-1,13	-1,36	-1,54	-1,69	-2,17
	24	-0,17	-0,20	-0,36	-0,48	-0,68	-0,83	-0,95	-1,35
	26	0,44	0,39	0,26	0,16	-0,01	-0,11	-0,21	-0,52
	28	1,05	0,98	0,88	0,81	0,70	0,61	0,54	-0,31
	30	1,64	1,57	1,51	1,46	1,39	1,33	1,29	1,14
	32	2,25	2,20	2,17	2,15	2,11	2,09	2,07	1,99
1	16	-1,18	-1,18	-1,31	-1,43	-1,59	-1,72	-1,82	-2,12
	18	-0,75	-0,75	-0,88	-0,98	-1,13	-1,24	-1,33	-1,59
	20	-0,32	-0,33	-0,45	-0,54	-0,67	-0,76	-0,83	-1,07
	22	0,13	0,10	0,00	-0,07	-0,18	-0,26	-0,32	-0,52
	24	0,58	0,54	0,46	0,40	0,31	0,24	0,19	0,02
	26	1,03	0,98	0,91	0,86	0,79	0,74	0,70	0,58
	28	1,47	1,42	1,37	1,34	1,28	1,24	1,21	1,12
	30	1,91	1,86	1,83	1,81	1,78	1,75	1,73	1,67

Figura 4. Nivel de actividad 1.2 met. Fuente: Elaboración del autor.

Las mediciones se realizaron entre las 14:00 y las 05:00 horas, de forma periódica, una vez a la semana, durante los meses de agosto, septiembre y octubre, y se compararon los datos exteriores con los datos del interior del hábitat (Figura 7). Es necesario aclarar que, para el cálculo de la temperatura operativa, en este caso, solo se tuvieron en cuenta las temperaturas diurnas ya que las nocturnas están fuera de los rangos establecidos por la norma (Figura 4).

Las mediciones nocturnas permitieron determinar que el hábitat no presenta confort térmico a partir de las 21:00 horas, debido a las bajas temperaturas exteriores; el hábitat analizado no tiene materiales que mantengan esta temperatura operativa.

Antes de determinar la temperatura operativa es necesario calcular la temperatura radiante media:

$$Tr = tg + 1,9$$

$$Tr = 17,7 + 1,9$$

$$Tr = 18,74$$

$$To = A.ta + (1-A).tr$$

$$To = 0,6.16,2 + (0,4).18,74$$

$$To = 17,21^{\circ}\text{C}$$

ANÁLISIS DEL BALANCE TÉRMICO CORRESPONDIENTE A LAS CONDICIONES EVALUADAS

La zona geográfica estudiada fue el distrito de Bosa en el sur de Bogotá, la que presenta variaciones de temperatura entre el día en la noche: durante el día la temperatura promedio ronda los índices de confort térmico (18-20 grados centígrados) (IDEAM, 2007). Con estas temperaturas los materiales empleados hasta ahora funcionarían correctamente, sin embargo, en la noche y la madrugada las temperaturas mínimas son de 7.6 grados centígrados y la humedad relativa llega al 70%, incrementando la sensación térmica de frío. A partir de estas mediciones se emplearon dos herramientas tradicionales en este tipo de análisis: la Figura de Mahoney y el gráfico de Givoni (Figuras 5 y 6).

En la figura de Mahoney se especifica que los muros y la cubierta deben tener materiales con una alta inercia térmica (en el momento de hacer el análisis, la cubierta presentó una baja inercia térmica) y que el hábitat debería poseer unas aperturas de entre

ESTRÉS TÉRMICO												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
DÍA	Confort	Confort	Confort	Confort	Confort	Confort	Confort	Confort	Confort	Confort	Confort	Confort
NOCHE	Frío	Frío	Frío	Frío	Frío	Frío	Frío	Frío	Frío	Frío	Frío	Frío

INDICADORES												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
H1 Ventilación esencial (calor y humedad)												
H2 Ventilación deseable (calor y humedad)												
H3 Protección contra la lluvia												
A1 Inercia térmica	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
A2 Dormir fuera												
A3 Problemas con el frío												

RECOMENDACIONES ARQUITECTURALES												
PLAN MASA												
Planos compactos con patios interiores												
ESPACIO ENTRE EDIFICIOS												
Planos compactos												
CIRCULACIÓN DEL AIRE												
Circulación del aire inútil												
DIMENSIONES DE LAS ABERTURAS												
Pequeñas, 15 a 25% de la superficie de los muros												
POSICIÓN DE LAS ABERTURAS												
PROTECCIÓN DE LAS ABERTURAS (*)												
Protección contra la radiación solar directa												
MUROS												
Construcción pesada para fuerte inercia térmica; desfase horario superior a 8 horas												
TEJADO												
Construcción pesada para fuerte inercia térmica; desfase horario superior a 8 horas												
ESPACIOS EXTERIORES (*)												

Figura 5. Figura de Mahoney para la zona de Bosa. Fuente: Elaboración del autor.

GRÁFICO PSICOMÉTRICO DE CONFORT - URBANO
 CARTA DE GIVONI
 Gráfico aplicable a la ciudad de Bogotá Colombia

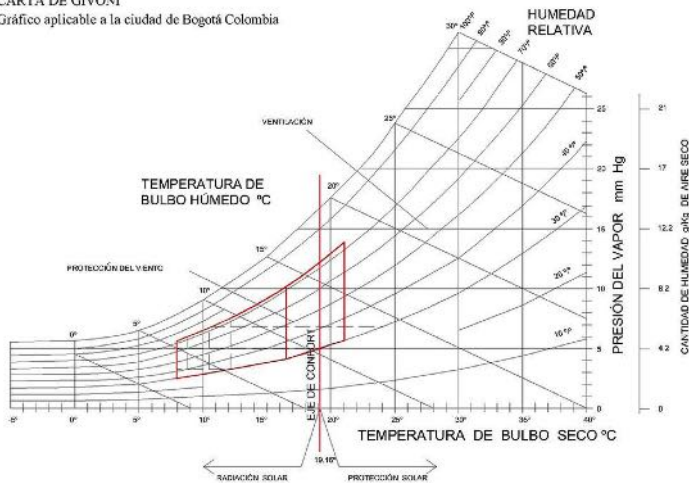


Figura 6. Gráfico de Givoni. Fuente: Elaboración del autor.

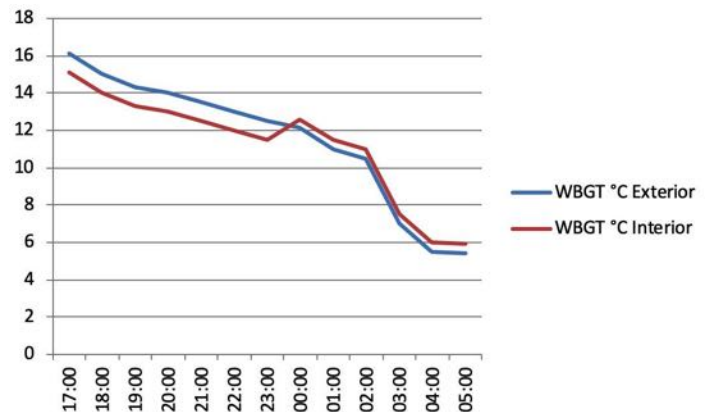


Figura 7. Temperatura media exterior e interior entre las 17:00 y las 5:00 horas. Fuente: Elaboración del autor.

15 y 25% en fachadas (Figura 5). A partir de este análisis inicial, el proyecto se enfocó en la cubierta de la vivienda, teniendo en cuenta los materiales y el análisis del descenso de la temperatura interior (Figura 7).

LA CUBIERTA

Con el fin de incrementar el confort térmico del hábitat de una forma sostenible, se llevó a cabo una caracterización de los materiales usados en la construcción existente considerando su densidad, calor específico, conductividad térmica y difusión térmica (Figura 9). Tomando como base los datos obtenidos y también las variables "economía", "sostenibilidad" y "conductividad térmica", se seleccionaron los materiales más viables, con el fin de mitigar las falencias detectadas en el estudio térmico realizado (Figura 10).

Aunque el fibrocemento y el Tetrapak tenían precios similares, se encontraron otros aspectos favorables para usar este último: leve disminución en la conductividad térmica y baja contaminación generada por un material que es producto del reciclaje. No obstante, se comprobó que, si se usaba solamente una teja de este material, no se obtenía el aislamiento térmico necesario, por lo que, además de las tejas exteriores, se usaron láminas Tetrapak para conformar un falso techo que le permitiera al hábitat tener un cámara de aire entre los dos elementos (Figura 10).

Para responder a las exigencias de los usuarios, se tomó la decisión de cambiar la cubierta actual construida en zinc, sobre una estructura de madera en mal estado. La nueva cubierta se construyó en Tetrapak, usando las vigas en madera existentes -que fueron limpiadas y reforzadas-, con un falso techo de láminas, cuyo espesor fue de 2cm y fueron fabricadas con el mismo material, con el fin de crear un aislamiento que mitigara las bajas temperaturas nocturnas detectadas mediante el análisis climático de la zona. Se agregaron como aislantes térmicos cubos de heno con una altura de 30cm; material que fue seleccionado por su baja

Material	Densidad (kg/m³)	Conductividad térmica(W/(m·K))
Teja de zinc	7140	106-140
Ladrillo de mampostería	1700	0,658
Madera de pino	650	0,163
Vidrio	2700	0,81
Tejas de fibrocemento	1250	0,36

Figura 8. Caracterización de los materiales de usados en la construcción de la vivienda. Fuente: Elaboración del autor.

Descripción	Densidad kg/m³	Conductividad térmica W/m² °C	Precio USD	Huella de carbono kg/CO²
Fibrocemento	1250	0,36	\$9	11,84
Panel tipo sándwich	50	0,024	\$28	12,5
Poliéster	38	0,04	\$15	15,04
Tetrapak	900	0,25	\$8	0,5

Figura 9. Caracterización de los materiales que mejoran el aislamiento térmico. Fuente: Elaboración del autor.

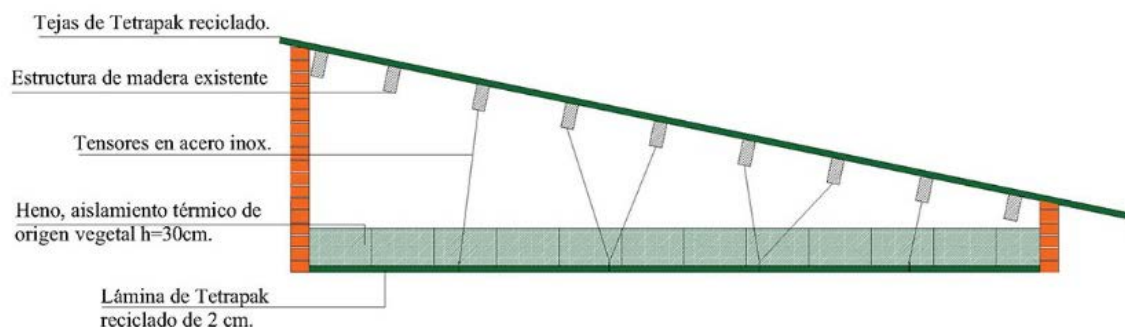


Figura 10. Sección de la nueva cubierta propuesta. Fuente: Elaboración del autor.

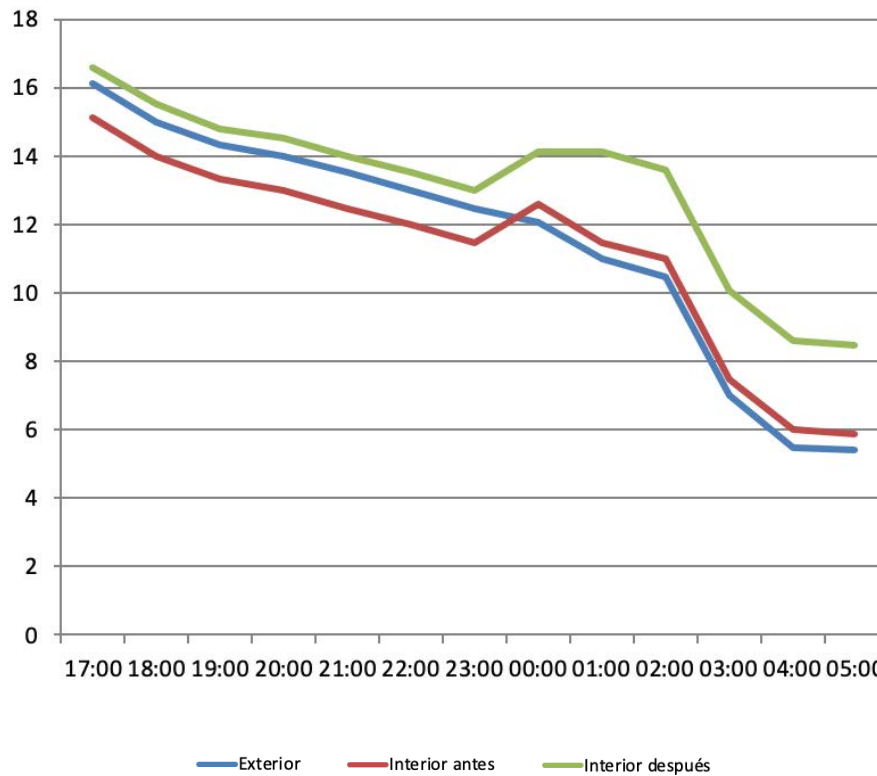


Figura 11. Temperatura media antes y después de la solución propuesta. Fuente: Elaboración de los autores.

Material	Precio/m ²	CO ² kg
Tejas en fibro-cemento	\$9	11,85
Tejas en Tetrapak	\$8	0.5

Figura 12. Fibro-cemento y Tetrapak. Precio y CO². Fuente: ITEC (www.itec.cat).

conductividad térmica, su bajo precio y su origen vegetal, lo que conlleva una carga muy baja por emisiones de CO². El uso de materiales sostenibles está directamente relacionado con su disponibilidad geográfica, una de las variables tenidas en cuenta para el cálculo de la huella de carbono de cualquier material (Sekhar y Nayak, 2018).

RESULTADOS

En este punto, se comprobó el aumento de la temperatura en el interior del hábitat y se hicieron nuevas mediciones para determinar la temperatura media, la humedad y el índice de estrés térmico. Asimismo, se compararon las mediciones antes y después de la incorporación de la nueva cubierta, observándose que la diferencia entre la temperatura

exterior e interior se amplió en 6 grados, de manera que en la madrugada se consiguió llegar a 13 grados en promedio al interior del hábitat (Figura 11).

El análisis de las mediciones climatológicas arrojó los siguientes resultados: el hábitat seleccionado no presentaba confort térmico en la noche ni en la madrugada; la inercia térmica de los materiales empleados en su construcción era muy baja; los materiales reutilizados tanto en la fachada como en la cubierta (láminas, zinc y tejas de asbesto cemento, que tienen una inercia térmica de 0,8 (W/ (m·K)), no contribuían a optimizar la inercia térmica. Por lo tanto, se determinó que era necesario sustituir estos cerramientos temporales empleados en la construcción de la cubierta de la vivienda, los cuales afectaban el confort térmico del hábitat analizado (Figura 7).

Los análisis climatológicos en los que se hicieron mediciones de temperatura y humedad permitieron

determinar el índice WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) de estrés térmico y establecer que la diferencia entre la temperatura externa e interna oscilaba entre uno y medio grado centígrados. Ahora bien, la temperatura en esta zona de Bogotá entre las 3 y 5 de la madrugada es cercana a los 5 grados, es decir, los usuarios estaban realmente expuestos a temperaturas muy bajas y fuera de la temperatura operativa de confort térmico (17,21°C), las cuales ciertamente se acercaban a aquellas que soporta un habitante de la calle en esta ciudad (Figura 11). Con todo, se detectó un incremento de 1°C después de las 23:00 debido al uso de electrodomésticos, principalmente la televisión.

Este estudio pudo establecer que es posible aumentar el confort térmico de un hábitat informal utilizando materiales sostenibles, lo que puede ser un modelo a seguir en los planes de mejoramiento de barrios, planteados por el gobierno local, esto es, sustituyendo un procedimiento en el que siempre se han empleado materiales altamente contaminantes, como el cemento y el acero, por uno en el que se utilicen otros materiales generados a partir del reciclaje.

Este proyecto demostró que es posible construir un hábitat sustentable (al usar materiales reciclados y limitar el uso del cemento) sin afectar el presupuesto destinado para su construcción y, a su vez, mejorar el confort térmico. Este hallazgo puede ser implementado en las políticas actuales de mejoramiento de vivienda planteadas desde los años ochenta y en donde la sustentabilidad no era una variable tenida en cuenta para la elaboración de la norma. Se calculó que el uso del Tetrapak en este mejoramiento permitió disminuir las emisiones de CO² en un 80% (Figura 12).

DISCUSIÓN.

Es necesario remarcar que todos los estudios de confort térmico latinoamericanos ponen especial énfasis en encontrar soluciones económicas que mitiguen las condiciones climáticas, con el principal objetivo de reducir el uso de sistemas de climatización, dado los altos costos de instalación, mantenimiento y el alto consumo eléctrico asociado a su uso. Sin embargo, se debe aclarar que la sustentabilidad de este objetivo no es evidente para la población. Es muy interesante, en ese sentido, encontrar estudios como el de Macias *et al.* (2015), que evaluó la reflectancia solar de los techos de viviendas en Guayaquil, Ecuador, con el fin de aminorar el uso de sistemas tradicionales de climatización, y concluyó que el uso de la chapa de acero disminuía la temperatura interior gracias al aumento de la reflectancia.

Aunque se pudo determinar que la variable económica no es la única en juego, algunas de las investigaciones

latinoamericanas relacionadas con el confort se han centrado en otros aspectos, entre ellos: la percepción psicológica en Brasil (Silveira Hirashima, de Assis y Nikolopoulou, 2016), casos de estudio que analizan la relación entre la iluminación y la hidrometría en Argentina (Boutet, Hernández y Jacobo, 2020), y una propuesta para un nuevo modelo de confort adaptativo en Chile, que busca adaptar el límite inferior del umbral de confort térmico con el fin de desarrollar un estándar que refleje mejor las necesidades de los habitantes y la cultura socioeconómica (Pérez-Fargallo *et al.*, 2018) including adaptation to external temperatures, opening windows and changing clothing. In this regard, two international standards provide the fundamental basis to model the necessary equations: EN 16798 (formerly 15251. Así también cabe destacar el trabajo de Castillo y Huelisz (2017) donde se determinó que el confort térmico producido cuando hay ventilación natural en climas cálidos en Méjico define estrategias bioclimáticas para espacios urbanos existentes, basadas en componentes morfo-tipológicos, condiciones de microclima urbano y requisitos de confort para todo tipo de ciudadanos en Méjico y España.

La definición de confort térmica específica que: "El consumo de energía o temperatura interior de un espacio determinado, bajo ciertas cargas, se puede establecer considerando estándares de confort térmico; por lo tanto, sigue siendo crucial definir adecuadamente esos estándares para lograr la comodidad de los usuarios y reducir el consumo de energía" (Pérez-Fargallo *et al.*, 2018, p. 95). Es decir, se trata de neutralizar o evitar las condiciones climáticas dañinas y potenciar las buenas en relación a la comodidad de los usuarios.

Los primeros estudios e investigaciones sobre el confort térmico se centraban inicialmente en el uso de la ropa en las estaciones de invierno y verano (Heathcote, 2011). Esta metodología se llevó a la arquitectura, al acondicionamiento del espacio, a las condiciones climáticas: aire acondicionado, ventilación, apertura de las ventanas, aislamientos, entre otras medidas.

Hay que indicar que en los países latinoamericanos ubicados en la zona del trópico no es habitual implementar sistemas de calefacción ni aire acondicionado; este tipo de sistemas es solamente utilizado por grandes empresas y cadenas hoteleras.

Concretamente, en la vivienda informal analizada, los materiales empleados eran de carácter temporal, con el objetivo de protegerse simplemente de la intemperie; el propietario del hábitat no era consciente de los peligros asociados al uso de materiales prohibidos en otros países, como el asbesto cemento. En Colombia, la normativa que lo prohíbe desde 2019.

CONCLUSIONES

El hábitat estudiado en la investigación aquí expuesta presentaba deficiencias en su proceso constructivo debido al carácter temporal de los materiales usados para su construcción. El objetivo principal del trabajo, incrementar el confort térmico de dicho hábitat, se cumplió parcialmente, porque el único elemento constructivo que se pudo optimizar fue la cubierta, a causa de limitaciones de tiempo y de dinero propias del proyecto.

Sin embargo, el uso de materiales reciclados no es un aspecto inédito en investigaciones enfocadas en la vivienda sostenible, según lo expone Spagnoli: "Hay que señalar que los paneles y muebles de las paredes interiores están hechos de materiales reciclados, mezclados con aglomerados, para aumentar la sostenibilidad del proyecto y reducir los gastos" (2020, p. 163).

El análisis y la caracterización de los materiales que podrían emplearse en el mejoramiento del hábitat fue la herramienta técnica que permitió justificar el uso del Tetrapak, cuyas cualidades decisivas fueron su bajo precio y las bajas emisiones de CO² generadas en su proceso de fabricación.

A partir de este análisis, se revela la necesidad de incorporar estándares internacionales de confort térmico en la construcción de vivienda dirigida a las clases sociales más bajas, en los países donde no estén contemplados y, de esa forma, evitar que en los procesos de autoconstrucción, como el del presente objeto de estudio, no se considere el confort térmico ni el empleo de materiales prohibidos en otros países, como es el caso del asbesto cemento.

No todos los materiales planteados en principio pudieron ser usados en el proyecto: uno de los objetivos era implementar el uso de la tierra en hábitats informales urbanos, sin embargo, el propietario respectivo manifestó que no le interesaba, ni autorizaba su utilización, por la fragilidad del material y porque no era posible garantizar la seguridad en la fachada del hábitat.

Con todo, la incorporación de un material sostenible garantiza la sustentabilidad de este tipo de hábitats, es decir, es posible construir un hábitat sustentable usando materiales reciclados y de precios bajos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmed, A., Qayoum, A. y Mir, F. Q. (2019). Investigation of the thermal behavior of the natural insulation materials for low temperature regions. *Journal of Building Engineering*, 26, 100849. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100849>

Boutet, M. L., Hernández, A. L. y Jacobo, G. J. (2020). Methodology of quantitative analysis and diagnosis of hygro-thermal and lighting monitoring for school buildings in a hot-humid mid-latitude climate. *Renewable Energy*, 145, 2463–2476. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.009>

Castillo, J. A. y Huelsz, G. (2017). A methodology to evaluate the indoor natural ventilation in hot climates: Heat Balance Index. *Building and Environment*, 114, 366–373. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.027>

Chowdhury, D. y Neogi, S. (2019). Thermal performance evaluation of traditional walls and roof used in tropical climate using guarded hot box. *Construction and Building Materials*, 218, 73–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.032>

Da Silveira Hirashima, S. Q., de Assis, E. S. y Nikolopoulou, M. (2016). Daytime thermal comfort in urban spaces: A field study in Brazil. *Building and Environment*, 107, 245–253. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.006>

Fernández-Agüera, J., Domínguez-Amarillo, S., Alonso, C. y Martín-Consuegra, F. (2019). Thermal comfort and indoor air quality in low-income housing in Spain: The influence of airtightness and occupant behaviour. *Energy and Buildings*, 199, 102–114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.052>

Godoy Muñoz, A. de J. (2012). El confort térmico adaptativo. Aplicación en la edificación en España. Tesis de Maestría. Universitat Politècnica de Catalunya. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/18763>

Heathcote, K. (2011). El comportamiento térmico de los edificios de tierra. *Informes de La Construcción*, 63(523), 117–126. DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.10.024>

IDEAM (2007). Portal GeoNetwork para datos espaciales e información. Sistema de Información Ambiental del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Recuperado de <http://geoservicios.ideam.gov.co:8080/geonetwork/srv/spa/catalog.search?jsessionid=0758FF83B771AFADEBCB46A817AD9B67#/search?facet.q=topicCat%2FclimatologyMeteorologyAtmosphere>

Jones, R. V., Goodhew, S. y de Wilde, P. (2016). Measured Indoor Temperatures, Thermal Comfort and Overheating Risk: Post-occupancy Evaluation of Low Energy Houses in the UK. *Energy Procedia*, 88, 714–720. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.049>

Macias, J., Soriano, G., Sánchez, H. y Canchingre, Y. (2015). Assessment of solar reflectance of roofing assemblies of dwellings in Guayaquil, Ecuador. *WIT Transaction on Ecology and The Environment*, 195, 307–315. DOI: <https://doi.org/10.2495/ESUS150261>

Pérez-Fargallo, A., Pulido-Arcas, J. A., Rubio-Bellido, C., Trebilcock, M., Piderit, B. y Attia, S. (2018). Development of a new adaptive comfort model for low income housing in the central-south of Chile. *Energy and Buildings*, 178, 94–106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.030>

Robledo-Fava, R., Hernández-Luna, M. C., Fernández-de-Córdoba, P., Michinel, H., Zaragoza, S., Castillo-Guzman, A. y Selvas-Aguilar, R. (2019). Analysis of the Influence Subjective Human Parameters in the Calculation of Thermal Comfort and

Energy Consumption of Buildings. *Energies*, 12(8), 1531. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12081531>

Sekhar, D. y Nayak, S. (2018). Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, 166, 531–536. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.01.125>

Spagnoli, F. (2020). A New Inclusive Housing Prototype. En *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics* (pp. 163-175). Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20444-0_16





POTENCIAL DE ENFRIAMIENTO GEOTÉRMICO PARA EDIFICACIONES EN ZONA ÁRIDA

Recibido 14/08/2019
Aceptado 12/11/2019

THE GEOTHERMAL COOLING POTENTIAL FOR BUILDINGS IN ARID ZONES

MARIO CÚNSULO

Ingeniero Civil, Docente adjunto e Investigador
Universidad Nacional de San Juan - Instituto de Estudios
en Arquitectura Ambiental INEAA -Consejo Nacional de
Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
<https://orcid.org/0000-0001-7981-6683>
mcunsulo@unsj.edu.ar

SANTIAGO TOSETTI

Doctor en Ingeniería
Investigador Instituto de Automática (INAUT)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
(CONICET) - Universidad Nacional de San Juan Argentina
<https://orcid.org/0000-0001-9255-5422>
stosetti@gmail.com

ALEJANDRA KURBÁN

Doctora en Arquitectura y Urbanismo
Docente titular Facultad de Arquitectura
Universidad Nacional de San Juan - Consejo Nacional de
Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
<https://orcid.org/0000-0002-8795-1129>
akurban@unsj.edu.ar

EDUARDO MONTILLA

Arquitecto
Docente Titular Facultad de Arquitectura Urbanismo y Diseño
Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina
<https://orcid.org/0000-0001-7814-5734>
alejo_montilla@yahoo.com.ar

RESUMEN

En el presente artículo se analiza cuantitativamente el potencial geotérmico para ser usado como sistema pasivo de refrescamiento edilicio en un ambiente árido urbano, tomando como caso de estudio el Área Metropolitana de San Juan (República Argentina). Se utiliza como insumo la base de datos climáticos y meteorológicos correspondiente a la estación verano, obtenida en el Complejo Universitario Islas Malvinas (CUIM) de la Universidad Nacional de San Juan, lugar donde el Instituto de Estudios en Arquitectura Ambiental "Arq. Alberto Papparelli" (INEAA) registra: temperatura del suelo, a distintas profundidades, y parámetros meteorológicos ambientales. Los resultados están relacionados con la identificación de gradientes y profundidades óptimas para el aprovechamiento del recurso como Sistema Pasivo de Refrescamiento Geotérmico, a fin de proveer condiciones de confort higrotérmico en zonas urbanas áridas durante el verano. En promedio, se obtiene una diferencia máxima de 8,7°C entre la temperatura del aire y la de la tierra, a una profundidad de 3m. La longitud de los conductos enterrados necesaria resulta de 64m para una velocidad del aire de 3m/s, la cual se reduce a 27m para una velocidad de aire de 2m/s.

Palabras clave

arquitectura bioclimática, sistemas pasivos, ahorro energético.

ABSTRACT

In this article geothermal potential is quantitatively studied to be used as a passive building cooling system in an arid urban environment. The San Juan Metropolitan Area, Argentina is taken as a case study. A climate and weather database for the summer season was used as input. It was generated at the National University of San Juan's Islas Malvinas University Complex (CUIM), where the Arq. Alberto Papparelli Institute for Studies in Environmental Architecture (INEAA) records data on soil temperature at different depths and meteorological parameters in the environment. The results identify gradients and optimal depths to use this resource as a passive geothermal cooling system in order to provide hygrothermal comfort in arid urban zones during the summer. There was an average maximum difference of 8.7 °C between the air temperature and the ground temperature at a depth of 3m. The required length of the buried tubes is 64m for an air speed of 3 m/sec, which decreases to 27m for an air speed of 2m/s.

Keywords

bioclimatic architecture, passive systems, energy savings

INTRODUCCIÓN

Los sistemas pasivos de acondicionamiento térmico de viviendas se presentan como una alternativa válida para lograr el confort higrotérmico, en particular para aquellas personas que no pueden acceder al uso de sistemas que utilizan energías convencionales, por su elevado costo. El ahorro energético que se obtendría con la implementación del concepto de arquitectura sustentable concretamente en la planificación y ejecución de viviendas sociales produciría un gran impacto en la demanda de la matriz energética local, ya que se podría usar este ahorro energético en actividades de producción. Al mismo tiempo, se consigue, mediante esta perspectiva, una reducción de las peligrosas emisiones de CO₂ a la atmósfera (Kurbán, Cúnsulo, Álvarez, Montilla y Ortega, 2015).

La provincia de San Juan, se encuentra localizada en el centro-oeste de la República Argentina (latitud sur 31°32'; longitud oeste 69° 31'), en la diagonal árida Sudamericana. El Área Metropolitana de San Juan (AMSJ), ubicada al suroeste de la provincia; presenta un clima urbano árido (índice Thornthwaite = 0.0794) y continental (Gorczynsky [K]= 34.12). Posee elevadas amplitudes térmicas, tanto diarias como estacionales y anuales (17,3°C), bajos tenores de humedad (promedio anual = 40,92%), régimen estival de escasas precipitaciones (anual = 77,72mm), una elevada radiación solar en todo el año (490W/m²), como consecuencia de una nubosidad cada más reducida, y un déficit de agua de 979,28mm. Durante todo el año el viento más frecuente es del sector sur (promedio 7km/h), con ráfagas intensas asociadas a tempestades de polvo, en ocasiones, propias de un cambio de tiempo. En efecto, previo a los cambios de tiempo suele aparecer un viento local denominado "zonda", que constituye un efecto *föhn*, caracterizado por aire muy deshidratado y tórrido que puede durar desde unas horas hasta varios días (Kurbán et al., 2015).

En suma, la zona de estudio posee recursos que pueden aprovecharse para dar respuestas de confort higrotérmico a la población, al tiempo que comporta una estrategia altamente sustentable al incidir directamente en el ahorro energético y, con ello, en la disminución de la contaminación ambiental (Kurbán et al., 2015; Cabezas, 2013). Siempre que se diseñen sistemas de acondicionamiento térmico de edificios es muy importante que se valide su eficiencia a través de programas de simulación con el propósito de evaluar la pertinencia de su aplicación (Flores Larsen y Lesino, 2001).

Los insumos básicos de diseño de la mayoría de los sistemas pasivos son los registros de temperatura, radiación solar, humedad relativa y vientos; usualmente difíciles de conseguir para áreas urbanas. De ahí la importancia del banco de datos meteorológicos urbanos obtenidos en el INEAA, el cual cuenta con 20 años de registros continuados, lo que permite realizar estudios con datos certeros y confiables.

El uso de sistemas pasivos y/o híbridos para acondicionar el aire que ingresa a los edificios ha ganado creciente aceptación

en los últimos años debido al ahorro económico que se logra en los requerimientos energéticos necesarios para acondicionarlos térmicamente (Flores Larsen, Hernández, Lesino y Salvo, 2001; Bansal, Misra, Agrawal y Mathur, 2010).

No ocurre lo mismo cuando el sistema pasivo es el refrescamiento geotérmico. En San Juan, previo a la realización del proyecto que dio origen al presente artículo, no se contaba con registros de temperatura ni humedad del suelo con objetivos de aprovechamiento pasivo geotérmico. Para realizar algún tipo de estimación del recurso, se recurría a datos extraídos de otras regiones con características climáticas y edáficas generalmente diferentes a esta zona. Esta escasez de datos hacía poco confiables las posibles aplicaciones de una estrategia empleada en otras latitudes con buenos resultados bioclimáticos. Las condiciones de aridez intervienen de manera directa en las propiedades termofísicas de la tierra, por lo que no es válido simplemente extrapolar las aplicaciones a otros ambientes urbanos de contextos geográficos diferentes.

La Tierra se comporta como un gran colector y acumulador de energía. El suelo ostenta muchas propiedades térmicas potencialmente valiosas debido a su alta capacidad calorífica y gran inercia térmica. Con una densidad media de 1800-2500kg/m³, posee un calor específico de 920J/kg°K y una conductividad térmica media de 0.3W/m°K (comparada con 0.58W/m°K para el agua y 380W/m°K para el cobre). La capacidad térmica volumétrica del suelo es de alrededor de 2MJ/m³°K comparada con 4.5MJ/m³°K del agua (Iannelli y Gil, 2012). Por otra parte, su baja conductividad térmica hace que la penetración del calor en el suelo sea muy lenta, al igual que su enfriamiento (Xamán et al., 2014, Ahmed, Ip, Miller y Gidado, 2009).

Las propiedades térmicas del suelo hacen que las variaciones diurnas de la temperatura no penetren más allá de 0,5m, pero las variaciones anuales de temperatura, llegan hasta una profundidad de unos 4m. Más allá de estas profundidades, la temperatura de la tierra se mantiene constante todo el año (Iannelli et al., 2013).

La sistematización del aprovechamiento geotérmico puede realizarse utilizando el fluido aire para la transferencia térmica. En ese caso, se emplean tubos enterrados cuya función es la climatización estival o invernal del aire de ventilación. El sistema consiste en hacer circular aire desde el exterior al interior del edificio a través de conductos bajo tierra, que son los que permiten el intercambio de calor (Vidal y Vidal, 2011, Bisoniya T. 2015, Tiwari, Singh, Joshi, Shyam y Prabhakant, 2014).

Según Hollmuller y Lachal (2005), la temperatura interior que se obtiene aprovechando el potencial geotérmico es de 15°C en cualquier parte del mundo, de día o de noche, en invierno o en verano, pero estos autores no especifican la profundidad de la tubería.

Un estudio realizado en Asunción (Cohenca, Bordas y Schwartzman, 2013) indica que, a una profundidad del orden de 3,5m, se produce una estabilización de la temperatura del suelo en torno de los 23,5°C. En verano, la temperatura media ambiental es de 28,4°C siendo ésta apreciablemente superior a la media del suelo.

Investigaciones realizadas en Kusuda (EE.UU.) en 1965 determinaron que la temperatura a una profundidad mayor a 2m ya no presenta variabilidad y corresponde a la media de la temperatura anual (Baver, Gardner y Gardner, 1991).

En climas cálidos, la temperatura del suelo en verano es más fría que la temperatura exterior nocturna, pero aún muy cálida para producir un enfriamiento efectivo edilicio. Por tanto, es necesario enfriar el suelo por debajo de su temperatura natural.

Una de las experiencias llevadas a cabo en zonas de clima cálido y árido, como es el caso de San Juan, es la de Neguev (Israel). Por las características desérticas de la región, en la Universidad Ben Gurion, Sede Boquer, se experimentó cubriendo el suelo con 10cm de una capa de áridos, la cual era mojada muy temprano en la mañana. La condición fue que el suelo no fuera arenoso, a fin de que retuviera la humedad. El monitoreo consideró 10cm, 30cm y 60cm de espesor. Desde el comienzo del regado de la capa de áridos hasta que el suelo registró un equilibrio térmico, pasó aproximadamente una semana; equilibrio que se tornó continuo, siempre que no cesara el regado. Si esto último ocurría, en 5 días aumentaba la temperatura (Givoni, 1984).

Para Hazim Zaki, Al-musaed y Khalil (2005), los diseños de tubos enterrados exhiben una variada combinación en tamaño y forma: algunos sistemas tienen tubos en paralelo que terminan en una cabecera, otros presentan un prototipo radial de recolección en un sumidero central (para facilitar la eliminación de humedad) y, en otros casos, se trata sólo de un tubo. Sostienen, además, que es importante diseñar el sistema para reducir al mínimo el costo y maximizar los beneficios, y, por otra parte, que la longitud de un tubo de más de 10m, por ejemplo, es ineficiente.

De igual forma, los tubos de diámetro pequeño son más eficaces por unidad que los tubos grandes y deben colocarse lo más profundamente posible, aunque no se registra especificaciones sobre dicha profundidad (De Paepe y Janssens, 2003; Rouag, Benchabane y Mehdid, 2018).

ADQUISICIÓN DE DATOS

A efectos de evaluar el real potencial de enfriamiento del sistema geotérmico en una zona árida y ante tanta disparidad de valores en la bibliografía específica, en el INEAA se está desarrollando una investigación con medición de valores de temperatura y humedad *in situ*. Desde diciembre de 2018 se registran valores de temperatura y humedad del



Figura 1. Ubicación del área de estudio. Fuente: Pitaluga et al, 2019, p. 4.

subsuelo en un área suburbana de San Juan (Rivadavia-San Juan), en simultáneo con mediciones de parámetros ambientales.

El sector en estudio (Figura 1) se ubica en el Complejo Universitario Islas Malvinas (CUIM) de la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), complejo que congrega a varias facultades dependientes de la UNSJ. Geográficamente, se encuentra en el departamento de Rivadavia, situado al oeste de la ciudad capital de San Juan (Figura 1).

Con el fin de identificar los suelos presentes en el sector de estudio y reconocer las principales características y cualidades que permitan entender su origen, conocer sus propiedades físicas y químicas y poder clasificarlos taxonómicamente, se realizó un estudio (Pitaluga, Ocaña y Cortez, 2019) cuyos objetivos específicos fueron:

- Caracterización edafológica del sector a analizar
- Determinación de propiedades físicas de los suelos
- Muestreo para caracterización de propiedades en laboratorio
- Clasificación taxonómica de los suelos presentes

El sitio de observación se encuentra en la porción proximal del mega-abanico de Tulúm, geoforma desarrollada en el denominado valle de Tulúm, que corresponde a una depresión intermontana de origen tectónico, rellena con centenares de metros de depósitos fluviales de



Figura 2. a) Estación meteorológica, b) Calibración, c) Colocación de termocuplas en el terreno. Fuente: Elaboración de los autores.

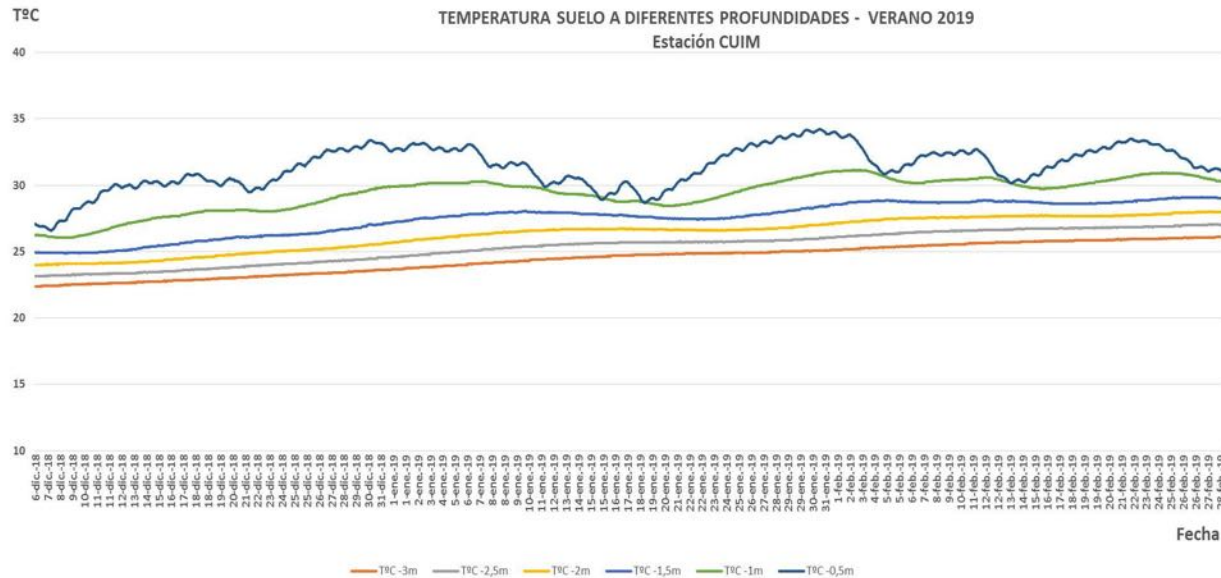


Figura 3. Temperaturas del aire y del suelo a distintas profundidades Fuente: Elaboración de los autores.

edad cuaternaria. Las muestras analizadas presentan una estructura en bloques relativamente grandes que indican que el suelo resiste a la penetración y al movimiento del agua. El tamaño promedio de los agregados individuales se puede clasificar como *grueso* a *muy grueso* y el grado de desarrollo es *muy fuerte*. Con el análisis de pH, las capas seleccionadas evidencian, asimismo, valores que oscilan entre 6.67 y 8.03, a partir de los cuales es posible clasificar al suelo como *moderadamente básico* a *neutro*. Los escasos contenidos de materia orgánica en las muestras indican la presencia de un suelo joven, desarrollado en climas secos y cálidos, derivados de materiales con texturas gruesas.

Para las mediciones geotérmicas se instalaron pares de termocuplas desde 0,50m hasta 3,00m de profundidad (Figura 2 c), con un intervalo de 0,50m y un sensor de humedad a una profundidad de 1,5m. La información se

almacenó en una tarjeta SIM colocada en el dispositivo electrónico de control que recibía la señal de los sensores enterrados. A esta información se accedió periódicamente con una notebook, la que fue complementada con los registros de una estación meteorológica automática (Figura 2 a y b), que mide temperatura y humedad relativa del aire, radiación solar, precipitaciones y presión atmosférica, entre otras variables. Los registros de ambos sistemas se realizan con intervalos de 1 hora.

PROCESAMIENTO DE DATOS DE TEMPERATURA

La información meteorológica recabada se procesó para obtener las condiciones propias del verano, considerando el período comprendido entre los meses de diciembre de

HORA	-3m	-2,5m	-2m	-1,5m	-1m	-0,5m	EXT	Dif. Aire/Suelo(-3m)
0	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,5	27,2	2,8
1	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,5	26,3	2,0
2	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	25,6	1,2
3	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	24,9	0,5
4	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	24,1	-0,3
5	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	23,3	-1,1
6	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,7	22,7	-1,7
7	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,7	22,3	-2,1
8	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,7	23,5	-0,9
9	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,7	25,1	0,7
10	24,4	25,4	26,4	27,6	29,5	31,7	26,4	2,0
11	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,7	27,7	3,3
12	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,7	29,0	4,6
13	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	30,3	5,9
14	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	31,3	6,9
15	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	32,2	7,8
16	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	32,8	8,4
17	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	33,1	8,7
18	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	33,1	8,7
19	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	32,7	8,3
20	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	31,6	7,2
21	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	30,3	5,9
22	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	29,2	4,8
23	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	28,2	3,8
PROMEDIO	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	28,0	3,6

Tabla 1. Valores de temperaturas promedio horarias para verano. Fuente: Elaboración de los autores.

2018, enero y febrero de 2019. Se promediaron los pares de registros horarios a igual profundidad y, posteriormente, los 60 valores correspondientes a cada hora del día, obteniéndose así un registro para cada hora del día promedio de verano. En la Figura 3 se exponen la temperatura ambiente y las registradas a distintas profundidades de suelo, en el período considerado.

Los valores promedio para cada hora del período estudiado se muestran en la Tabla 1.

En la Figura 4 se grafican los promedios horarios estacionales para verano de las variaciones de temperatura del aire y del suelo a distintas profundidades.

Si bien hasta el presente la cantidad de registros en el CUIM es escasa (7 meses), las mediciones realizadas no confirman

las estimaciones de Hollmuller y Lachal (2005), según las cuales, en cualquier parte del mundo, de día o de noche, en invierno o en verano se tienen temperaturas del suelo de 15°C. En cambio, se acercan en mayor medida a lo sostenido por Baver *et al.*, (1991), quienes establecen que la temperatura a una profundidad de 2m corresponde a la media de la temperatura anual. Al respecto, y como indica la estadística del clima urbano del Área Metropolitana de San Juan (Ortega, Montilla y Cúnsulo, 2013), la temperatura a 2m de profundidad es de 21.07°C.

Para Iannelli *et al.* (2013), las propiedades térmicas del suelo hacen que las variaciones diurnas de la temperatura no penetren más allá de 0,5m, pero las variaciones anuales de temperatura llegan hasta una profundidad de unos 4m. Más allá de estas profundidades, la temperatura de la tierra se mantiene constante todo el año. Su valor es

aproximadamente 1,7°C mayor que el valor medio de la temperatura anual del aire en superficie. No obstante, se observa que las temperaturas registradas por los sensores instalados en el CUIM muestran valores superiores a los indicados por esa bibliografía.

Con los valores de temperatura del suelo obtenidos, se elaboraron dos gráficos que muestran el perfil de esa variable climática en las horas de máxima y mínima exterior (07h y 17h). Estos se presentan en las Figuras 5 y 6, respectivamente.

APLICACIÓN DEL SISTEMA GEOTÉRMICO EN LA CLIMATIZACIÓN DE UNA VIVIENDA SOCIAL

A efectos de diseñar el sistema de refrescamiento geotérmico, aplicándolo a una vivienda bioclimática de tres dormitorios de interés social (Kurbán, Cúnsulo, Matar, Ripoll y Ortega, 2017), se parte del cálculo del caudal necesario para climatizar el volumen de la vivienda, el cual

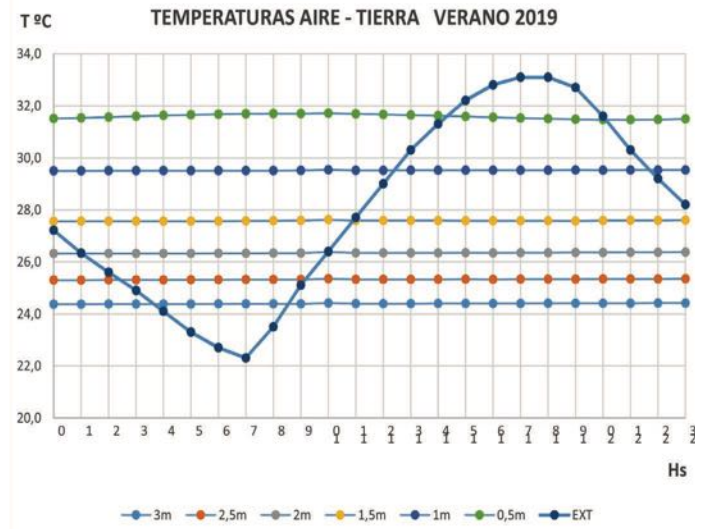


Figura 4. Temperaturas del subsuelo a distintas profundidades. Fuente: Elaboración de los autores.

VARIACIÓN DE TEMPERATURA AIRE - TIERRA
Verano 07Hs

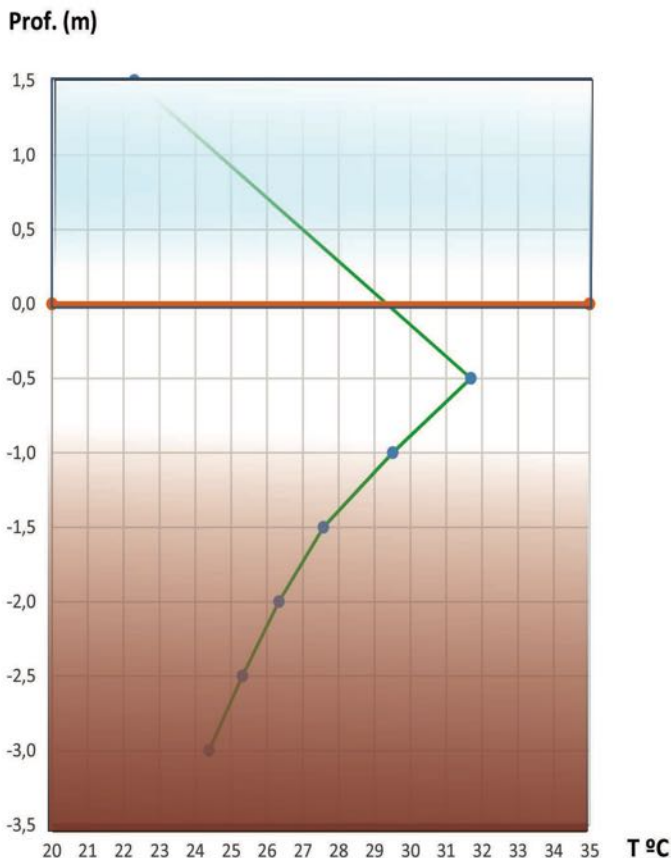


Figura 5. Perfil de temperatura del aire y del suelo a las 07 h. Fuente: Elaboración de los autores.

VARIACIÓN DE TEMPERATURA AIRE - TIERRA
Verano 17Hs

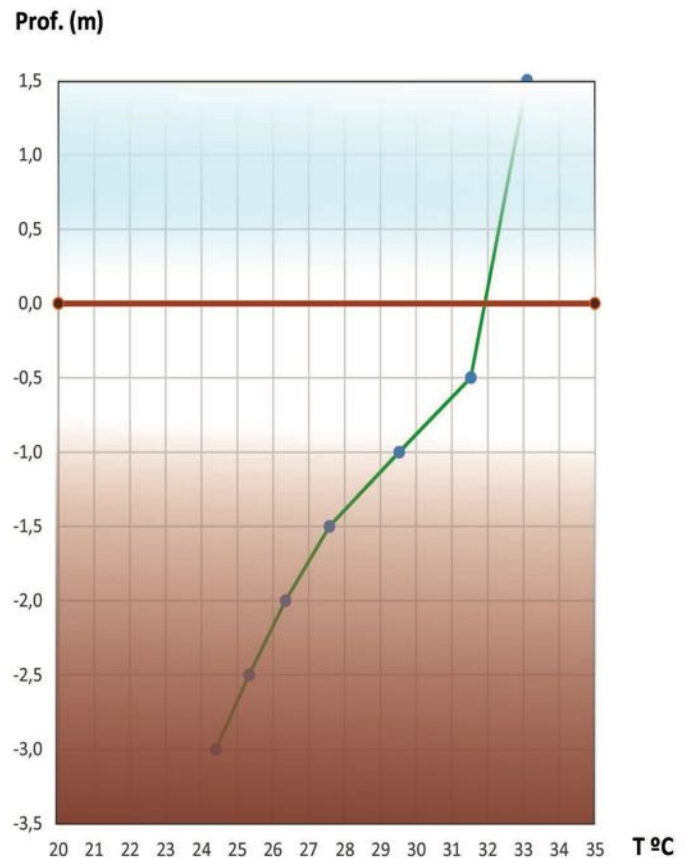


Figura 6. Perfil de temperatura del aire y del suelo a las 17 h. Fuente: Elaboración propia

fue de 212m³/h. Inicialmente, se considera una velocidad de 3m/s dentro del conducto de PVC de 200mm de diámetro y 5,9mm de espesor de pared, con una conductividad térmica = 0.17W/m²K.

El caudal de aire que pasa por cada ducto está dado por la siguiente expresión:

$$q_t = A * v = \pi 0.1^2 m^2 * 3 \frac{m}{s} = 0.09 \frac{m^3}{s} = 325 m^3/h$$

Donde

(m²) es el área del ducto y (m/s) es la velocidad del aire en el ducto.

Con este valor se calcula la cantidad de ductos necesarios en función del caudal necesario y del disponible, de acuerdo a la sección del ducto seleccionado. Se redondea al entero superior.

$$n = \frac{q_T}{q_t} = \frac{212 m^3/h}{325 m^3/h} = 0.65 \rightarrow n = 1$$

Es decir que con un solo tubo alcanza para cubrir la demanda de aire. Con este valor, se calcula la longitud de la tubería en función de la temperatura interior deseada (25°C), del aire de entrada (33,15°C) y de la del terreno a 3m de profundidad (24.4°C).

Para determinar la superficie de intercambio de calor y la longitud de la tubería, es necesario calcular la temperatura media dentro del conducto T_{ma} .

$$T_{ma} = \frac{(T_{ae} + T_{as})}{2} = \frac{33.15^\circ C + 25^\circ C}{2} = 29^\circ C$$

Siendo T_{ae} la temperatura a la entrada del ducto (°C) y T_{as} la temperatura a la salida.

A fin de evaluar el intercambio de calor entre el suelo y el aire que circula, se calcula la resistencia térmica (m²C/W) del conducto, la cual está dada por la resistencia de conducción R_{cond} y la resistencia de convección R_{conv} .

$$R = R_{cond} + R_{conv}$$

Para definir la R_{cond} , se tiene en cuenta el espesor de la pared del ducto (e=0.0059m) y la conductividad térmica ($\lambda = 0.17W/m^2K$)

$$R_{cond} = \frac{e}{\lambda} = \frac{0.0059}{0.17} = 0.035 m^2 K/W$$

La resistencia por convección R_{conv} es función de la velocidad del aire, v(m/s) está dada por la expresión:

$$R_{conv} = \frac{1}{5.55 v^{0.8}} = \frac{1}{5.55 * 3^{0.8}} = 0.075 m^2 K/W$$

En consecuencia,

$$R = R_{cond} + R_{conv} = 0.035 + 0.075 = 0.11 m^2 K/W$$

El flujo de calor medio por unidad de superficie (W/m²) es proporcional a la diferencia de temperatura entre el suelo y el interior del ducto e inversamente proporcional a la resistencia térmica de la pared del ducto.

$$T_{ma} = 29^\circ C = 302^\circ K$$

$$T_{tierra} = 24^\circ C = 297^\circ K$$

$$R = 0.11 m^2 K/W$$

$$\phi_m = \frac{(T_{ma} - T_{tierra})}{R} = \frac{302^\circ K - 297^\circ K}{0.11 m^2 K/W} = 45.5 W/m^2$$

La energía que es necesaria extraer del aire dentro del ducto es (Ws/m³) y está dada por la fórmula:

$$E_e = \left(\frac{i}{V_e} \right)_{entrada} - \left(\frac{i}{V_e} \right)_{salida}$$

Siendo:

i : Entalpia del Aire Seco

V_e : Volumen Especifico del Aire

De la carta psicométrica, que considera una humedad relativa del 35%, se obtienen los valores de i y V_e a la entrada y a la salida, contemplando las temperaturas de aire a la entrada y salida, respectivamente.

Temperatura Aire de Entrada (T_{ae}) = 33.15°C

Humedad Relativa = 35%

De la carta psicométrica, se obtiene entonces:

Entalpia del Aire Seco $i = 62 kJ/Kg$

Volumen Especifico del Aire $V_e = 0.88 m^3/Kg$

Temperatura Aire de Salida) = 25°C

Humedad Relativa = 35%

De la carta psicométrica, se obtiene entonces:

Entalpia del Aire Seco $i = 42.5 kJ/Kg$

Volumen Especifico del Aire $V_e = 0.85 m^3/Kg$

Reemplazando los valores en la fórmula anterior, se obtiene:

$$E_e = \left(\frac{i}{V_e} \right)_{entrada} - \left(\frac{i}{V_e} \right)_{salida} = \left(\frac{62 kJ/kg}{0.88 m^3/kg} \right)_{33.1^\circ C} - \left(\frac{42.5 kJ/kg}{0.85 m^3/kg} \right)_{25^\circ C} =$$

$$E_e = 20.45 \frac{kJ}{m^3} = 20450 Ws/m^3$$

El área de intercambio necesaria $S(m^2)$ resulta:

$$S = (E_e * q_t) / \phi_m = \frac{(20450 \text{Ws/m}^3 * 0.09 \text{m}^3/\text{s})}{45.5 \text{W/m}^2} = 40.45 \text{m}^2$$

Para calcular la longitud del ducto, resta dividir la superficie de intercambio, teniendo en cuenta el diámetro (D) de los caños.

$$L = \frac{S}{\pi D} = \frac{40.45 \text{m}^2}{\pi 0.2 \text{m}} = 64.3 \text{m} \cong 64 \text{m}$$

Si se baja la velocidad del aire a 2m/s, el caudal de aire que circularía por los ductos sería de 0.06m³/s, y la longitud de los ductos podría reducirse a 27m.

CONCLUSIONES

El sistema de enfriamiento geotérmico es una buena alternativa a considerar para el acondicionamiento térmico de verano, especialmente en las horas en que la temperatura del aire exterior es de 35°C o más, ya que se consigue un salto térmico de 11°C. A esto se le debe agregar el efecto de refrescamiento que produce la ventilación por el movimiento del aire impulsada desde los ductos (Neila F., Bedoya C. (2001).

El sistema no es efectivo en algunas horas, sobre todo en las nocturnas, cuando la temperatura del aire exterior es más baja que la del suelo a 3m de profundidad. En estos casos, la estrategia de ventilación nocturna es más efectiva, a causa del refrescamiento.

La temperatura a 3m de profundidad en verano resulta aproximadamente 3°C más elevada que el promedio anual de temperatura del aire, con las características del suelo presente en el lugar de las mediciones. Esto puede variar en presencia de otro tipo de suelo, lo cual deberá validarse mediante estudios de campo.

La temperatura del suelo presenta una tendencia a seguir decreciendo en función de la profundidad, más allá de los 3m con el tipo de suelo analizado. En consecuencia, se podría obtener un mayor salto térmico enterrando la tubería a mayor profundidad, pero se debería estudiar el mayor sobrecosto a fin de evaluar su factibilidad y el tiempo de amortización.

A partir de los valores hallados, se puede afirmar que la implementación de un sistema geotérmico para refrescamiento edilicio resulta altamente beneficiosa desde el punto de vista del confort térmico de los habitantes y contribuye a generar importantes ahorros de dinero en climatización edilicia, es decir, colabora con la sustentabilidad del hábitat humano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmed, A., Ip, K., Miller, A. y Gidado, K. (2009). Thermal performance of earth-air heat exchanger for reducing cooling energy demand of office buildings in the United Kingdom. En *Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, July 27-30, 2009*.

Bansal, V., Misra, R., Agrawal, G.D. y Mathur, J. (2010). Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for summer cooling. *Energy and Buildings*, 42 (5), 645-648.

Baver, L., Gardner, W. y Gardner, W. (1991). *Física de suelos*. Primera ed. México: Grupo Noriega.

Bisoniya, T. (2015). Design of earth-air heat exchanger system. *Geothermal Energy*, 3(18). DOI 10.1186/s40517-015-0036-2

Cabezas, A. (2013). Eficiencia energética a través de utilización de pozos canadienses con el análisis de datos de un caso real "Casa Pomaret". Tesina final de Master en Edificación. Universidad Politécnica de Catalunya – UPC, Barcelona.

Cohenca, D., Bordas, M., Schwartzman, D. (2013). Caracterización de las propiedades térmicas del suelo – Campus universitario San Lorenzo –Paraguay. En *Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 1 (pp. 08.43-08.52). Salta: ASADES.

De Paepe, M. y Janssens, A. (2003). Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers. *Energy and Buildings*, 35(4), 389-397.

Flores Larsen, S., Hernández, A., Lesino, G. y Salvo, N. (2001). Measurement and simulation of the thermal behavior of a massive building with passive solar conditioning. En *Proceedings of VII International Building Simulation Congress* (pp. 183-190), Río de Janeiro, Brazil.

Flores Larsen, S. y Lesino, G. (2001). Modelización de intercambiadores tierra-aire para acondicionamiento térmico de edificios. En *Actas del 8° Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia* (LATCYM 2001), México.

Givoni, B. (1984). Curso Extensivo "Acondicionamiento térmico para edificios en verano, mediante energías naturales". Mendoza (5 al 28 de mayo).

Hazim Zaki, H., Al-musaed, A. y Khalil, A. (2005). En *Thermal earth inertia such a source of energy for bio-sustainable house. The 2005 World Sustainable Building Conference*, Tokyo.

Hollmuller, P. y Lachal, B. (2005). *Buried pipe systems with sensible and latent heat. Exchange validation of numerical simulation against analytical solution and long-term monitoring*. Montreal: Escuela Politécnica de Montreal.

Iannelli, L., Bezzo, E., Bermejo, A., Cozza, P., Fiora, J., Niño, J., Prieto, R., Romero P., Gil S. (2013). La tierra como acondicionador natural de ambientes. En *Primer Encuentro Latinoamericano de Uso Racional y Eficiente de la Energía* (25-27 septiembre 2013), Universidad de Buenos Aires (UBA), Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI).

Iannelli, L. y Gil, S. (2012). Acondicionamiento térmico de aire usando energía geotérmica-ondas de calor. *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, 6(1), 100.

Kurbán, A., Cúnsulo, M., Álvarez, A., Montilla, E. y Ortega, A. (2015). The role of bioclimatic architecture in the reduction of the emission of CO₂ in arid environments. *Environmental Science*, 11(6), 171-178.

Kurbán, A., Cúnsulo, M., Matar, M., Ripoll, V. y Ortega, A. (2017). Social bioclimatic urban prototype in arid area. Energy and economic assessment. *International Journal of Applied Science and Technology*, 7(4).

Neila, F. y Bedoya, C. (2001). *Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental*. 2ª Edición. Madrid: Murilla –Lería.

Ortega A., Montilla E. y Cúnsulo M. (2013). Clima urbano árido. Base de datos para estudios del Área Metropolitana de San Juan. *AVERMA*, 17, 11.19 a 11.26.

Pittaluga, A., Ocaña, E. y Cortez, V. (2019). *Estudio de suelos en el área del Complejo Universitario Islas Malvinas (CUIM)*. Rivadavia - Provincia de San Juan. (Inédito).

Rouag, A., Benchabane, A. y Mehdid, C. (2018). Thermal design of Earth-to-Air Heat Exchanger. Part I. A new transient semi-analytical model for determining soil temperature. *Journal of Cleaner Production*, 182, 538-544.

Tiwari, G., Singh, V., Joshi, P., Shyam, D. A., Prabhakant, G. A. (2014). Design of an Earth Air Heat Exchanger (EAHE) for Climatic Condition of Chennai, India. *Open Environmental Sciences*, 8, 24-34.

Vidal J. y Vidal O. (2011). Instalaciones de ventilación. En: *Sistemas Eficientes de Climatización* (pp. 2-8). Barcelona: La Salle - Universitat Ramon Llull.

Xamán, J., Hernández-Pérez, I., Arce, J. Álvarez, G., Ramírez-Dávila, L. y Noh-Pat, F. (2014). Numerical study of earth-to-air heat exchanger: the effect of thermal insulation. *Energy and Buildings*, 85(Suppl. C), 356-361.





METODOLOGÍA PARA ELABORAR UNA CARTOGRAFÍA REGIONAL Y APLICAR ESTRATEGIAS BIOCLIMÁTICAS SEGÚN LA CARTA DE GIVONI

Recibido 14/08/2019
Aceptado 03/12/2019

METHODOLOGY FOR A REGIONAL CARTOGRAPHY FOR THE APPLICATION OF THE BIOCLIMATIC STRATEGIES OF THE GIVONI CHARTER

FERNANDO DA CASA MARTÍN
Doctor en Arquitectura
Docente Catedrático del Departamento de Arquitectura
Universidad de Alcalá, Madrid, España
<https://orcid.org/0000-0002-2728-4424>
fernando.casa@uah.es

FLAVIO CELIS D'AMICO
Doctor en Arquitectura
Docente Titular del Departamento de Arquitectura
Universidad de Alcalá, Madrid, España
<http://orcid.org/0000-0003-3931-6056>
flavio.celis@uah.es

ERNESTO ECHEVERRÍA VALIENTE
Doctor en Arquitectura
Docente Titular del Departamento de Arquitectura
Universidad de Alcalá, Madrid, España
<http://orcid.org/0000-0002-6826-5756>
ernesto.echeverria@uah.es

RESUMEN

Se plantea como objetivo de la investigación expuesta la viabilidad de una metodología para cartografiar un territorio concreto, implementando las estrategias bioclimáticas necesarias para alcanzar el confort, según el diagrama de Givoni; herramienta muy útil para el diseño de edificios. Tal metodología se desarrolla en cuatro fases: I, obtención de la información climática; II, análisis de los datos climatológicos; III, selección de estaciones y datos mensuales, aplicación de la carta de Givoni e inicio del proceso de cartografiado; IV, establecimiento de la zonificación, y elaboración de mapas, con carácter mensual. Como resultado del trabajo, se obtiene un conjunto de mapas que indican las estrategias bioclimáticas adecuadas a cada territorio, en periodicidad mensual, para alcanzar el confort en los edificios. La metodología fue validada en un territorio concreto en España, utilizado como caso de estudio. En definitiva, la aportación original de la investigación es precisamente el desarrollo de la mencionada metodología, que permite elaborar una cartografía para un territorio determinado -mapa que convierte en una potente herramienta para el diseño bioclimático- y que, además, es susceptible de ser aplicada a cualquier territorio.

Palabras clave

arquitectura bioclimática, cartografía, climatología, territorio

ABSTRACT

The aim of the research is the feasibility of a methodology to map a specific territory, implementing the bioclimatic strategies necessary to achieve comfort, according to the Givoni diagram, as a very useful tool for building design. The methodology used is developed in four phases: I, obtaining the climatic information; II, analysis of climatological data; III, selection of stations and monthly data, application of Givoni letter and start of the mapping process; IV, establishment of zoning, and mapping, on a monthly basis. As a result of the application of the methodology, a set of maps is obtained that indicate the appropriate bioclimatic strategies for each territory, on a monthly basis, in order to achieve comfort in the buildings. The methodology has been validated in a specific territory in Spain, used as a case study. The original contribution of the research is said methodology that allows to elaborate the cartography for a territory, that becomes a powerful tool for the bioclimatic design, and that is capable of being applied to any territory.

Keywords

bioclimatic architecture, cartography, climatology, territory

INTRODUCCIÓN

EL DISEÑO BIOCLIMÁTICO SEGÚN LAS ESTRATEGIAS DE GIVONI

El diseño bioclimático es una herramienta para alcanzar niveles de confort térmico que tiene su origen en el estudio de la relación del hombre con el clima. Ya a principios del siglo XX, Houghten y Yagloglou trabajaron con el concepto de confort climático en su estudio "Determining lines of equal comfort" (1923), formando parte de lo que hoy se conoce como ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). Este trabajo propuso ubicar zonas de confort en un diagrama psicrométrico, relacionando humedad y temperatura, con base en el índice de temperatura efectiva. Muchas investigaciones se generan a partir de ese momento. Como evolución a dichos planteamientos se establecieron los llamados climogramas, diagramas bioclimáticos o cartas bioclimáticas, que son utilizados como herramientas para determinar las estrategias de diseño de espacios exteriores e interiores con el objetivo de alcanzar el confort térmico. Estas cartas permitieron vincular las condiciones climáticas del lugar con las estrategias pasivas y/o activas que se necesitan para lograr las condiciones de confort (Givoni, 1969).

En el desarrollo de estas herramientas se han realizado numerosas aportaciones orientadas a analizar las variables que intervienen en estos fenómenos y el modo en que lo hacen: Halawa y Van Hoof (2012), Mena, Rodríguez, Castilla y Arahál (2014), Dávila (2015), Larrumbide y Bedoya (2015), Kurbán y Cúnsulo (2017), y Esteves (2018). La mayor parte de ellas se abocan a las relaciones existentes entre las distintas variables térmicas y el confort humano, y su incidencia en la representación gráfica de dichas relaciones.

Los diagramas, o cartas bioclimáticas, más usados son el de Olgay y el de Givoni, por ser estos aplicables de forma directa a los edificios y su entorno, de modo que se obtiene de ellos recomendaciones igualmente directas. El primero cuantifica las correcciones de los parámetros bioclimáticos para la obtención del confort humano en condiciones de exterior, sin ningún tipo de relación con el objeto arquitectónico. El segundo cuenta con las incidencias que puede producir la arquitectura en el clima y señala las cualidades que deben tener las edificaciones para conseguir la sensación de confort dentro de los mismos (Courret, Guzmán, Milián, García, y Salazar, 2015; Medina y Escobar, 2019).

La aplicación del diagrama de Givoni para el diseño bioclimático de los edificios está en su objetivo inicial. Ha sido utilizada tanto desde el ámbito del diseño de sistemas constructivos concretos (Balter, Ganem y Discoli, 2016), en casos concretos de edificios (Rodríguez, Nájera y Martín, 2018), como en la elaboración de manuales de arquitectura bioclimática para un territorio concreto (Pérez, Ladrón de

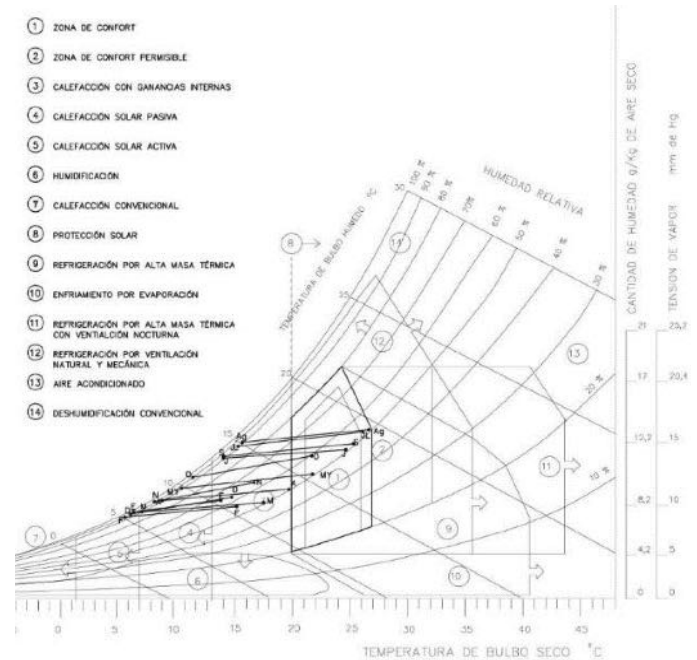


Figura 1. Diagrama de Givoni para las condiciones climáticas del periodo de recolección de datos: 2002-2016, en el observatorio meteorológico de Lourizán, Galicia, España. Fuente: Elaboración de autores.

Guevara y Boned, 2015). También hay referencias para Japón (Ooka, 2002), China (Gou, Li, Zhao, Nik y Scartezzi, 2015) e, incluso, Latinoamérica (Echeverría, García, Celis y Saelzer, 2019).

La carta bioclimática de Givoni se basa en el Índice de Tensión Térmica (ITS) para delimitar la zona de bienestar, y su aplicación es muy adecuada en climas cálidos de las regiones áridas. Este método tiene en cuenta las características de la construcción como modificadoras de las condiciones del clima exterior y recomienda el bienestar en el interior de las edificaciones.

Givoni (1969) propone una carta bioclimática en la que en el eje de abscisas se representa las temperaturas de bulbo seco, mientras en el eje de las ordenadas, la tensión parcial de vapor de agua contenido en el aire; las líneas curvas, psicrométricas, representan la humedad relativa (Figura 1). Sobre la línea de máxima humedad (100%) se ubica la temperatura de bulbo húmedo.

La representación del clima anual puede hacerse con las condiciones medias de cada mes. En el diagrama se delimitan varias zonas cuyas características de temperatura y humedad indican la conveniencia de utilizar unas determinadas estrategias de diseño en la edificación.

Cada una de estas zonas se puede observar en la Figura 1. Las estrategias de calefacción son sucesivas, mientras que, en las estrategias de refrigeración, se produce un solape y, por tanto, un abanico de posibilidades con las que se puede alcanzar la zona de confort.



Figura 2. Localización geográfica de Galicia en la Península Ibérica (color más oscuro). Fuente: Instituto Geográfico Nacional (www.ign.es)

Las indicaciones obtenidas en el diagrama son orientativas, y no exclusivas. El diseñador tiene una información de los sistemas que son efectivos en ese lugar y en el tiempo analizado. Es a partir de esa información que el proyectista toma las decisiones adecuadas. Habitualmente, lo recomendable es la adopción de medidas combinadas, que permitan el mejor aprovechamiento de los equipos instalados en las diferentes situaciones climáticas. Con ello se llega a verdaderas reducciones del consumo energético, además de la optimización del consumo de los equipos convencionales de climatización a instalar.

Hay que tener en cuenta también que la adopción de estrategias correctoras de las condiciones consideradas como insuficientes, favorece y abarata el uso de los sistemas convencionales. Así, si se necesita calefacción convencional, un buen comportamiento pasivo disminuirá la cantidad de energía que se gaste en ella (Da Casa, 2000).

El problema surge cuando para poder aplicar esta herramienta al proceso de diseño, la condición previa es disponer de los datos climatológicos correspondientes a la localización del edificio para integrarlos en el diagrama de Givoni y, de esa forma, conocer las estrategias bioclimáticas necesarias para corregir los parámetros de discomfort. La dificultad más habitual es, precisamente, obtener información concreta de la ubicación, que sea fiable. En muchas ocasiones no existe, lo que obliga a complejos procesos de investigación (Corral, García y Romero, 2018). En otros casos, los archivos de datos climáticos para la simulación son muy generalistas y simplificados (con el fin de facilitar su manejo), sin tener en cuenta factores específicos del lugar, como sobrecalentamientos locales o microclimas, ni tampoco los efectos del cambio climático (Luciani, Velasco y Hudson, 2018).

Se presenta, en suma, la dificultad de utilizar esta herramienta de forma global, en cualquier territorio, para

alcanzar los beneficios de un diseño sostenible. Ante esto, y como punto de partida de la investigación, se considera la necesidad de responder a las siguientes cuestiones: ¿Es posible disponer de datos climatológicos generalizables para un uso inmediato?, ¿es posible generar un modelo de aplicación a partir de los diagramas de Givoni?, ¿es posible extraer de ellos una interpretación básica de carácter territorial? Y, lo más importante, ¿es posible cartografiar todo ello?

La obtención de respuestas a estas preguntas es la base del objetivo de esta investigación, que propone desarrollar una metodología óptima para elaborar una "cartografía regional bioclimática", de un territorio concreto, utilizable por cualquier técnico en el diseño de edificios, en la que se disponga de la información necesaria para adoptar los criterios y estrategias más adecuadas, basándose en la carta bioclimática de Givoni.

Entre los estudios relacionados con el tema, se puede citar los que abordan la representación cartográfica de bioclimas (Marco, Sariñena, López, M.S. y López, M.L., 2016) o de parámetros, como la radiación solar (Díaz, Montero y Mazorra-Aguilar, 2018). Hay también algunos intentos de graficar la zonificación climática de referencia del Código Técnico de la Edificación de España. No se cuenta con ninguna referencia a la generación de cartografías específicas referidas a las estrategias bioclimáticas de diseño, más allá de una propuesta metodológica expuesta por Da Casa (2000).

El desarrollo y aplicación de estas estrategias facilita la consecución de los objetivos ODS, así como el de todas las normativas de eficiencia energética, tanto las de reducción de consumos, como las del aumento de la optimización de los edificios desde su propio diseño. Disponer de esta nueva herramienta (usando los recursos disponibles, sin tener que realizar una inversión, en caso de que se trate de una iniciativa pública), genera un gran interés, dada la rentabilidad de su planteamiento y su alto potencial de beneficios para un territorio concreto.

METODOLOGÍA

En el proceso de investigación se ha establecido una metodología clara, concreta y completa, para la elaboración de este tipo de cartografías. Con el propósito de comprobar su factibilidad se utilizó como sistema de validación un ejemplo aplicado a un territorio concreto, a modo de experiencia piloto. El territorio seleccionado fue la Comunidad Autónoma de Galicia, en España (Figura 2).

Se establece, en este contexto, cuatro fases principales:

- Fase I. Obtención de la información climática disponible actualizada del ámbito de estudio.

- Fase II. Análisis de los datos climatológicos.
- Fase III. Implantación de estaciones y datos mensuales según estrategias bioclimáticas de Givoni. Inicio del proceso de cartografiado.
- Fase IV. Zonificación, y establecimiento de los “mapas” de estrategias bioclimáticas de Givoni, con carácter mensual.

A continuación, se profundiza en cada una de estas etapas.

FASE I. OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN CLIMÁTICA DISPONIBLE ACTUALIZADA DEL ÁMBITO DE ESTUDIO

Para la obtención de datos climáticos específicos de la zona de estudio, se dispuso de una red de observatorios meteorológicos con los datos que se precisan (al menos, temperaturas medias, máximas y mínimas, y humedades relativas medias, máximas y mínimas). La fuente de información establecida fue la red de observatorios meteorológicos de la Xunta de Galicia (www.meteogalicia.es), que posee un total de 101 observatorios distribuidos de forma generalizada por toda su geografía (Figura 3).

Respecto del periodo mínimo de datos meteorológicos a recopilar, se planteó que este debía ser el suficiente como para ser referentes del clima real (habitualmente se consideran 30 años). Ahora bien, hay que tener en cuenta que la extensión y digitalización de los observatorios no permite alcanzar en la mayoría de los casos dicha cuantía.

A ello hay que sumar el potencial efecto de la situación de cambio climático actual, en la que puede aceptarse como modelo la existencia de un ligero aumento de la temperatura (Solanki, Schüssler y Fligge, 2000; Solanki, Usoskin, Kromer, Schüssler y Beer, 2004), sobre todo en invierno, y un desplazamiento de las precipitaciones invernales hacia la primavera, lo que conlleva un incremento de la oceanidad y de la templanza (no una tropicalización). Afecta a las instalaciones existentes en los edificios (Sánchez, Rubio, Marrero, Guevara y Canivell, 2017), así como a otros ámbitos (Enríquez, Díaz, Martín y Santos, 2017). Esto afecta de forma directa a la aplicación de las estrategias en el diseño pasivo (Rubio, 2015).

Por todo lo anterior, se estima como aceptable referencia un rango de tiempo en torno a los 15 años (periodo representativo del cambio). En los casos en los que se disponían de menores periodos, los datos se comprobaron en términos de su coherencia con el resto de los observatorios y se utilizaron de forma complementaria.

En el caso de Galicia, los observatorios de primera implantación datan del año 2000, lo que implica un período de más de 15 años. Además, todos los observatorios consultados cuentan con los datos precisos para la aplicación de la metodología considerada en este trabajo.

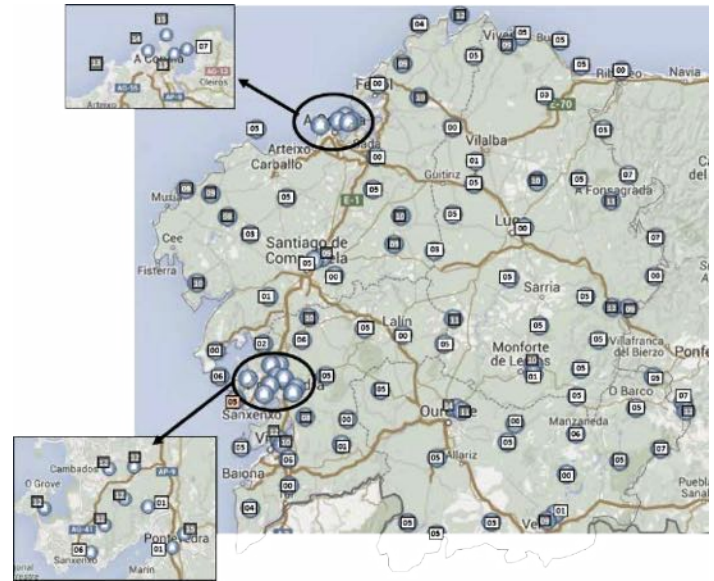


Figura 3. Estaciones meteorológicas disponibles de Galicia con fecha de implantación. Fuente: Elaboración de los autores en base a imágenes extraídas de www.meteogalicia.es.

Así, se seleccionaron 55 observatorios distribuidos homogéneamente en el territorio, dando prioridad a los de mayor antigüedad. Tal selección se efectuó en dos fases: 33 observatorios en la primera y otros 22 en la segunda (Tabla 1). Se recopilaron los datos de los parámetros climáticos necesarios para la elaboración de la carta bioclimática de Givoni de todo el período disponible de cada observatorio con carácter mensual, esto es, datos mensuales de temperaturas máximas, temperaturas mínimas, media de las temperaturas máximas, y media de las mínimas, así como datos de la humedad relativa media, máxima y mínima.

Para que la distribución geográfica de los observatorios a consultar fuera homogénea, el proceso de selección se realizó, como ya se indicó, en dos fases: en la primera se escogió a los de mayor prioridad (33 observatorios), y la segunda se complementó con otros 22 observatorios, a efecto de tener una cobertura lo más completa posible del territorio de análisis.

Con el fin de comprobar si era válida la exhaustividad del estudio, con 55 observatorios testados, es de referir que, en 2010, la “Guía técnica de condiciones climáticas exteriores de proyecto”, elaborada por la Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR) para el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), se basaba en los datos de sólo 6 Estaciones Meteorológicas para determinar el clima en Galicia. El objetivo de este estudio era promocionar la eficiencia en el uso final de la energía en los edificios. A partir de ese antecedente, se da por validado el número de puntos de estudio.

OBSERVATORIOS PRINCIPALES CONSULTADOS (1ª fase)					OBSERVATORIOS CONSULTADOS en 2ª fase				
Nº clave	Denominación	Provincia	Municipio	Año implantación	Nº clave	Denominación	Provincia	Municipio	Año implantación
1	Castro Vicaludo	Pontevedra	Oia	2004	A	A Pontenova	Lugo	A Pontenova	2005
2	Monte Aloia	Pontevedra	Tui	2000	B	O Xipro	Lugo	A Fonsagrada	2007
3	Queimadelos	Pontevedra	Mondariz	2001	C	Ventosa	Lugo	Navia de Suarna	2007
4	Entrimo	Ourense	Entrimo	2005	D	Caldas de Reis	Pontevedra	Caldas de Reis	2006
5	Gandarela	Ourense	Celanova	2005	E	Pereira	Pontevedra	Forcarei	2005
6	Baltar	Ourense	Baltar	2005	F	Mouriscade	Pontevedra	Lalín	2000
7	O Invernadeiro	Ourense	Vilariño de Conso	2000	G	Ourense	Ourense	Ourense	2011
8	Xares	Ourense	A Veiga	2007	H	Marroxo	Lugo	Monforte	2001
9	Lourizán	Pontevedra	Pontevedra	2001	I	Serra do Eixe	Ourense	O Barco de Valdeorras	2005
10	Amiudal	Ourense	Avión	2005	J	Cabeza de Manzaneda	Ourense	Manzaneda	2006
11	Alto do Rodicio	Ourense	Maceda	2000	K	Viana do Bolo	Ourense	Viana do bolo	2005
12	San Xoán de Río	Ourense	San Xoán de Río	2005	L	Fornelos de Montes	Pontevedra	Fornelos de monte	2000
13	As Petarelas	Ourense	Rubias	2005	M	Penedo do Galo	Lugo	Viveiro	2005
14	Corrubedo	A Coruña	Ribeira	2000	N	Portomarín	Lugo	Portomarín	2005
15	Muralla	A Coruña	Lousame	2001	O	Abradelo	Lugo	Samos	2005
16	Sergude	A Coruña	Boqueixon	2000	P	Verín-Vilamaior	Ourense	Verin	2001
17	Serra do Faro	Pontevedra	Rodeiro	2005	Q	Corón	Pontevedra	Vilanova de Arousa	2002
18	Bóveda	Lugo	Bóveda	2005	R	Rebordelo	Pontevedra	Cotobade	2005
19	Courel	Lugo	Folgoso	2005	S	Ons	Pontevedra	Bueu	2005
20	Fontecada	A Coruña	Santa Comba	2003	T	Illas Cies	Pontevedra	Vigo	2005
21	Río do Sol	A Coruña	Coristanco	2005	U	Camariñas	A Coruña	Camariñas	2009
22	Melide	A Coruña	Melide	2003	V	Lira	A Coruña	Carnota	2010
23	Campus Lugo	Lugo	Lugo	2000					
24	Ancares	Lugo	Cervantes	2000					
25	Malpica	A Coruña	Malpica	2005					
26	Mabegondo	A Coruña	Abegondo	2000					
27	Guitiriz	Lugo	Guitiriz	2000					
28	Pol	Lugo	Pol	2005					
29	CIS Ferrol	A Coruña	Ferrol	2000					
30	Punta Candieira	A Coruña	Cedeira	2004					
31	Serra da Faladoira	A Coruña	Ortigueira	2005					
32	Fragavella	Lugo	Abadín	2003					
33	Pedro Murias	Lugo	Ribadeo	2000					

Tabla 1. Relación de observatorios seleccionados en el estudio (se indica el año de implantación). Fuente: Elaboración de los autores.

FASE II. ANÁLISIS DE LOS DATOS CLIMATOLÓGICOS

Una vez recopilada toda la información climatológica, se consideró como primer paso proceder a la homogeneización de los datos obtenidos de cada observatorio, según los modelos existentes (Arava, 2014; Cartaya, Zurita y Montalvo, 2016). Se adquirieron, de este modo, tablas individualizadas de cada uno de los observatorios con los datos de carácter mensual (en todo el periodo disponible) de temperaturas máximas y mínimas, medias de máximas y mínimas, y humedades relativas medias, máximas y mínimas. Esta información permitió el análisis de su evolución y el análisis comparativo con las temperaturas extremas. Se debe indicar que se filtraron los datos que respondían a situaciones de fallas del equipo o a deficiencias en la adquisición de estos.

Los datos medios por mes de cada parámetro se introdujeron en el climograma de Givoni, y con el resultado emanado se establecieron las estrategias bioclimáticas con carácter mensual, tanto las de refrigeración, como las de calefacción, en los meses requeridos.

Como es conocido, las estrategias de Givoni para calefacción son progresivas según desciende el dato de la

temperatura. Ello hace posible emplear como herramienta hojas de cálculo para presentar los datos mensuales resultantes, pudiéndose entonces definir la estrategia límite de calefacción que permita alcanzar el confort, para cada mes y en cada zona.

Con respecto a las estrategias de refrigeración, la aplicación no resulta tan directa, ya que las estrategias se solapan, y su evolución no es tan clara como en lo referente a calefacción, al depender no solo de la variación de la temperatura, sino de la relación con la humedad relativa ambiental. En este tipo de estrategias se precisa la aplicación directa del diagrama de Givoni, para establecer resultados. Hay que contemplar que en la mayoría de las ocasiones se dispondrán de varias estrategias, que incluso pueden ser adoptadas de forma simultánea (Guzmán, Cano y Roset, 2019).

Con los datos obtenidos, se prepararon tablas y diagramas correspondientes a cada observatorio, en las que se indicó el tipo de estrategia requerida para alcanzar las condiciones de confort en cada mes, correspondientes a calefacción y a refrigeración de forma independiente.

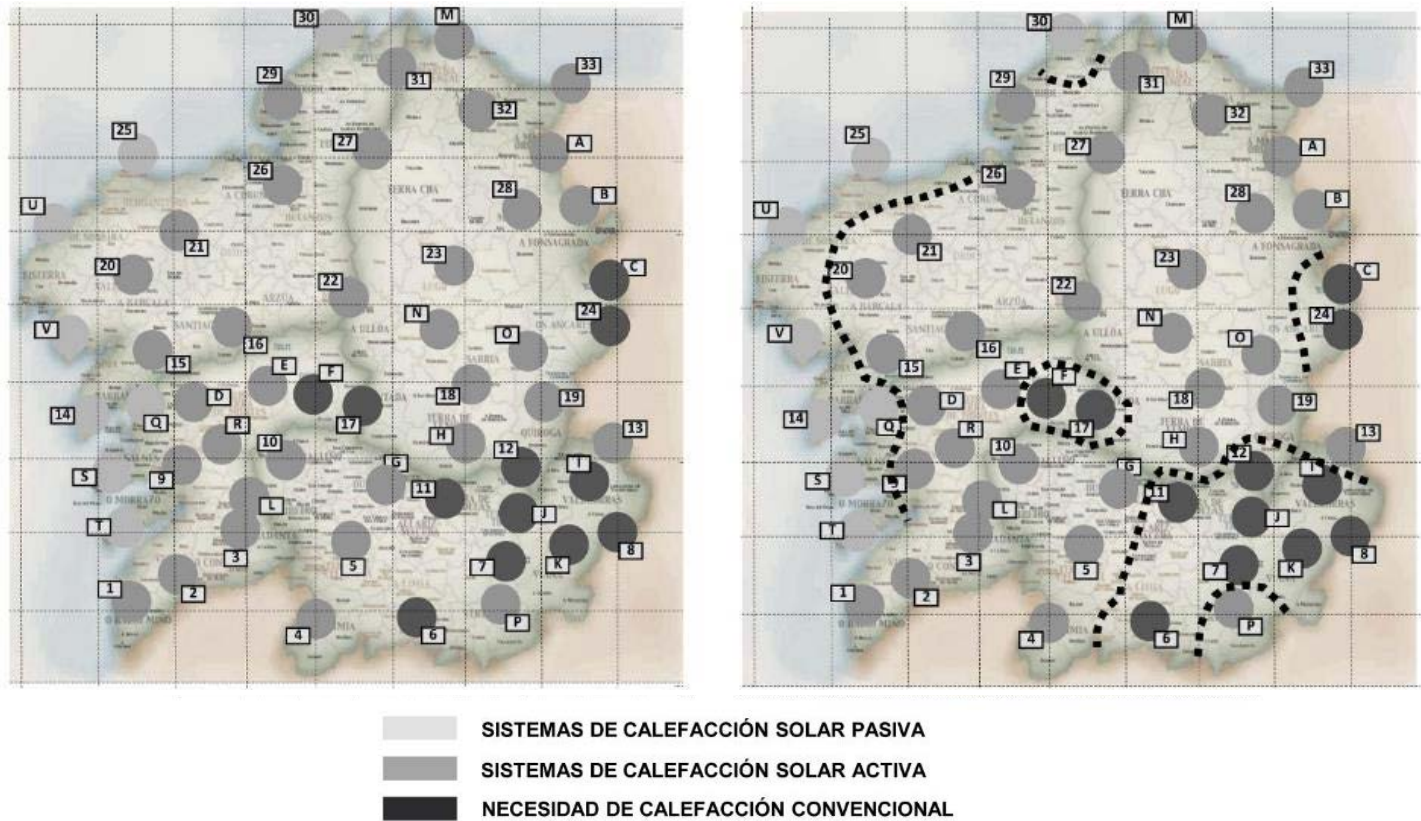


Figura 4. Ejemplo ilustrativo del proceso inicial de cartografiado correspondiente a las necesidades de calefacción del mes de febrero. Fuente: Elaboración de los autores.

FASE III. IMPLANTACIÓN DE ESTACIONES Y DATOS MENSUALES SEGÚN ESTRATEGIAS BIOCLIMÁTICAS DE GIVONI. INICIO DEL PROCESO DE CARTOGRAFIADO

El primer paso de esta fase fue el traspaso sobre un mapa del territorio, de los datos obtenidos de forma individualizada en cada observatorio. Se plasmó gráficamente con código de color según la diferente estrategia necesaria para cada mes en la localización geográfica de cada observatorio. De esta manera, se fue disponiendo de un mapa por mes, con la totalidad de los puntos seleccionados y codificados. Se realizaron de forma independiente mapas para las estrategias de calefacción y las de refrigeración.

El segundo paso consistió en llevar a cabo un primer análisis con el fin de comprobar la existencia de zonas de singularidad, por contraste entre resultados. Se efectuaron análisis complementarios de nuevos observatorios para complementar la información y poder definir mejor la complejidad de las zonas límites. Entonces, se pudo observar la existencia de zonas de similar comportamiento.

En el tercer paso de esta fase se procedió a la agrupación zonal de los observatorios, cuyos datos implican la utilización de estrategias de diseño similares. Se establecieron gráficamente unos límites iniciales de cada una de las zonas de carácter territorial que tenían un comportamiento similar.

Valga, a modo meramente ilustrativo de lo expuesto, la Figura 4, en la que se muestra, a la izquierda, un posicionamiento de datos y, a la derecha, la primera delimitación zonal.

FASE IV. ZONIFICACIÓN Y ESTABLECIMIENTO DE LOS "MAPAS" DE ESTRATEGIAS BIOCLIMÁTICAS DE GIVONI, CON CARÁCTER MENSUAL

Una vez establecido el primer esbozo de mapas mensuales con los resultados en forma de puntos de datos, se analizaron los resultados en la delimitación entre zonas de diferente caracterización. Fue posible observar las divergencias o discordancias, y se detectaron las zonas de dudosa delimitación, o zonas en las que se presentaba algún comportamiento inicialmente incoherente.

En ese momento, se determinó la necesidad de ampliar el número de observatorios a estudiar, incorporando los indicados en la Tabla 1, como 2ª fase. En los casos en los que no se disponía de datos fiables de algún observatorio en dicha zona, se procedió a la interpolación, con base en la distancia efectiva y teniendo en cuenta la diferencia de altitud y de latitud entre observatorios. En algunas zonas puntuales se introdujo el factor orográfico y el régimen de vientos locales.

Tras modificar y ajustar las delimitaciones iniciales, se obtuvo la zonificación cartografiada, con carácter mensual,

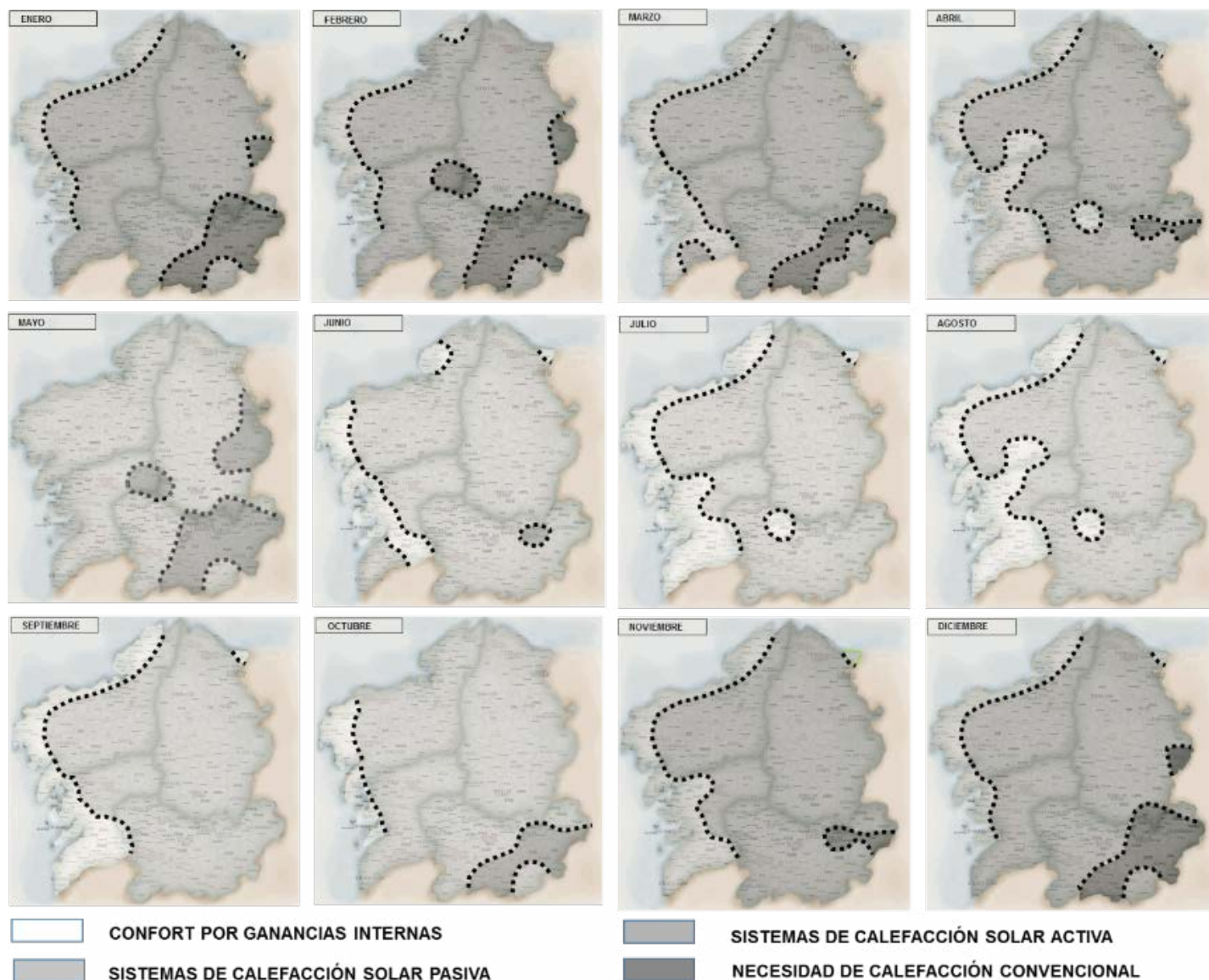


Figura 5. Cartografía estrategias bioclimáticas para calefacción en Galicia para cada mes del año, según Givoni. Fuente: Elaboración de los autores.

de las estrategias de calefacción y de las requeridas para refrigeración (de forma independiente), según Givoni, con miras a lograr el confort térmico en el territorio estudiado.

Respecto a las estrategias de calefacción, el trabajo generó 12 mapas, uno por mes, ya que el análisis de los datos evidenció la necesidad de adoptar estrategias de calefacción durante todo el año. Así, en cada mes se señalaron las zonas diferenciables con distinta codificación.

La consideración de las situaciones extremas no se tuvo en cuenta en esta fase, sin perjuicio de que ello pueda incluirse en estudios posteriores. Ahora bien, tales situaciones no deben ser consideradas como base del diseño, ya que supondrían sobredimensionamientos excesivos que podrían generar situaciones irregulares.

En cuanto a las estrategias de refrigeración, se actuó de manera similar, plasmando mapas en cada uno de los meses

en los que se presentaban este tipo de necesidades. Se planteó, al efecto de la investigación, establecer tantas agrupaciones de estrategias como se encontraban, según los solapes de la propia distribución del diagrama de Givoni.

Se decidió considerar las situaciones extremas para el caso de refrigeración, puesto que esos datos podrían ser útiles como complemento de la información de los parámetros medios, en la medida en que dan indicios de estados extremos de desconfort.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado de la aplicación de la metodología propuesta, se comprobó la viabilidad de cartografiar las necesidades de estrategias de climatización de un territorio. En efecto, se obtuvieron 12 mapas, uno por mes, para las estrategias de calefacción (Figura 5).

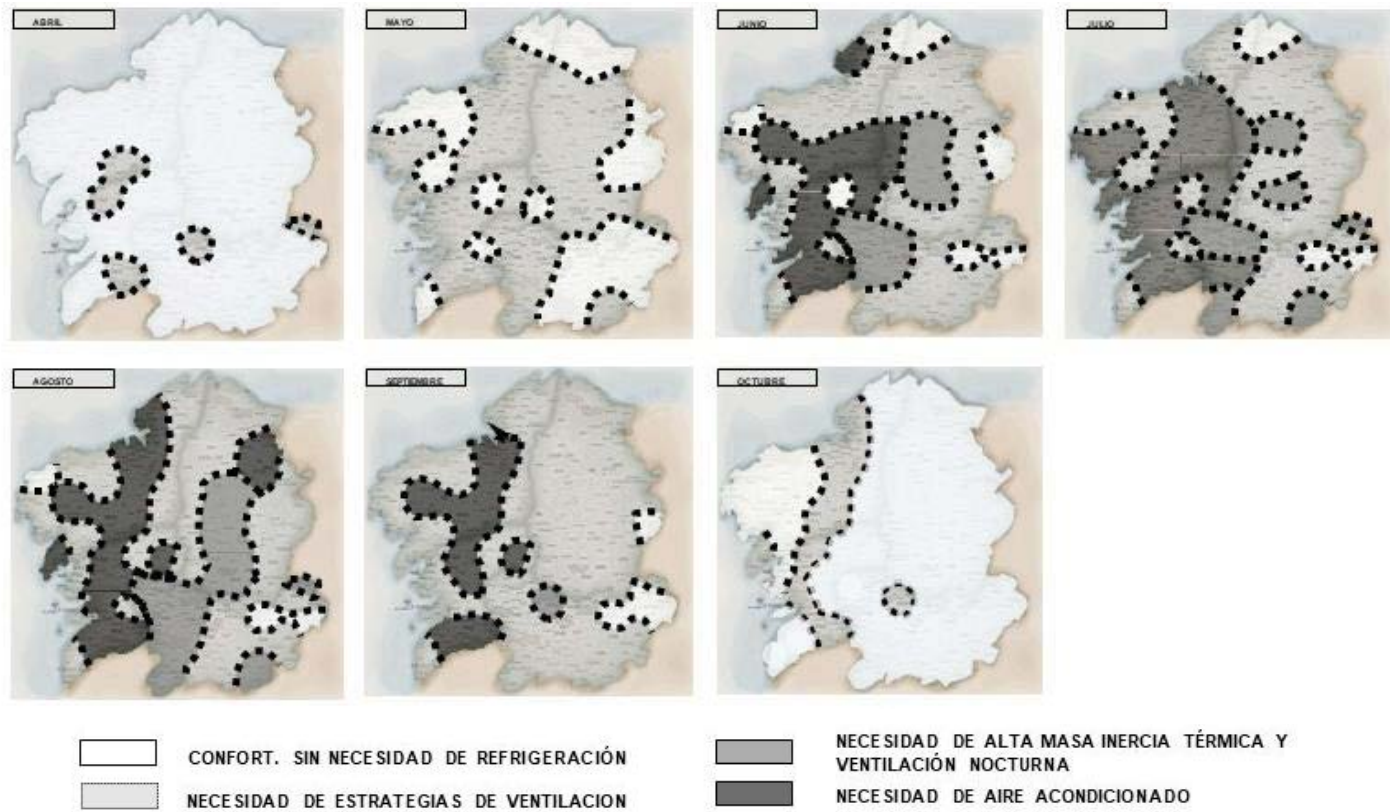


Figura 6. Cartografía estrategias bioclimáticas para refrigeración en Galicia, para situación de temperaturas máximas, desde abril a octubre, según Givoni. Fuente: Elaboración de los autores.

En el caso de las estrategias de refrigeración, al aplicar los datos de temperaturas (máximas y mínimas) y humedades relativas medias (máximas y mínimas), se presentó una circunstancia particular, y es que lo habitual es que sean factibles varias estrategias, que pueden ser utilizadas de forma individual o simultánea. Pero el análisis de la evolución de dichas estrategias no fue aquí tan claro como en las correspondientes a los requerimientos de calefacción, fundamentalmente por el propio carácter no progresivo en las estrategias del diagrama de Givoni. Esto complicó la codificación, al producirse una mayor diversificación de puntos. Sin embargo, se fue comprobando en la práctica que al final la diversificación no es tan amplia para cada climograma.

Por otra parte, se observó que solo en 5 observatorios dispersos se indica alguna necesidad de refrigeración en algún mes, quedando prácticamente la totalidad del territorio en estado de confort (recordemos que con los datos medios mensuales).

Ante esta singularidad, se consideró interesante conocer el cartografiado de las necesidades de refrigeración en situación de temperaturas máximas, de modo que se pudo complementar la información del proceso de adopción de estrategias bioclimáticas en el diseño. Al aplicar el método en estas circunstancias, las estrategias de refrigeración se dataron desde abril hasta octubre, obteniéndose 7 mapas (Figura 6).

Frente a estos resultados es pertinente presentar la discusión llevada a cabo, que se enfocó en responder las preguntas relacionadas con tres aspectos principales: la fiabilidad del resultado obtenido, la aplicabilidad de la cartografía presentada, y la capacidad de extrapolar esta metodología a otros territorios.

PUNTO 1 DE DISCUSIÓN: FIABILIDAD DEL RESULTADO OBTENIDO

A la hora de responder a la pregunta “¿es fiable la información obtenida?”, se vuelve esencial reflexionar sobre la propia definición de “fiabilidad”. Si por tal término se entiende el grado de consistencia, estabilidad y ausencia de errores en los datos y su uso, se debe partir del origen de los datos utilizados. La fuente de los datos climáticos es de toda solvencia. Se trata de una red de observatorios meteorológicos de una administración pública, la Xunta de Galicia de acceso público de forma digital (www.meteogalicia.es). Los datos aplicados responden a la realidad de cada localización, los cuales fueron recogidos de forma continuada y digital.

La utilización de un periodo de recopilación de datos de 15 años permite establecer una consideración del clima real, atendiendo a la evolución producida y a la repercusión del cambio climático. Por tanto, los resultados basados en el uso de dichos datos pueden considerarse fiables.

El grado de precisión de los mapas resultantes responde al carácter medio de los parámetros climatológicos utilizados, siendo ajustado para cualquiera de las aplicaciones para las que pueden utilizarse. El ajuste realizado en la delimitación entre zonas responde a dicho carácter con la interpolación entre observatorios, pero teniendo en cuenta la distancia efectiva entre ellos, la diferencia de altitud, e incluso la orografía intermedia de dicha zona. De este modo, se puede considerar haber obtenido una precisión equilibrada y fiable.

Ahora bien, si por fiabilidad se entiende la "probabilidad de un buen funcionamiento de algo" (definición de la Real Academia Española), se debe indicar que se ha realizado la comprobación de la coherencia de los mapas obtenidos, con la delimitación climática de la Normativa Española del Código Técnico de la Edificación (Da Casa, Echeverría y Celis, 2017), con un resultado positivo. No obstante, es patente que cada una de estas zonificaciones responde a objetivos diferentes y que la zonificación resultante de la metodología aplicada, al no limitarse a los "climas de referencia" de la Norma Española, se ajusta a la realidad local, ampliando la cobertura de opciones para el diseño bioclimático. Por todo ello, se puede considerar un resultado fiable también desde esta perspectiva.

PUNTO 2 DE DISCUSIÓN: APLICABILIDAD DE LA CARTOGRAFÍA PRESENTADA.

Una segunda cuestión a discutir sobre el resultado obtenido es si la cartografía obtenida tiene alguna otra aplicabilidad más allá de reflejar las estrategias de diseño necesarias para alcanzar el confort cada mes, según Givoni. Mediante el análisis efectuado en el proceso de investigación, se han evidenciado varias aplicaciones de gran potencialidad.

La primera de ellas es considerar esta cartografía como manual de diseño bioclimático de la región cartografiada. Cualquier técnico o promotor, con la localización de la parcela en el mapa, obtiene de forma directa la información relativa a las estrategias de diseño necesarias de adoptar para alcanzar el confort en cada uno de los meses. Todo esto, de forma directa, sin tener que buscar e interpretar los datos climáticos concretos (en muchos territorios esta búsqueda es de gran complejidad para un técnico particular).

Con la determinación de las estrategias reveladas en los mapas, junto con las condiciones específicas del entorno, el diseñador puede establecer sus propios criterios de diseño, adecuados a la parcela, al proyecto o a los requerimientos del uso o del propio promotor. De tal manera, se fomenta el surgimiento de propuestas de diseño eficientes y optimizadas.

Una segunda aplicación consiste en el conocimiento de la evolución de las necesidades de las propias estrategias en el propio territorio. Mediante la observación de todos los mapas en conjunto, se puede apreciar la evolución de

las zonas correspondientes a cada estrategia a lo largo del año.

Del análisis individual por estrategias, en el caso aplicado, se desprende cuáles zonas están en confort, no requiriendo ninguna estrategia incluso, en situación de temperaturas límite. Asimismo, se puede advertir que, en más de la mitad del territorio, no sería necesario disponer de sistemas de aire acondicionado en ningún periodo del año.

A partir del análisis de la evolución de las estrategias en el año, se determina la posibilidad de generar una zonificación climática anual, ajustada a la realidad física de cada territorio (Da Casa et al., 2017), y con ello establecer la coherencia con la normativa aplicable (en su caso, como en España, con el Código Técnico de la Edificación). Se pueden localizar las zonas de singularidad específica, lo que permitiría realizar ajustes concretos en las normativas para evitar la aparición de comportamientos anómalos, al no ajustarse a las características generales normativas.

Una tercera aplicación es su configuración como una herramienta de gran potencial para la investigación del territorio. Por un lado, permite realizar análisis comparativos de las zonas obtenidas, pero también de otros factores, como aquellos dependientes de la intervención humana, entre los cuales puede mencionarse:

- La ubicación de la población humana.
- Las vías de comunicación territorial.
- La arquitectura popular y vernácula del territorio
- El estudio de las necesidades según los usos del territorio.

Por otro lado, permite investigar, mediante análisis comparativo, sobre la relación con los condicionantes impuestos por las características del territorio. Así, por ejemplo, este método abre puertas al estudio de:

- La geología del territorio; con el objetivo de tener conocimiento de los materiales propios de cada área definida y su posible aplicación en el marco de la construcción, como también de las condiciones que la propia naturaleza del terreno impone, afectando de modo directo al microclima local.
- Los aspectos orográficos, topográficos y morfológicos, dadas las condiciones de variabilidad entre costa y alta montaña, y entre distintas altitudes.
- La hidrología, dentro de este ámbito de estudio, ya que influye en el grado de humedad ambiental. La presencia de agua (superficial o subterránea) puede implicar una sensible variación de las estrategias.
- La vegetación del territorio y su variación. Las modificaciones que la vegetación incorpora al microclima local están determinadas por su tamaño y tipología. Entre ellas, las principales serán el aporte de humedad, y una relativa suavidad climática, así como la capacidad de proporcionar sombras y protección del viento.

- La incidencia del viento en el territorio. Variaciones de pendiente, o relieve, y las obstrucciones existentes pueden alterar los parámetros obtenidos en los observatorios meteorológicos. Los factores que inciden en los cambios de velocidad, dirección y frecuencia de los vientos dominantes afectan a las necesidades de ventilación, protección a viento o a la combinación de ambas, necesarias para conseguir el confort.
- La incidencia de la radiación solar y los valores de incidencia por meses. Se puede determinar la capacidad de captación en los meses menos favorables y la necesidad de su protección en los meses que registran valores máximos.

PUNTO 3 DE DISCUSIÓN: CAPACIDAD DE EXTRAPOLAR LA METODOLOGÍA UTILIZADA A OTROS TERRITORIOS

El último punto de discusión planteado se pregunta si la metodología propuesta tiene capacidad de ser extrapolada para ser aplicada a otro territorio. Pues bien, tras el desarrollo de la investigación se puede deducir su fácil aplicación a cualquier territorio, independientemente de la extensión del mismo.

Para un correcto uso de esta metodología es, sin embargo, fundamental tener conciencia de sus limitaciones. Hay que tener en cuenta que:

- La primera condición es disponer de suficientes observatorios meteorológicos con los datos que se precisan, con una distribución geográfica homogénea. La disposición geográfica distante entre observatorios puede obviar algunas situaciones intermedias. A mayor número de observatorios, mejora la precisión de la cartografía resultante.
- Al utilizarse datos climáticos que expresan medias mensuales, no se contemplan situaciones extremas (estas pudiesen registrarse, sin embargo, en la etapa de preparación de los datos). No se puede tratar la información obtenida como una instrucción de actuación. La cartografía así obtenida aporta una idea de orden y magnitud de las estrategias en la zona geográfica de estudio, pudiendo diferenciar el comportamiento general de diversas zonas identificadas.
- Los límites de las zonas obtenidas, al constituir agrupaciones de datos, pueden tener un cierto grado de inexactitud. En caso de duda, se debería hacer un análisis en mayor profundidad de las características del entorno.

Estos son aspectos que se plantea mejorar en la progresión del proyecto de investigación del que es fruto este trabajo. En ese sentido, es de reseñar que, para las administraciones públicas de cada territorio, el coste de la obtención de estos datos es mínimo, ya que generalmente se dispone del acceso a dicha información. Esos beneficios se multiplican, en el caso de territorios donde no se cuenta con una normativa específica para la eficiencia energética o en los que no se posee climas de referencia.

La cartografía presentada facilita, por último, su potencial aplicación como manual de diseño bioclimático, para la cual vale una recomendación final. El proceso se iniciaría con la localización de la parcela en el mapa. Se obtiene así de forma directa la información relativa a las estrategias de diseño a adoptar, para alcanzar el confort en cada uno de los meses del año. Se debe considerar los resultados obtenidos como una aproximación a la situación real, por lo que ha de ser el diseñador quien establezca los criterios de diseño y tome las decisiones que considere oportunas, siempre teniendo en cuenta el resto de los parámetros (la parcela, el objeto del proyecto, o los requerimientos del uso o del propio promotor).

CONCLUSIONES

La principal aportación de la investigación realizada y aquí expuesta es la metodología para elaborar una cartografía regional, cuyo fin consiste en aplicar estrategias bioclimáticas para alcanzar niveles adecuados de confort térmico, siguiendo la carta bioclimática de Givoni.

En el desarrollo del trabajo ha quedado validada la metodología en cuestión a través de su aplicación a un territorio concreto en España (la Comunidad Autónoma de Galicia), al obtenerse como resultado un conjunto de mapas de periodicidad mensual, donde se establecen las estrategias de intervención necesarias, bajo el prisma de los parámetros bioclimáticos, que se deben adoptar para poder alcanzar el confort térmico en los edificios, en dicho territorio y en dicho periodo.

La cartografía así producida se convierte en una potente herramienta para el diseño bioclimático en el territorio estudiado. En consecuencia, las posibilidades de desarrollar arquitectura bioclimática son evidentes. La herramienta, en efecto, constituye un campo abierto y pleno de posibilidades para insertarse en los sistemas habituales de proyectación arquitectónica. El desarrollo y aplicación de estas estrategias contribuye a alcanzar los objetivos ODS, así como de todas las normativas de eficiencia energética, tanto respecto a la reducción de consumos, como al aumento de la optimización térmica de los edificios desde su propio diseño.

La sistemática aquí descrita es susceptible de ser aplicada a cualquier territorio que se considere preciso, más allá de la extensión del mismo. Con ello, se puede, además, disponer de una herramienta para aumentar el conocimiento del propio territorio cartografiado.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de esta investigación se realiza dentro del Proyecto ENE2013-48015-C3-2R (*Integrated system for energy optimization and reduction of building CO2 footprint: BIM. Indoor mapping, UAV technologies and advanced energy simulations tools*), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arava, J.L. (2014). Experiencias en la aplicación operativa de un método multivariado de imputación de datos meteorológicos. *Tecnología en Marcha*, 27(3), 70-79.
- Balter, J., Ganem, C., Discoli, C. (2016). Energy savings for the cooling of indoor spaces through the evaluation of solar control systems in high-rise residential buildings: the case of the oasis city of Mendoza, Argentina. *Hábitat sustentable*, 6(1), 73-83.
- Cartaya, S., Zurita, S. y Montalvo, V. (2016). Métodos de ajuste y homogenización de datos climáticos para determinar índice de humedad de Lang en la provincia de Manabí, Ecuador. *La Técnica*, (16), 94-106.
- Corral, J. A. R., García, G. M. y Romero, G. E. G. (2018). Sistema de información agroclimático para México-Centroamérica. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(1), 1-10.
- Couret, D. G., Guzmán, L. A. R., Milián, N. G., García, E. R. y Salazar, M. L. (2015). Evaluación cualitativa de la influencia del diseño arquitectónico en el ambiente interior. *Arquitectura y Urbanismo*, 36(3), 53-66.
- Da Casa, F. (2000). Adecuación bioclimática en la subregión de Madrid, para el diseño de los edificios y sus elementos constructivos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid (edición digital Biblioteca UPM- ID 563).
- Da Casa, F., Echeverría, E. E. y Celis, F. (2017). Zonificación climática para su aplicación al diseño bioclimático. Aplicación en Galicia (España). *Informes de la Construcción*, 69(547), e218. DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/id55319>.
- Dávila, J. (2015). Arquitectura bioclimática y sustentable basada en los requerimientos del usuario-sitio. Diseño biblioteca pública de Santiago de Querétaro, Querétaro. Semana de la sustentabilidad CyAD. UAM Azcapotzalco.
- Díaz, F., Montero, G., Mazona-Aguilar, L. (2018). Solar Radiation Maps. En Pérez, R. (Ed.), *Wind Field and Solar Radiation Characterization and Forecasting* (pp. 229-257). Springer, Cham.
- Echeverría, E., García, R., Celis, F. y Saelzer, G. (2019). Integrated design experiences for energy-efficient housing in Chile, *Construction Innovation*, 19(2), 236-255. DOI: <https://doi.org/10.1108/CI-05-2017-0042>
- Enríquez, A., Díaz, R., Martín, R. y Santos, M. (2017). Environmental impacts of climate change adaptation. *Environmental Impact Assessment Review*, 64, 87-96. DOI: 10.1016/j.eiar.2017.03.005.
- Esteves, A. (2018). Arquitectura bioclimática y sustentable. Mendoza. Ed: Alfredo Esteves.
- Givoni, B. (1969). *Climate and architecture*. Amsterdam; London; New York: Ed. Elsevier.
- Gou, S., Li, Z., Zhao, Q., Nik, V.M. Y Scartezzini, J. (2015). Climate responsive strategies of traditional dwellings located in an ancient village in hot summer and cold winter region of China. *Building and environment*, 86, 151-165.
- Guzmán-Hernández, I. A., Cano, F. y Roset, J. (2019). Problemática de los sistemas pasivos de climatización en zonas tropicales cálido-húmedas. *AULA Revista de Humanidades y Ciencias Sociales*, 64(4). Recuperado de <https://revistas.unphu.edu.do/index.php/aula/article/view/104>
- Halawa, E. y Van Hoof, J. (2012). The adaptive approach to thermal comfort - A critical overview. *Energy and Buildings*, 51, 101-110. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.04.011.
- Houghten, F., Yagloglou, C.P. (1923). Determining lines of equal comfort. *ASHVE Transactions*, 29(10), 163-176.
- Kurbán, A. y Cúnsulo, M. (2017). Confort térmico en espacios verdes urbanos de ambientes áridos. *Hábitat Sustentable*, 7(1), 32-43.
- Larrumbide, E. y Bedoya, C. (2015). El comportamiento del hueco de ventana en la arquitectura vernácula mediterránea española ante las necesidades de acondicionamiento solar. *Informes de la Construcción*, 67(539), 120-130. DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.056>.
- Luciani-Mejía, S., Velasco-Gómez, R. y Hudson, R. (2018). Eco-friendly coverings: Analysis of the use of ventilated facades in hot, humid weather. *Revista de Arquitectura*, 20(2), 62-77.
- Marco, R., Sariñena, M.A., López, M.S. y López, M.L. (2016). AW-isobioclimas: aplicación web para consultar los isobioclimas de la España peninsular y balear. En *X Congreso Internacional AEC: Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio*. DOI: <http://dx.doi.org/10.14198/XCongresoAECALicante2016-20>.
- Medina Patrón, N. y Escobar Saiz, J. (2019). Envoltantes eficientes. Relación entre condiciones ambientales, espacios confortables y simulaciones digitales. *Revista de Arquitectura*, 21(1), 90-109.
- Mena, R., Rodríguez, F., Castilla, M. y Arahall, M.R. (2014). A prediction model based on neural networks for the energy consumption of CIESOL bioclimatic building. *Energy and Buildings*, 82, 142-155. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.06.052.
- Ooka, R. (2002). Field study on sustainable indoor climate design of a Japanese traditional folkhouse in cold climate area. *Building and environment*, 37, 319-329. DOI: 10.1016/S0360-1323(00)00085-8.
- Pérez, J.L., Ladrón de Guevara, I. y Boned, J. (2015). Incidencia del clima local en los procesos de planificación territorial: Análisis bioclimático de la Costa del Sol Occidental de Málaga (España). *EURE (Santiago)*, 41(123), 187-210. DOI: <https://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612015000300008>.
- Rodríguez Muñoz, N. A., Nájera Trejo, M. y Martín Domínguez, I. R. (2018). Análisis del desempeño térmico de los sistemas constructivos de un edificio de oficinas mediante simulaciones dinámicas. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 19(3), 279-289.
- Rubio-Bellido, C., Pulido-Arcas, J. A., Ureta-Gragera, M. (2015). Aplicabilidad de estrategias genéricas de diseño pasivo en edificaciones bajo la influencia del cambio climático en Concepción y Santiago, Chile. *Hábitat Sustentable*, 5(2), 33-41.
- Sánchez, D., Rubio, C., Marrero, M., Guevara, F.J. y Canivell, J. (2017). El control adaptativo en instalaciones existentes y su potencial en el contexto del cambio climático. *Hábitat Sustentable*, 7(2), 6-17.
- Solanki, S.K., Schüssler, M. y Fligge, M. (2000). Evolution of the Sun's large-scale magnetic field since the Maunder minimum. *Nature*, 408(6811), 445-7.
- Solanki, S.K., Usoskin, I. G., Kromer, B., Schüssler, M. y Beer, J. (2004). Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11.000 years. *Nature* 431 (7012), 1084-1087 (2004). DOI:10.1038/nature02995



Recibido 29/07/2019
Aceptado 12/11/2019

COSTE ÓPTIMO Y VIABILIDAD ECONÓMICA DE LA REHABILITACIÓN ENERGÉTICA DE VIVIENDAS EN ESPAÑA

OPTIMAL COST AND THE ECONOMIC VIABILITY OF ENERGY-
EFFICIENT HOUSING RENOVATION IN SPAIN

PABLO FERNÁNDEZ ANS

Arquitecto Técnico e Ingeniero de Edificación

Jefe Técnico

Rehabilita Energía, A Coruña, España

<https://orcid.org/0000-0001-7588-8153>pabloans@rehabilitaenergia.com

RESUMEN

Las exigencias europeas de ahorro energético en edificación establecen las directrices para que cada país miembro defina su propia metodología de coste óptimo, basada en términos de coste-eficacia, tanto para obra nueva como para rehabilitación. En el caso de España, actualmente esa metodología se encuentra en fase de desarrollo, por lo que el presente estudio aplica las directrices europeas y plantea diferentes medidas de rehabilitación pasivas en la envolvente para dos tipologías de edificios representativos en dicho país, un edificio entre medianeras en casco histórico y otro bloque de viviendas aislado, situados en cinco zonas climáticas diferentes. El trabajo relaciona la demanda y consumo energético ($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ año) con el coste global (€) para diferentes propuestas, obteniendo los valores de coste óptimo y períodos de amortización. Se propone, además, el indicador de "coste30", como el coste adecuado para conseguir amortizaciones inferiores a 30 años, y se amplía el análisis incorporando el salario mínimo interprofesional a la inversión. Los resultados concluyen que la metodología de coste óptimo permite obtener valores adecuados y que, en ese marco, existe un abanico de intervenciones válidas que dependen principalmente de la tipología, la zona climática y los costes de inversión.

Palabras clave

desempeño térmico, renovación arquitectónica, ahorro de energía, costes de construcción.

ABSTRACT

The European requirements for energy savings in buildings set the guidelines by which each member country establishes their own optimal cost methodology with respect to cost-effectiveness, both in new buildings and renovations. In the case of Spain, this methodology is currently in the development phase. Therefore, this study applies the European guidelines and proposes different passive renovation measures in envelopes for representative building typologies in Spain: a building between party walls in a historic district and an apartment building, located in five different climatic zones. The study relates energy consumption and demand ($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ year) and global cost (€) for different proposals, and determines optimal cost values and amortization periods. In addition, it proposes the cost30 indicator as the appropriate cost that enables amortization periods of less than 30 years; furthermore, the analysis is broadened by considering minimum wage in the investment. The results conclude that suitable values may be obtained with the optimal cost methodology, and that there are a variety of different valid renovation measures that depend mainly on typology, climatic zone and investment costs.

Keywords

thermal performance, building renovation, energy savings, construction costs.

INTRODUCCIÓN

Según las recomendaciones de la Comunidad Europea, actualmente es crucial reducir el consumo de energía en todos los sectores, siendo el sector de la edificación responsable del 40% total de dicho consumo. Las bases para esta reducción se establecen en la Directiva 2010/31/EU (Unión Europea, 2010), que desarrolla nuevos planteamientos y exigencias en el área de la eficiencia energética en la edificación y que han sido traspuestas a la normativa de España (Código Técnico de la Edificación, 2017).

Por lo que respecta a la rehabilitación de edificios, según estimaciones de la Unión Europea (2019), el 35% de los edificios tienen más de 50 años y el 75% del stock es ineficiente, con un porcentaje de renovación inferior al 1,2%, de modo que la rehabilitación presenta un gran potencial de mejora energética, que puede suponer reducir consumos y emisiones de CO₂ en torno a un 5%.

Las dos grandes líneas para abordar el problema energético de la edificación en Europa son la apuesta hacia estándares de edificios de consumo de energía casi nulo (Nearly zero-energy buildings, nZEB) y a la rehabilitación. En este último caso, el principal problema es la limitación física de un edificio ya existente, y las medidas a adoptar diferirán a las planteadas en edificios de nueva construcción, por lo que las soluciones deberán ser "técnica, funcional y económicamente viables", según recoge el artículo 7 de la Directiva (Unión Europea, 2010).

Pero en la ecuación energética es necesario incluir el parámetro económico que es clave para la viabilidad económica de las intervenciones, obligando a definir de entre todas las posibles opciones aquellas más adecuadas para alcanzar un equilibrio óptimo entre las inversiones realizadas y los costes energéticos ahorrados hasta su depreciación.

Por ello, la Comunidad Europea ha establecido la necesidad de que cada Estado miembro defina su propio marco metodológico (en fase de desarrollo en la mayoría de los países) que permita calcular y comparar los óptimos de rentabilidad, establecidos en el Reglamento Delegado RD 244/2012 y en sus directrices aclaratorias (Unión Europea, 2012b).

La metodología a aplicar deberá ser particularizada y dependerá de cada Estado miembro:

"Despite a common methodology to calculate cost optimal levels, the results are not fully comparable between countries, as Member States are free, for example, to choose the macroeconomic or financial perspective when calculating cost optimal values or have different national rules to calculate energy performance of buildings" (ECOFYS y EURIMA, 2015).

Con una metodología todavía sin aprobar en España acorde al RD 244/2012 y al estándar UNE-EN 15459:2008 (AENOR-CEN, 2008), la única referencia oficial (Ministerio de Fomento, 2013) establece un análisis comparativo de diferentes medidas y paquetes de medidas en edificios existentes y de nueva construcción, para diferentes zonas climáticas. Dada la ausencia actual de regulación y unas crecientes exigencias energéticas en la normativa, hacia estándares de NZEB, se considera el análisis del coste óptimo como un aspecto clave sobre el que se plantea el presente estudio.

Existen otros trabajos que ya han abordado el tema y que analizan un amplio espectro de edificios, entre ellos destacan: el Episcopo Project (2016); el proyecto Concerted Action (CA-EPBD, 2016) o las guías publicadas por ECOFYS en colaboración con la European Insulation Manufacturers Association (EURIMA) (2015); el proyecto TABULA (2012), que establece criterios comunes de clasificación del stock de edificios de acuerdo con la edad, tamaño y zona climática, además de otros parámetros energéticos.

Bajo la misma metodología, otros estudios analizan un amplio espectro de tipologías de edificios, para climas representativos de Europa e, incluso, consideran edificios de consumo casi nulo NZEB (Zangheri, Armani, Pietroboni y Pagliano, 2018), en Italia (Corrado, Ballarini y Paduos, 2014) o incluyendo otros usos como oficinas (Arumägi, Simson, Kuusk, Kalamees y Kurnitski, 2017) o educacional (Niemelä, Kosonen y Jokisalo, 2016).

Algunos autores plantean diferentes niveles definiendo "rehabilitaciones leves, *shallow renovations*" para intervenciones que alcanzan ahorros energéticos del 32%, o "rehabilitaciones intensas, *deep renovations*", que llegan al 80% (ECOFYS y EURIMA, 2012), denominadas en otras investigaciones como "rehabilitaciones básicas" o "*plus*" (Pérez, Calama y Flores, 2016).

También se han incorporado aspectos sociales que valoran el coste de inversión por familia (De la Cruz, De la Cruz y Simón, 2018) en niveles de inversiones leves, moderadas o intensas, dependiendo del coste en €/vivienda (Re-Programa, 2015), (Luxán, 2017).

No existe una metodología oficial de coste óptimo que aporte una base de datos representativa de edificios de viviendas en diferentes climas de España, ni tampoco una valoración de la repercusión económica a las familias. A partir de esas carencias se formula el estudio actual, para intervenciones pasivas en la envolvente, con el objetivo de valorar el coste y amortización de diferentes propuestas de rehabilitación energética en cinco zonas climáticas de España, en la Comunidad Autónoma de Andalucía, cuantificando los parámetros fundamentales de demanda energética conjunta de calefacción y refrigeración (kW•h/m² año) e inversión económica (€).

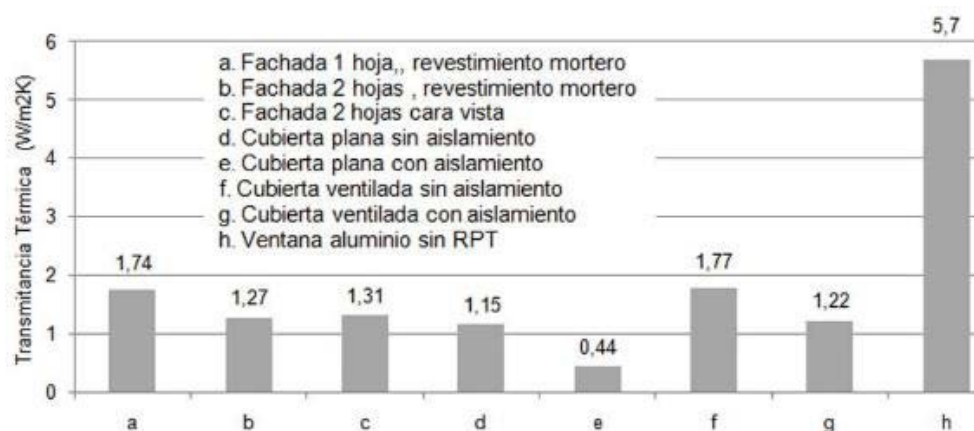


Figura 1. Valores de transmitancia térmica U (W/m²K) en los edificios de referencia. Fuente: Elaboración del autor.

Para conseguir dicho fin, se analizan dos tipologías de edificios residenciales representativos de una gran parte del parque edificado. Uno de ellos es un edificio entre medianeras, situado en un área de casco histórico, y el segundo, un edificio en bloque, ubicado en zona nueva residencial.

Forma parte del objetivo seguir las directrices de coste óptimo, priorizando intervenciones pasivas de acuerdo con el espíritu global de la Directiva 2010/31/EU, e incorporar la capacidad financiera de las familias incluyendo el salario mínimo interprofesional.

METODOLOGÍA

La metodología empleada en el estudio se indica a continuación:

- Definición de dos edificios de referencia, un edificio entre medianeras (EM) y un edificio en bloque (EB), así como sus condiciones constructivas y geométricas, representativas de gran parte del parque edificado en España, en base a datos estadísticos.
- Definición de cinco zonas climáticas de estudio, de acuerdo con el CTE (2017).
- Definición de las intervenciones pasivas a realizar sobre la envolvente, agrupadas en medidas/paquetes/variantes, según las directrices de la metodología de coste óptimo del RD 244/2012.
- Cálculo energético, mediante uso de la aplicación de simulación dinámica Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC) (2017), herramienta reconocida en la normativa española, para obtener valores de demanda energética conjunta de calefacción y refrigeración, y consumos de energía primaria (kW•h/m² año).

- Cálculo económico, a través del cual se obtiene el coste global y el valor residual de cada medida/paquete/variante. El coste global se compone de la inversión inicial según precios de mercado y bases de datos de la construcción, más el coste de la energía durante la vida útil. Se amplía el estudio valorando la repercusión económica por familia respecto al salario mínimo interprofesional (SMI).
- Representación gráfica de coste óptimo y amortizaciones. Se amplía el estudio con la propuesta de "coste30", para lograr amortizaciones inferiores a 30 años.

DEFINICIÓN DE LOS EDIFICIOS DE REFERENCIA

Para abarcar el ámbito del estudio se han definido dos edificios de referencia del parque edificado, de acuerdo a publicaciones estadísticas, lo que permitirá ampliar el área de conocimiento y realizar un análisis comparativo entre ambos.

Respecto a la superficie, en Andalucía la mayor parte de las viviendas (29,51%) tiene una superficie comprendida entre 76 y 90 m² útiles (Instituto Nacional Estadística [INE], 2019), con un gran porcentaje de fachadas de ladrillo (54,35%) con revestimientos de mortero (34,99%), cubierta plana transitable y carpinterías exteriores de aluminio (86,25%), (Ministerio de Fomento, 2018).

Con esa caracterización constructiva se han definido los elementos de la envolvente de los casos de referencia, cuyos valores de transmitancia térmica resultantes se exponen en la Figura 1.

Considerando los parámetros anteriores, se han determinado dos edificios de referencia reales, un edificio entre medianeras (EM) y un edificio en bloque (EB) (Figura 2), cuyas características se resumen en la Tabla 1.



Figura 2. Edificios de referencia: edificio medianeras (EM) y edificio bloque (EB). Fuente: Fotografías del autor.

	Descripción edificio	Geometría (Sup. útil / n° viviendas)	Ventanas (m ² / %)	Características constructivas U (W/m ² K)
Edificio medianeras (EM)	Años: 1900-1920 Solar: 180m ² Vol.: 2.250m ³ Sup. fachadas: 111,56m ² Sup. construida: 450m ²	100 m ² / 2	18,54m ² / 2,56 %	Muro ladrillo, 1 hoja: U=1,74 Medianeras: U=2,33 Cubierta plana "andaluza": U=1,15 Ventana aluminio, vidrio sencillo. U=5,70, g (factor solar)=0,85
Edificio bloque (EB)	Años: 1961-1980 Solar: 392,95m ² Vol.: 19.254,55m ³ Sup. fachadas: 2.732,80m ² Sup. construida: 2.841m ²	90 m ² / 20	771,20m ² / 18,60 %	Muro ladrillo visto, 2 hojas: U=1,31 Cubierta plana "catalana": U=1,22 Ventana aluminio, vidrio sencillo. U=5,70, g (factor solar)=0,85

Tabla 1. Características de los edificios de referencia. Fuente: Elaboración del autor.

- Edificio entre medianeras (EM): situado en casco histórico, tres plantas, una fachada exterior y un patio interior.
- Edificio en bloque (EB): residencial de viviendas, aislado, doce plantas y cuatro fachadas exteriores.

vegetales (Molina y Fernández-Ans, 2013) a estrategias de ventilación natural también utilizadas en climas templados continentales (Mercado, Esteves, Barea y Filippín, 2018).

Los casos de estudio se establecen para la Comunidad de Andalucía (España), que comprende siete tipos de clima representados en la Figura 3; los cuales, a su vez, corresponden a cinco zonas climáticas, de acuerdo con la zonificación climática establecida por la normativa (CTE, 2017, apéndice B), por lo que el estudio es extrapolable a otras provincias.

DEFINICIÓN DE LAS ZONAS CLIMÁTICAS

En España se definen quince zonas climáticas en el CTE (2017) abarcando un amplio espectro de áreas frías y cálidas y que han generado en la arquitectura tradicional diferentes soluciones y estrategias bioclimáticas pasivas en su adaptación al medio, desde el uso de cubiertas

La determinación de zonas climáticas se define mediante una letra, correspondiente a la división de invierno, y un número, correspondiente a la división de verano, según la siguiente clasificación:

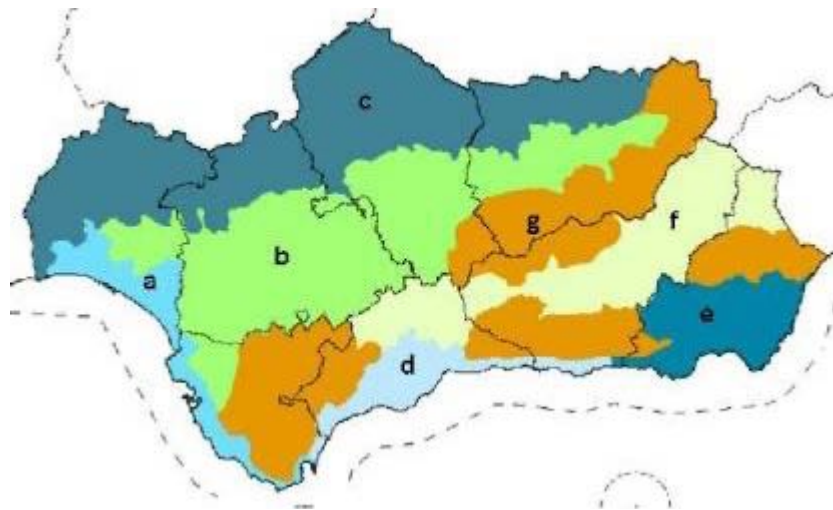


Figura 3. Tipos de clima mediterráneo en Andalucía: Oceánico (a), Continental (b), Semiárido (c), Subtropical (d), Subdesértico (e), Continental (f), De montaña (g). Fuente: Consejería de Medio Ambiente (2019).

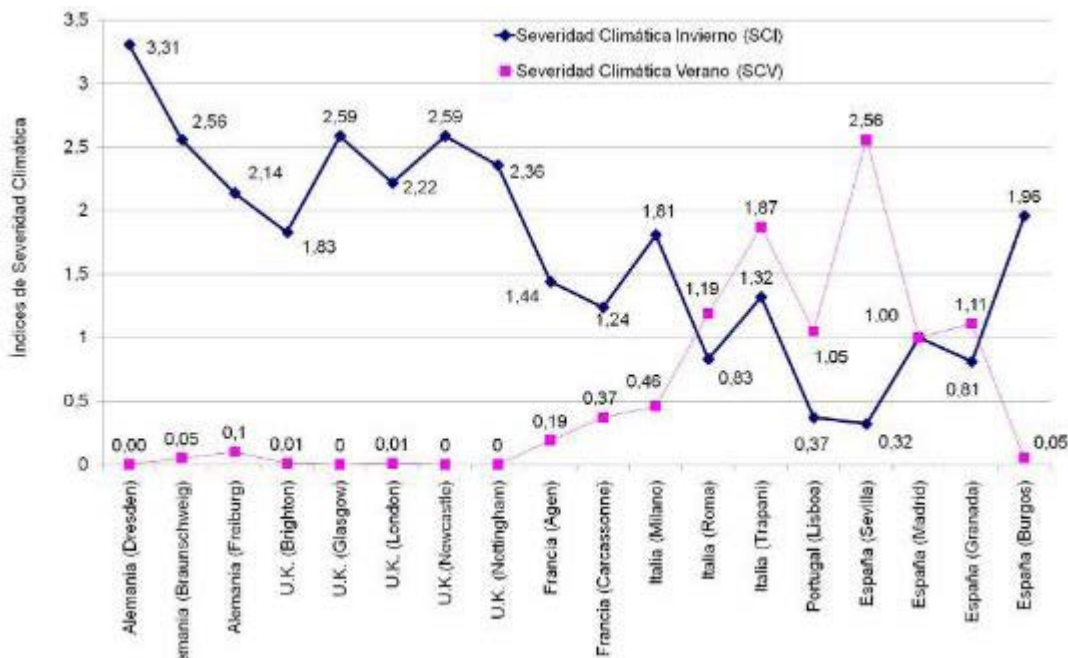


Figura 4. Índices de Severidad Climática en Europa. Fuente: Elaboración del autor. Fuente: Passive-On Project (European Commission, 2007).

- Zona climática A3: Cádiz-Málaga
- Zona climática A4: Almería- Huelva
- Zona climática B4: Córdoba- Sevilla
- Zona climática C3: Granada
- Zona climática C4: Jaén

En comparación con otras ciudades europeas, algunas zonas presentan altos índices de severidad climática en verano (SCV) e intermedios en invierno (SCI), tal como se expone en la Figura 4.

DEFINICIÓN DE INTERVENCIONES PASIVAS

Se determinan, en este punto, diferentes intervenciones pasivas de rehabilitación que ofrecen una reducción de la demanda energética del edificio, agrupadas en: medidas, paquetes y variantes, en consonancia con la Directiva 2010/31/EU y otros estudios (Suárez y Frago, 2016).

Las medidas son intervenciones en fachadas y cubiertas, por el interior y por el exterior (SATE, Sistema Aislamiento Térmico Exterior) así como la sustitución de ventanas. En

Medidas		Variante 1: Paquetes individuales	Variante 2: Intervención total
Fachada exterior	5 cm EPS (U =0,52) 5 cm PIR (U =0,42)	Fachada exterior (EPS) Fachada interior (XPS) Cubierta exterior (BA) Cubierta interior (MW) Ventana aluminio, vidrio bajo e Ventana PVC, vidrio bajo e	Fachada exterior (EPS) + Cubierta exterior (BA) + Ventana PVC, vidrio bajo e
Fachada interior	5 cm EPS (U=0,50) 5 cm XPS (U=0,47) 5 cm MW (U=0,53) 5 cm TER (U=0,23) 5 cm PUR (U=0,48)		
Cubierta exterior	7 cm XPS (U=0,34) 7 cm BA (U=0,47)		
Cubierta interior	7 cm EPS (U=0,35) 7 cm MW (U=0,37)		
Carpinterías aluminio	Al +vidrio (U=2,92) Al +vidrio bajo e (U=1,84)		
Carpinterías PVC	PVC + vidrio (U=2,74) PVC + vidrio bajo e (U=1,66)		

Tabla 2. Medidas/paquetes/variantes adoptadas. Fuente: Elaboración del autor.

Temperatura consigna (°C)	Verano: 25-27 °C. Invierno: 17-20 °C
Ventilación	Verano: 4/ren/hora por la noche (1-8h)
Infiltraciones	0,24 ren/hora para bloques de viviendas
Huecos	Factor de sombra 0,7; persianas bajadas 30%.
Demanda ACS /vivienda	56 litros/día a 60°C
Climatización	60% viviendas: Bomba calor aire/aire 2x1 (EER 2,5; COP 2,7) 40% viviendas: Bomba calor aire/aire 1x1 (EER 2,5; COP 2,7) + calefactor eléctrico 2kW térmicos (Efecto Joule)

Tabla 3. Principales parámetros de cálculo considerados en HULC. Fuente: Elaboración del autor.

todos los casos se han cumplido los valores límites de transmitancia térmica (CTE, 2017).

Los paquetes definen las soluciones constructivas empleando diversos aislantes (EPS, expanded polystyrene; PIR, Polyisocyanurate; XPS, extruded polystyrene; PUR, Polyurethane foam; MW, mineral wool).

Las variantes agrupan diferentes medidas y paquetes, ofreciendo varias opciones de rehabilitación energética.

En cuanto a los espesores de aislamientos, en fachadas se definen de 5cm y en cubiertas, de 7cm, compuestas por baldosas de hormigón con aislamiento XPS incorporado (BA, baldosas aislantes). Las carpinterías exteriores son de aluminio con rotura de puente térmico o PVC, en ambos casos con vidrios aislantes y bajo emisivos.

Finalmente, se ha analizado una Variante 1, compuesta de varias medidas individuales, y otra Variante 2 como intervención total (Tabla 2).

CÁLCULO ENERGÉTICO

El cálculo se ha realizado con la aplicación de simulación dinámica HULC que permite establecer las demandas y consumos de energía primaria necesarios para mantener unas condiciones de confort predefinidas, según condiciones operacionales de temperatura de consigna, ocupación, iluminación y ventilación indicadas en el Apéndice C, perfiles de uso residencial (CTE, 2017, apéndice C).

Los principales parámetros de cálculo se indican en la Tabla 3; se ha considerado que un 60% de las viviendas posee

A3			Zonas climáticas demanda / consumo (kW•h/m ² año)				
			A4	B4	C3	C4	
Variante 1: Paquetes individuales							
Muros	EM	Fachada exterior-EPS	28,37/65,2	38,89/71,9	56,18/91,6	78,72/ 128,3	73,83/ 117,4
		Fachada interior-XPS	32,92/74,5	40,22/76,1	58,06/93,4	80,58/ 137,7	76,08/ 114,9
	EB	Fachada exterior-EPS	40,27/91,8	51,72/97,7	72,88/120,9	113,03/192,1	100,61/151,9
		Fachada interior-XPS	42,01/94,94	53,55/102,8	75,79/125,8	115,95/197,1	101,99/164,2
Cubiertas	EM	Cubierta exterior-BA	35,62/80,6	43,86/84,49	61,85/110,5	88,60/ 151,4	82,07/ 132,3
		Cubierta interior-MW	35,24/79,8	43,32/83,4	61,04/109,1	87,54/ 149,6	81,09/ 130,7
	EB	Cubierta exterior-BA	47,33/107,1	59,39/114,4	83,76/149,1	130,14/222,4	114,87/185,2
		Cubierta interior-MW	47,13/106,7	59,15/113,9	83,44/148,5	129,67/221,6	114,45/184,5
Ventanas	EM	Ventana alum., bajo e	27,79/62,9	33,41/64,4	47,93/85,6	66,33/ 113,3	63,13/ 101,8
		Ventana PVC, bajo e	30,16/68,3	36,69/70,7	51,47/91,9	71,03/ 121,4	67,71/ 109,1
	EB	Ventana alum., bajo e	41,19/93,1	52,45/100,7	74,04/131,8	112,51/191,3	100,02/161,2
		Ventana PVC, bajo e	40,80/92,2	52,02/99,8	73,42/130,7	111,31/189,2	99,14/ 159,8
Variante 2: Intervención total							
Muro + Cubierta + Ventana	EM	Fachada exterior-EPS Cubierta exterior-BA Ventana PVC, bajo e	28,37/63,8	34,63/57,1	45,22/71,4	54,79/ 83,82	63,66/ 94,6
Muro + Cubierta + Ventana	EB	Fachada exterior-EPS Cubierta exterior-BA Ventana PVC, bajo e	36,18/81,4	46,29/76,4	63,43/100,2	89,48/ 136,9	100,41/148,6

Tabla 4. Demanda conjunta / Consumos (kW•h/m² año). Edificio medianeras (EM), edificio bloque (EB). Fuente: Elaboración del autor.

un sistema multizona 2x1 de expansión directa aire/aire, y el 40% restante, un sistema compacto 1x1, incluyendo un apoyo de calefactores eléctricos.

En la Tabla 4 se presentan resultados de demanda conjunta de calefacción y refrigeración, y de consumos (kW•h/m² año), para las diferentes variantes y las cinco zonas climáticas.

despreciables. Se han tomado como referencia precios de fabricantes (DANOSA, s/f; URSA, s/f) y bases de precios de construcción en España (ATAYO, s/f; COAATGU, 2018; Junta de Andalucía, 2017).

El coste anual recoge los debidos al funcionamiento en un período de 30 años, asociados principalmente a los costes de la energía. Los costes de sustitución y mantenimiento se consideran nulos.

El coste de la energía se cuantifica con un mix 59,10% eléctrico (0,12€/ kW•h) y 40,90% de otras fuentes (0,035€/ kW•h), según los factores de paso de energía primaria oficiales (Gobierno de España, 2016) y el precio del kW•h (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDEA], 2016). El incremento anual de coste de la energía se ha estimado en el 4%.

CÁLCULO ECONÓMICO

COSTE GLOBAL

Para cada propuesta se calcula un coste global, suma del coste de inversión, funcionamiento y sustitución, así como el coste de eliminación, de acuerdo con la metodología europea (Unión Europea, 2012a) (Figura 5).

En los costes de inversión inicial se contemplan los trabajos de demolición y preparación previos, los materiales y la instalación (mano de obra, herramientas, andamios, contenedores de escombros), considerando los derivados del diseño

VALOR RESIDUAL

Es necesario considerar el valor residual a 30 años de las intervenciones, descontándolo del coste de inversión inicial según la depreciación lineal definida en el RD 244/201 (Figura 6).

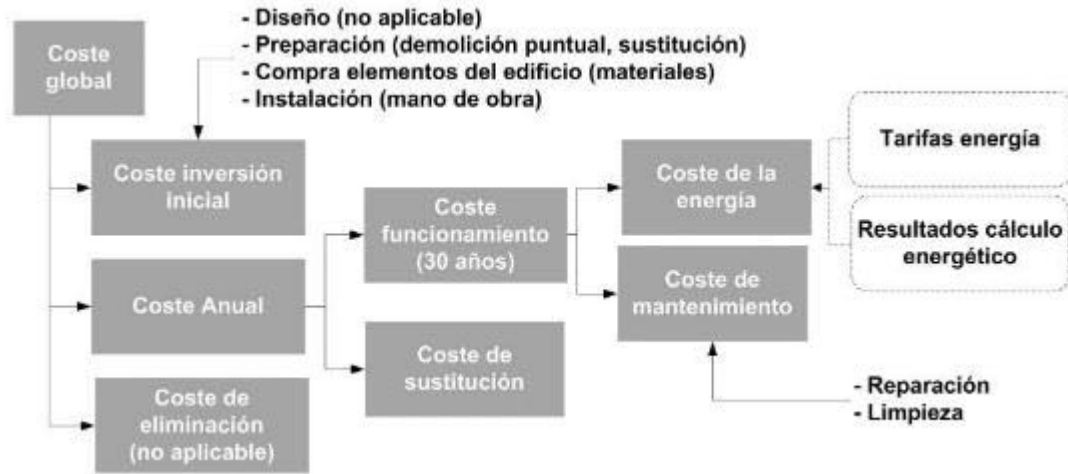


Figura 5. Categorización de costes según el marco europeo. Fuente: Directrices RD 244/2012 (Unión Europea, 2012a), Elaboración del autor.

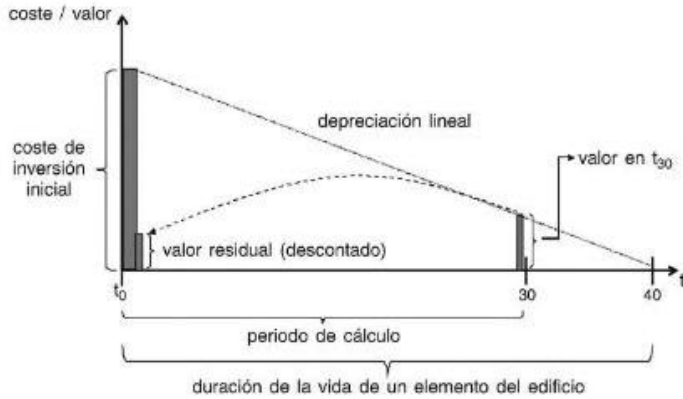
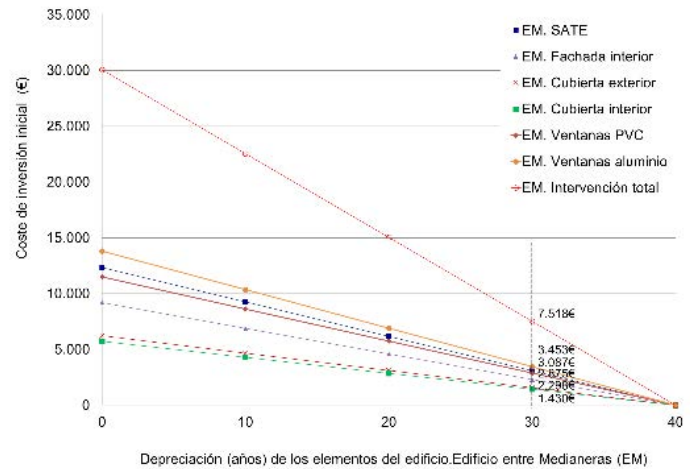


Figura 6. Depreciación del elemento de un edificio. Fuente: Directrices RD 244/2012 (Unión Europea, 2012a), Elaboración del autor.



Considerando una depreciación máxima del 100% a 40 años, a 30 años se obtiene un valor residual del 25%, límite asociado a la vida útil de fachadas; los resultados respectivos se indican en las Figuras 7 y 8 para la Variante 1 (6 medidas individuales) y la Variante 2 (intervención total), en las dos tipologías de edificios analizadas.

RESULTADOS ECONÓMICOS

A partir de los resultados anteriores, resulta el valor de coste global en 30 años (inversión inicial + consumo con 4% incremento precio energía - valor residual) en €/m² de superficie construida, indicado en la Tabla 5; los costes de inversión inicial se valoran en m² de cada solución constructiva (fachada, cubierta o ventana).

Se incorpora el aspecto social, valorando la capacidad económica para abordar el coste de la inversión inicial tanto por vivienda como por unidad familiar, en base al salario mínimo interprofesional (SMI), establecido en España en 900

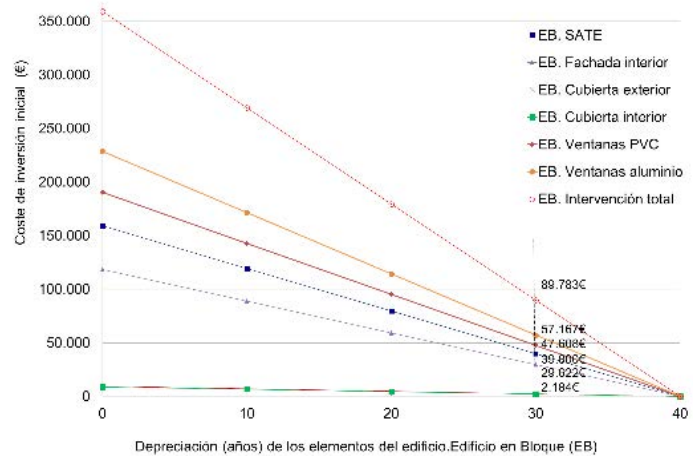


Figura 7. Depreciación y valor residual a 30 años. Edificio medianeras (EM). Fuente: Elaboración del autor.

Figura 8. Depreciación y valor residual a 30 años. Edificio en bloque (EB). Fuente: Elaboración del autor.

	Coste Global €/m ² construido		Inversión inicial €/m ² solución constructiva	Repercusión €/m ² vivienda		Coste €/familia		Nº veces SMI	
	EM	EB		EM	EB	EM (2 fam.)	EB (20 fam.)	EM	EB
Variante 1. Paquetes individuales									
Fachada ext. - EPS	48,95	149,12	48,92	27,44	56,04	6.170	7.960	9	11
Fachada int.- XPS	48,24	143,00	36,41	20,42	41,71	4.600	5.925	7	8
Cubierta ext. - BA	45,99	128,37	41,48	13,83	3,34	3.110	470	4	1
Cubierta int. - MW	44,78	127,64	38,14	12,71	3,07	2.860	440	4	1
Ventana Al	50,81	169,91	296,51	30,69	80,50	6.910	11.430	10	16
Ventana PVC	49,33	158,78	246,93	25,56	67,04	5.750	9.520	8	14
Variante 2. Intervención total									
Fachada ext. EPS +Cubierta ext. BA +Ventana PVC	78,49	191,03	-	66,83	126,43	15.040	17.960	21	26

Tabla 5. Coste Global e inversión por familia. Edificio medianeras (EM), edificio bloque (EB). Fuente: Elaboración del autor.

€/mes para el año 2019 y contemplando a dos familias en el edificio entre medianeras y veinte familias en el edificio en bloque.

Los resultados indican que las intervenciones en el edificio entre medianeras suponen entre 4 y 21 veces el SMI, y de 1 a 26 para el edificio en bloque. Los valores menores se corresponden a intervenciones en cubiertas y los mayores para la Variante 2 de intervención total.

El coste por unidad familiar permite definir niveles de intervención acorde a otras publicaciones, que las delimitan en inversiones leves (<2.500 €/vivienda), moderadas (2.500-4.500 €/vivienda) o intensas (>4.500 €/vivienda), (Re-Programa, 2015). Estudios similares establecen para la Región Metropolitana de Chile tres niveles de intervención según los ingresos familiares (Low-Medium-High incomes), con porcentajes muy bajos de inversión inicial por parte de las familias 2%-3%-0%, que son financiados con ayudas del Gobierno y préstamos bancarios (García y Croxford, 2015); y otros autores consideran soluciones de bajo coste para inversiones inferiores a 4.200 €/familia (Luxán, 2017).

COSTE ÓPTIMO Y AMORTIZACIÓN

Los valores obtenidos de coste global a 30 años se relacionan con los consumos anuales (kW·h/m²) calculados en HULC, obteniéndose el coste óptimo representado en las Figuras 9 y 10. Aquí es el edificio entre medianeras el que ofrece menores consumos.

Los resultados permiten seleccionar el coste óptimo más adecuado entre las diferentes propuestas, de forma que los valores del eje x indican el nivel óptimo de rentabilidad; y para aquellas propuestas con costes similares, la que tenga el menor uso de energía primaria será la que defina el nivel óptimo.

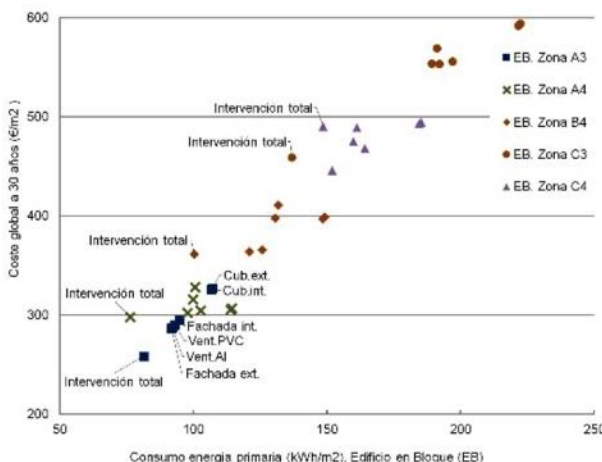
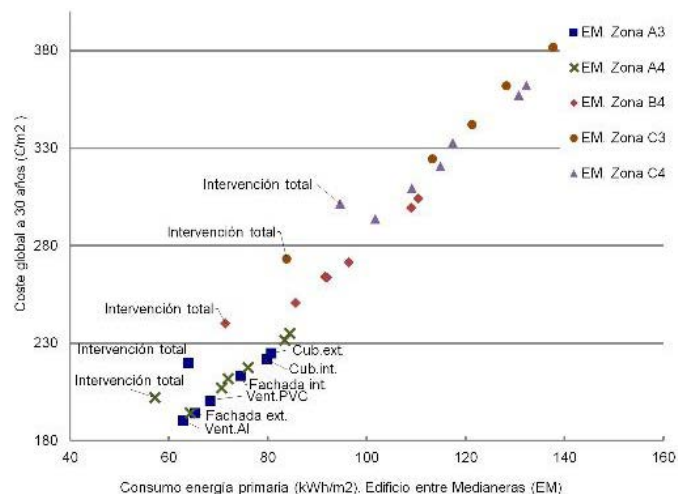


Figura 9: Coste óptimo. Edificio medianeras (EM). Fuente: Elaboración del autor.

Figura 10: Coste óptimo. Edificio bloque (EB). Fuente: Elaboración del autor.

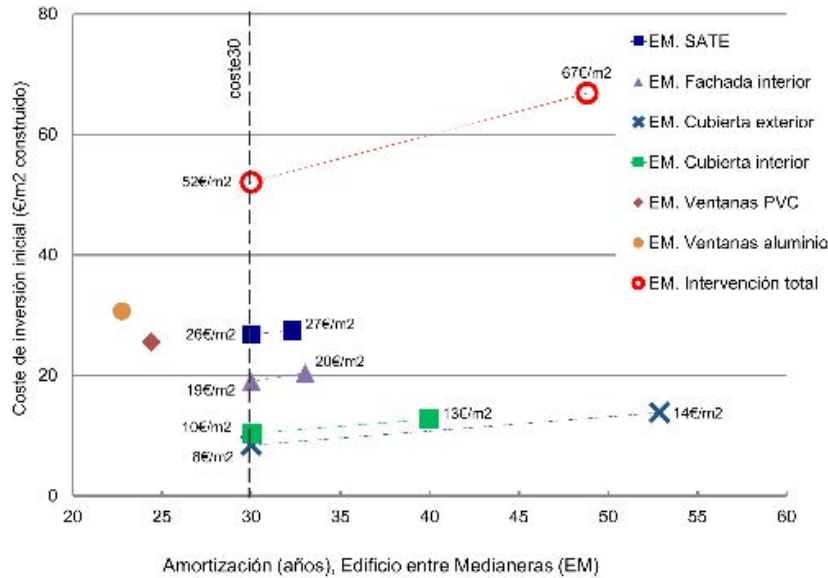


Figura 11. Amortizaciones (años) y "coste30" (€/m²), valores medios de las 5 zonas climáticas. Edificio medianeras (EM). Fuente: Elaboración del autor.

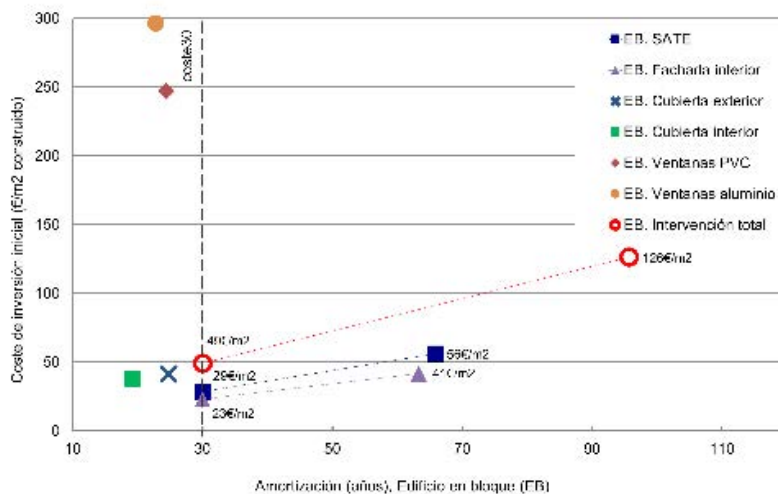


Figura 12. Amortizaciones (años) y "coste30" (€/m²), valores medios de las 5 zonas climáticas. Edificio Bloque (EB). Fuente: Elaboración del autor.

AMORTIZACIONES Y PROPUESTA DE "COSTE30"

Una vez determinado el coste óptimo se calculan los períodos de amortización (años) de cada intervención, dividiendo el coste de inversión inicial (€) entre el ahorro de energía obtenido (€/año).

Para amortizaciones superiores a 30 años, el estudio propone el valor de "coste30", fijando el valor de amortización y calculando el coste inicial. Este valor es un indicador de cuánto sería necesario abaratar el coste inicial con el fin de obtener amortizaciones en un máximo de 30 años. En aras de facilitar la interpretación de resultados, todos

los valores se han calculado con los valores medios de las cinco zonas climáticas. Las figuras 11 y 12 reflejan las amortizaciones calculadas y los valores de "coste30".

Es necesario indicar que algunas de las medidas ya ofrecen amortizaciones inferiores a 30 años, como las ventanas de PVC o aluminio, en ambos modelos, y las intervenciones de cubierta para edificio en bloque.

Los resultados indican que, para el caso de la intervención total, se requiere reducir el coste de 67 a 52 €/m² construido, en el edificio medianeras, y de 126 a 49 €/m², en el edificio en bloque.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología del coste óptimo se fundamenta en modelos de cálculo energéticos en condiciones de uso estándar, que no dejan de ser estimaciones del comportamiento real de los edificios.

Los resultados de demandas energéticas muestran una gran variabilidad dependiendo de la zona climática: los menores valores se dan en la zona A3 (Cádiz-Málaga) y los mayores, en la zona C3 (Granada).

Es necesario desasociar las amortizaciones con el consumo, ya que consumos elevados ofrecen retornos de la inversión muy bajos. Entre los modelos calculados, el resultado varía notablemente si se consideran perfiles de consumo estándar o altos, cuando las directrices europeas apuestan claramente por reducciones de los consumos energéticos.

Las mejores amortizaciones se obtienen con la renovación de carpinterías, en torno a 23 años, similar a las intervenciones en cubiertas para el caso del edificio en bloque (Figuras 11 y 12).

Los resultados del indicador "coste30" ofrecen valores diferentes, según el modelo. En el edificio en bloque, los costes debieran de reducirse un 61% para la intervención total, y en torno al 45% para intervenciones en fachada por el exterior e interior. Para el caso del edificio entre medianeras, los resultados son menos exigentes, debido a la menor superficie de envolvente exterior, necesitándose reducciones del 23% para la intervención total, 35% en cubiertas y aproximadamente un 5% en intervenciones en fachada por el exterior e interior.

CONCLUSIONES

La metodología desarrollada en este trabajo se basa en el marco europeo y permite generar indicadores válidos, sin embargo, la definición de una metodología para España aclararía algunos criterios del cálculo y de precios de la energía que afectan a la obtención de resultados.

Se ha considerado un incremento moderado del 4% del precio de la energía, pero su variabilidad en un horizonte a 30 años modificaría notablemente los resultados obtenidos; con todo, su encarecimiento mejoraría los plazos de amortización.

No existe un único valor de coste óptimo, dado que se presentan diversas opciones, dependiendo del caso. En la mayoría de ellas, la intervención total proporciona los mejores valores; aunque supone el mayor coste de inversión inicial, este se compensa con la reducción en consumos y costes de energía durante su vida útil de 30 años. También evidencian unos costes óptimos adecuados las intervenciones en fachadas y ventanas.

Considerando las zonas climáticas, los mejores costes óptimos se obtienen para las zonas A3 y A4, representativas de climas más suaves y con menor gastos en consumos. Respecto a los modelos, dichos costes resultan para el edificio entre medianeras, que es representativo de inmuebles de baja calidad constructiva y que ofrece un amplio margen de mejora en la reducción de consumos energéticos.

Además del coste óptimo, es necesario incluir en la contabilidad energética el parámetro de renta familiar y valorar las intervenciones en base a los ingresos salariales. En ese sentido, la variante de intervención total es la que supone más esfuerzo económico, siendo más adecuadas, por su menor coste inicial, las mejoras en fachadas y ventanas. Existen diferentes niveles de inversión, que abarcan desde los 440 €/familia hasta los 17.960 €/familia, entre las que se plantea un abanico de propuestas que suponen desde 1 a 26 veces el salario mínimo interprofesional.

En relación a las amortizaciones, no todas las intervenciones son viables y dependen del tipo de edificio y de la zona climática. Por ello, el estudio plantea el indicador "coste30" como un valor adecuado para fijar costes para amortizaciones a 30 años. En el caso del edificio entre medianeras, no es necesario reducir significativamente el coste de inversión, por el contrario, en el del edificio en bloque, algunas de las soluciones debieran de reducir más del 60% de sus costes. Esta medida se podría incentivar con planes de ayudas y subvenciones estatales, o bien, a través del abaratamiento de los productos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AENOR-CEN (2008). *UNE-EN 15459:2008 Eficiencia energética de los edificios. Procedimiento de evaluación económica de los sistemas energéticos de los edificios*. Recuperado de <https://www.une.org>.

Arumägi, E., Simson, R., Kuusk, K., Kalamees, T. y Kurnitski, J. (2017). *Analysis of cost-optimal minimum energy efficiency requirements for buildings*. Brussels: Tallinn University of Technology-European Union.

ATAYO (s/f). *Base de Precios PREOC*. Recuperado de <http://www.preoc.es/>

CA-EPBD. *Concerted Action Energy Performance of Buildings Directive (2016). Implementing the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)*. Brussels: Adene.

COATGU (s/f). *Base de Precios Centro*. Recuperado de <http://www.preciocentro.com/>

Código Técnico de la Edificación – CTE (2017). *Documento Básico Habitabilidad Energía 1. Limitación de la demanda energética: junio 2017*. España: Ministerio de Fomento.

- Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía (2019). *Caracterización Climática de Andalucía, Regiones Climáticas de Andalucía*. Recuperado de <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente>.
- Corrado, V., Ballarini, I. y Paduos, S. (2014). Assessment of Cost-optimal Energy Performance Requirements for the Italian Residential Building Stock. *Energy and Buildings*, (45), 443-452. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.048>.
- Danosa (s/f). *Tarifa general*. Recuperado de <https://portal.danosa.com/>
- De la Cruz, S., De la Cruz, L. y Simón, J. (2018). Estudio del óptimo económico en rehabilitación de viviendas sociales en función del binomio aislamiento-ahorro de energía. En: *CONTART (Zaragoza, 30 mayo -1 junio de 2018): VII Convención de la Edificación* (pp. 665-675). Zaragoza: Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia.
- ECOFYS y European Insulation Manufacturers Association-EURIMA (2012). *Renovation tracks for Europe up to 2050. Building renovation in Europe, what are the choices?* Berlín: ECOFYS.
- ECOFYS y European Insulation Manufacturers Association-EURIMA (2015). *Assessment of cost optimal calculations in the context of the EPBD (ENER/C3/2013-414), final report*. Berlín: ECOFYS.
- Episcope Project (2016). *Energy Performance Indicator Tracking Schemes for the Continuous Optimisation of Refurbishment Processes in European Housing Stocks*. Bruselles: Unión Europea. Recuperado de <http://episcope.eu/welcome/>
- European Commission (2007). *Passive-on Project. The passivehaus standard in European warm climates. Design guidelines for comfortable energy homes, Part 3. Comfort, climate and passive strategies*. Nottingham: Brian Ford.
- García, P. y Croxford, B. (2015). Policies to reduce residential energy consumption in Región Metropolitana of Chile, by socio-economic status and home. *Hábitat Sustentable*, 2(2), 2-18.
- Gobierno de España. *Factores de emisión de CO₂ y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España*. Madrid: Ministerio de Industria, Energía y Turismo - Ministerio de Fomento, 2016.
- Herramienta Unificada LIDER-CALENER [programa informático]-HULC (2017). Madrid: Ministerio de Vivienda de España, IDAE.
- Instituto Nacional Estadística – INE (2019). *Censos de Población y viviendas*. Recuperado de <http://www.ine.es>.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía - IDAE. *Informe de precios energéticos regulados nº25*. Madrid: IDAE, 2016.
- Junta de Andalucía (2017). *Base Costes Construcción Andalucía (BCCA)*. Recuperado de <https://www.juntadeandalucia.es/organismos/fomentoinfraestructurasordenaciondelterritorio/areas/vivienda-rehabilitacion/planes-instrumentos/paginas/bcca-sept-2017.html>
- Luxán, M. (2017). *Re-habilitación exprés para hogares vulnerables. Soluciones de bajo coste*. 1ª ed. Madrid: Fundación Gas Natural Fenosa.
- Mercado, M., Esteves, A., Barea, G. y Filippín, C. (2018). Efecto de la ventilación natural en el consumo energético de un edificio bioclimático. Análisis y estudio mediante Energy Plus. *Revista Hábitat Sustentable*, 8(1), 55-67. DOI: <http://dx.doi.org/10.22320/07190700.2018.08.01.05>.
- Ministerio de Fomento (2013). *Report on cost optimal calculations and comparison with the current and future energy performance requirements of buildings in Spain*. Madrid: Ministry of Development of Spain.
- Ministerio de Fomento (2018). *Construcción de edificios (licencias municipales de obra). Años 2013 - 2017*. Recuperado de https://www.fomento.gob.es/recursos_mfom/listado/recursos/ce2013_2017.pdf
- Molina, M. y Fernández-Ans, P. (2013). Evolución del comportamiento térmico en viviendas tradicionales de piedra y cubierta de paja. Puesta en valor de un modelo sostenible para el noroeste de España. *Revista de la Construcción*, 12, 58-67. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2013000200008>.
- Niemelä, T., Kosonen, R. y Jokisalo, J. (2016). Cost-optimal energy performance renovation measures of educational buildings in cold climate. *Applied Energy*, (183), 1005–1020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.044>.
- Pérez, A., Calama, J.M. y Flores, V. (2016). Comparativa de resultados de rehabilitación energética para viviendas en función del grado de mejora. *Informes de la Construcción*, 68(541), e134. DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.15.048>.
- Re-Programa (2015). *(Re)habitación + (Re)generación + (Re) programación*. Sevilla: Consejería de Fomento y Vivienda, Junta de Andalucía.
- Suárez, R. y Fragoso, J. (2016). Estrategias pasivas de optimización energética de la vivienda social en clima mediterráneo. *Informes de la Construcción*, 68(541), e136. DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.15.050>.
- TABULA Project (2012). *Typology Approach for Building Stock Energy Assessment, 2009-2012. Executive Summary*. Bruselles: Unión Europea.
- Unión Europea (2010). *Directiva 2010/31/EU del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición)*. Diario Oficial de la Unión Europea, n.º L 153.
- Unión Europea (2012a). *Reglamento Delegado RD 244/2012 de la Comisión de 16 de enero de 2012 que complementa la Directiva 2010/31/UE*. Diario Oficial de la Unión Europea, n.º L 81.
- Unión Europea (2012b). *Directrices que acompañan al Reglamento Delegado RD 244/2012*. Diario Oficial de la Unión Europea, 2012/C 115/01.

Unión Europea (2019). *Driving energy efficiency in the European building stock: New recommendations on the modernisation of buildings*. Recuperado de https://ec.europa.eu/info/news/driving-energy-efficiency-european-building-stock-new-recommendations-modernisation-buildings-2019-jun-21_en.

URSA (s/f). *Lista de precios recomendados*. Recuperado de <https://www.ursa.es/>

Zangheri, P., Armani, R., Pietrobon, M. y Pagliano, L. (2018). Identification of cost-optimal and NZEB refurbishment levels for representative climates and building typologies across Europe. *Energy Efficiency*, 11, 337-369. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-017-9566-8>.





EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL MEDIANTE LA INTRODUCCIÓN DE INDICADORES A UN MODELO BIM DE VIVIENDA SOCIAL

Recibido 07/08/2019
Aceptado 13/11/2019

ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESMENT BY MEANS OF INDICATORS EMBEDDED IN A BIM MODEL OF SOCIAL HOUSING

MARÍA DEL PILAR MERCADER MOYANO
Doctora en Arquitectura
Docente e Investigadora Departamento de Construcciones
Universidad de Sevilla, Sevilla, España
<http://orcid.org/0000-0003-2180-4887>
pmm@us.es

PATRICIA EDITH CAMPOREALE
Doctora en Arquitectura
Docente de Posgrado
Universidad Nacional de la Plata, Buenos Aires, Argentina
<https://orcid.org/0000-0001-5808-3230>
pcamporeale@fau.unlp.edu.ar

ELÍAS CÓZAR-CÓZAR
Doctor en Ingeniería de Edificación
Docente de Posgrado
Universidad de Sevilla, Sevilla, España
<https://orcid.org/0000-0002-4053-3421>
cozarelias@gmail.com

RESUMEN

Building Information Modeling (BIM) constituye una herramienta versátil para analizar el ciclo de vida de los edificios y el uso eficiente de los recursos, reducción, reuso y reciclado de residuos de construcción y demolición hacia un parque edilicio sin carbono para 2020 en Europa. Este trabajo propone una nueva metodología para incorporar indicadores: energía incorporada, emisiones de CO₂, residuos de construcción y demolición además de sólidos urbanos, en modelos BIM que evalúan el impacto ambiental siguiendo la estructura de la Base de Costes de la Construcción de Andalucía (BCCA). Se eligió un bloque de vivienda social en Sevilla, como caso de estudio, para focalizarse en el análisis de su estructura de hormigón armado debido a su alto impacto. Los resultados agrupados por tarea e indicador muestran el rol preponderante del hormigón. Por el contrario, el acero demuestra ser menos energo-consumidor, generando menos emisiones y permitiendo reducir los residuos mediante reciclaje. Según la discriminación por tareas, se destaca el bajo impacto de las fundaciones frente a la superestructura resistente. Asimismo, cada metro cuadrado de construcción típica genera 76.11 de residuo de construcción y demolición, siendo 76,11 kg mixto proveniente del hormigón y 0,34 kg, del acero.

Palabras clave

Energía incorporada, emisiones de CO₂, residuos de demolición y construcción, diseño por ordenador

ABSTRACT

Building Information Modeling (BIM) has become a versatile tool to analyze the building life cycle and to achieve the efficient use of natural resources and the reduction, reuse and recycling of construction and demolition waste towards the goal of a decarbonized building stock for 2020 in Europe. This research proposes a new methodology to introduce embodied energy (EE), carbon emissions (CE), construction and demolition waste (CDW), and urban solid waste (USW) indicators into BIM models that assess environmental impact following the structure of the Andalusian Construction Cost Database (ACCD). A block of social housing was chosen as a case study in order to focus on the analysis of its reinforced concrete structure due to its high impact. The results, grouped by task and indicator, show the dominant role that concrete plays in environmental impact. In contrast, steel proved to consume less energy and generate fewer CE as well. Moreover, steel may be recycled, while reducing the quantity of waste. When analyzed by task, the foundations cause much less impact than the tough superstructure. Likewise, each square meter of the typical housing block generates 76.11 kg of CDW, with 76.77 kg of mixed concrete waste and 0.34 kg of steel waste.

Keywords

embodied energy, CO₂ emissions, construction and demolition waste, computer-aided design

INTRODUCCIÓN

El sector de Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AEC, por su sigla en inglés) juega un papel clave en el impacto ambiental que provoca la actividad humana. Los edificios son responsables del 40% del consumo de energía, el 36% de las emisiones de CO₂ y el 40% de CDW (por su sigla en inglés) en la Unión Europea (UE) ("Edificios - Energía - Comisión Europea" 2017). Las directrices de la UE sobre la reducción del consumo de energía (Diario Oficial de la Unión Europea 2010) y la eficiencia energética en los edificios (Diario Oficial de la Unión Europea 2012) determinan que para 2020 cada nuevo edificio estará casi en cero energía (nZEB). Entre los objetivos principales del programa Horizonte 2020 de la UE, el logro de una sociedad y una economía más eficientes en relación con el uso de los recursos naturales y las materias primas y un uso sostenible de la energía aparece como un objetivo principal para luchar contra el cambio climático ("Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático" 2018).

El sector AEC consume más del 20% del combustible (Tiwari 2001) y el 40% de los recursos materiales (López-Mesa et al. 2009) en todo el mundo. Este sector enfrenta el desafío de reducir el consumo de energía y CE (por su sigla en inglés), pero el aumento del stock de edificios hace que sea difícil de alcanzar a mediano plazo (Sandberg y Brattebø, 2012).

Años antes, la energía operativa (OE, por su sigla en inglés) representaba el factor principal en el consumo de energía del edificio, mientras que la energía incorporada (EE, por su sigla en inglés) representaba el 10-20% de la energía en el ciclo de vida del edificio. Sin embargo, a medida que la eficiencia energética disminuye el consumo de OE, EE se vuelve más importante para la evaluación del impacto ambiental. González y Navarro consideran que las emisiones de CO₂ pueden reducirse al 30% de su valor original seleccionando materiales de bajo impacto (González y García Navarro 2006). Rodríguez Serrano et al. (Rodríguez Serrano y Porras Álvarez, 2016) concluyen que el mayor impacto de las emisiones de la urbanización y los edificios tienen lugar durante la construcción y, por lo tanto, los ahorros posteriores debido a las reducciones de OE son muy modestos en comparación. Como Abanda et al. Sostienen (Abanda, Oti y Tah 2017) es crucial diseñar sistemas automatizados para calcular las emisiones de EE y CO₂ en los edificios de acuerdo con las bases de datos estándar de medición y fijación de precios consolidados.

Mientras que la industria de la construcción genera el 35% del total de residuos industriales en todo el mundo, la industria manufacturera de la UE consume el 40% de los recursos naturales (Mercader Moyano, M. 2010), pero solo se recupera el 25% del CDW generado (AIE 2013). El Real Decreto Español 105/2008 (Gobierno español - Ministerio de la Presidencia, 2008) ya ha regulado la producción y gestión de CDW, teniendo en cuenta el Catálogo Europeo de Residuos (Diario Oficial de las Comunidades Europeas y

Decisión 2001/118/CE de residuos 2001). El II Plan Español de CDW para 2008/2015 mostró que menos del 18% de la actividad de construcción e infraestructura CDW es reciclada (Ministerio de Medio Ambiente y Asuntos Rurales y Marinos 2008). Además, Solís considera que solo el 15% de CDW se recicla en España, lejos de los logros de otros miembros europeos (Solís Guzmán, J., 2010).

Los métodos para articular los datos de todo el proceso de construcción aún se están desarrollando, aunque la consideración de los problemas ambientales durante la etapa de diseño sigue siendo uno de los mayores desafíos para los diseñadores. Además, el Comité Europeo de Normalización recomienda integrar la producción del edificio desde una perspectiva ambiental para cumplir con las Directrices Europeas sobre Sostenibilidad en las Obras de Construcción (Comité Europeo de Normalización CEN 2012). La Directriz de la Unión Europea 2014/24/UE sobre contratación pública establece que "para los contratos de obras públicas y concursos de diseño, los Estados miembros pueden exigir el uso de herramientas electrónicas específicas, como herramientas de modelado electrónico de información de construcción o similares". España ("España lanza la estrategia BIM con Mandato Penciled-in 2018 I BIM +" 2018), el Reino Unido (AEC (Reino Unido)), Alemania (ZukunftBAU 2013) y Francia (B. Delcambre) ya han comenzado a transponer estas Directrices a sus regulaciones de gobiernos locales. Pero aún quedan barreras importantes cuando se hace referencia a la industria AEC: accesibilidad a datos ambientales, conocimiento experto demasiado alto y difícil identificación de componentes o materiales alternativos apropiados (Bey, Hauschild y McAloone 2013).

El Building Information Modeling (BIM) se usa cada vez más en el sector de AEC para ofrecer planificación previa integrada, diseño y gestión de proyectos principalmente para edificios nuevos (Mousa, Luo y McCabe 2016). Una revisión de herramientas basadas en BIM para la evaluación del impacto ambiental mostró que la mayoría de ellas necesitan combinar el software BIM con otras aplicaciones para obtener la cuantificación de los indicadores ambientales. Una revisión sobre la integración BIM-sostenibilidad realizada durante todo el ciclo de vida del edificio señaló que la sostenibilidad ambiental, social y económica considera la etapa de diseño como el núcleo del asunto (Chong, Lee y Wang 2017). Otros autores revisaron la investigación sobre el análisis de integración BIM/LCA y sus posibilidades de simplificación en términos de datos de entrada-salida y resultados de LCA (Soust-Verdaguer, Llatas y García-Martínez, 2017) y señalaron que la mejor solución sería permanecer dentro del entorno BIM para facilitar la interacción entre el diseño y el desempeño ambiental (Antón y Díaz 2014). La mayoría de las herramientas revisadas consisten en aplicaciones para conectar el modelo BIM con datos ambientales como Tally ("Tally" 2018) y Revit (Najjar et al. 2017). Marzouk et al. propuso una combinación de varias herramientas de software: Autodesk Revit ("Familia Revit

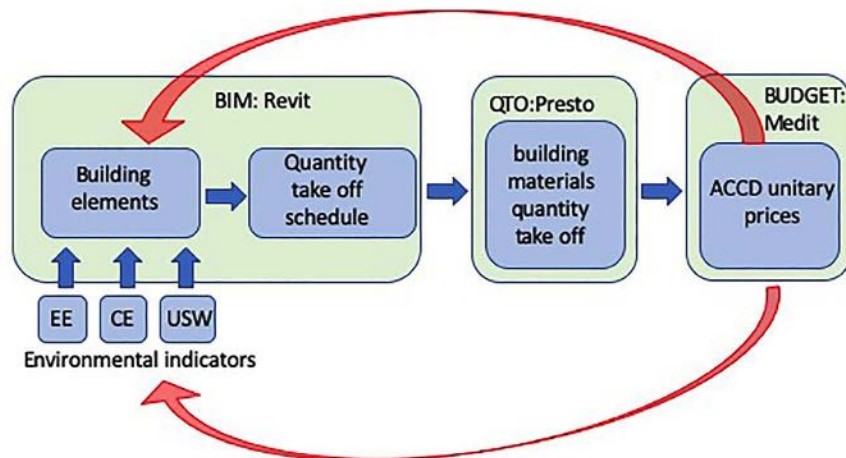


Figura 1. Indicadores ambientales integrados en familias y tipos BIM Fuente: los autores

Software BIM | Autodesk”, n.d.), link Revit DB (“Acerca de Autodesk Revit DB Link | Productos Revit | Autodesk Knowledge Network”, n.d.), Microsoft Access (“Software y aplicaciones de bases de datos | Microsoft Access,” n.d.) y ATHENA Impact Estimator (“IE for Buildings | Athena Sustainable Materials Institute,” n.d.) al medir las emisiones directas e indirectas de carbono (CE, por su sigla en inglés) en proyectos de construcción (Marzouk, Abdelkader y Al-Gahtani 2017). Chen y Pan (Chen y Pan 2015) presentaron una toma de decisiones de criterios múltiples en medidas de construcción bajas en carbono, combinando Revit, eQuest (“EQUEST” 2018) y Promethee (Gul et al. 2018). Ajayi et al. (Ajayi et al. 2015) exploran una combinación de Revit Architecture, el complemento Green Building Studio (GBS) y ATHENA para el potencial de calentamiento global (GWP, por su sigla en inglés) y la evaluación del impacto en la salud. Azhar et al. (Azhar et al. 2011) combinaron Revit con IES Virtual Environment (“Presentación del software IESVE | Soluciones ambientales integradas” 2018) para calcular las emisiones de carbono y la energía incorporada para convertirlas en créditos LEED (“LEED | USGBC” 2018). Basbagill et al. (Basbagill et al. 2013) desarrollaron un modelo BIM utilizando DProfiler (Chelsea 2018) vinculado con eQuest (“eQUEST”, n.d.) dentro de un entorno BIM mientras los resultados se cargan manualmente en SimaPro y Athena EcoCalculator para obtener CE. Ilhan et al. (Ilhan y Yaman 2016) desarrollaron una herramienta de evaluación de edificios ecológicos, utilizando Graphisoft ArchiCAD® vinculado a la base de datos de materiales BREEAM. Inyim et al. (Inyim, Rivera y Zhu 2015) presentaron Simulación de Impacto Ambiental de la Construcción (SimuleICon), que es una extensión BIM diseñada para ayudar en la etapa de diseño del proceso de toma de decisiones de un proyecto de construcción.

Gan et al. (Gan et al. 2018) desarrollaron un enfoque holístico para evaluar el carbono incorporado y operativo en edificios de gran altura, utilizando Revit y un complemento paramétrico, Dynamo. En una investigación posterior, el mismo equipo evaluó la reducción de CE al reemplazar el

acero y el cemento por materiales reciclados (Gan et al. 2017). Yang et al. (Yang et al. 2018) desplegaron un flujo de trabajo unidireccional para calcular la operación y la energía de los materiales y CO₂ec.

Como Wong et al. señaló las herramientas BIM deben incluir el concepto de tres R (reducir, reutilizar y reciclar) en el análisis de impacto ambiental para proyectos nuevos y de modernización (Wong y Zhou 2015) para lograr objetivos de sostenibilidad. Además, CDW y USW deben tenerse en cuenta en una visión general de sostenibilidad porque afectan el equilibrio EE/CE durante el proceso de construcción. Cheng y Ma (Cheng y Ma 2013) desarrollaron un administrador de aplicaciones adicionales para CDW. Yehesis et al. (Yeheyis et al. 2013) propusieron un marco conceptual de gestión de CDW para maximizar las 3R y minimizar la eliminación de residuos de construcción por LCA de proyectos de construcción BIM. Sáez et al. (Villoria Sáez et al. 2018) señalaron que la mayor cantidad de CDW corresponde a la envoltura vertical en la modernización del edificio.

También se revisó la integración de los modelos BIM con métodos de medición estándar para obtener la cuantificación de EE y CE. Abanda et al. (Abanda, Oti y Tah 2017) desarrollaron una aplicación específica para vincular los modelos BIM con las Nuevas Reglas de Medición (NMR, por su sigla en inglés), el estándar del Reino Unido para la contratación pública (Surveyors 2018), utilizando Bath Inventory of Carbon and Energy (Bath ICE) (Jones, C. y Allen, Stephen 2017).

Lützkendorf et al. expresó que la interoperabilidad con otro software para lograr la cantidad de material y la estimación de costos acelerarán el proceso de diseño, permitirán la comparación de soluciones alternativas y producirán mejores resultados (Lützkendorf et al. 2015).

Sin embargo, el software BIM aún debe cumplir con los requisitos de los diseñadores de edificios (Lamé, Leroy y Yannou 2017). Una de las principales barreras que enfrentan

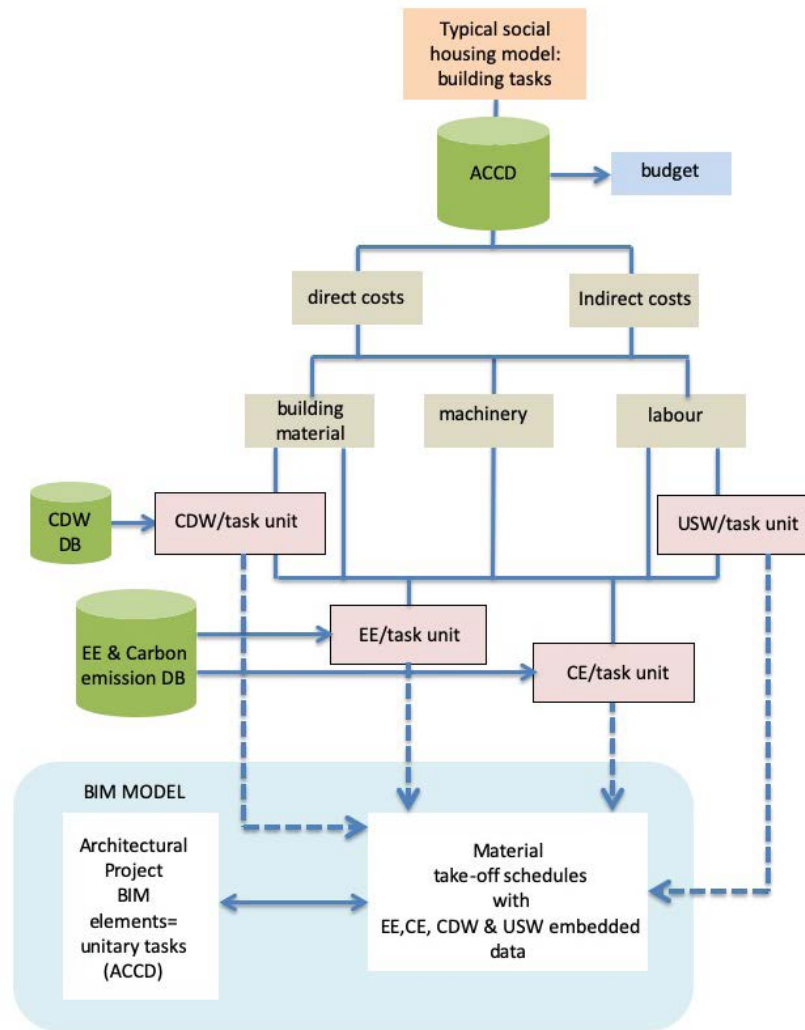


Figura 2: Flujo de trabajo metodológico sintetizado. Fuente: los autores

los diseñadores al entregar proyectos de construcción ecoeficientes es la experiencia específica para lidiar con diferentes software, bases de datos y metodologías. A pesar de esto, existe una tendencia creciente a integrar sistemas de evaluación, bases de datos, consultores y proveedores (Fiès, Lützkendorf y Balouktsi 2013). Mientras que algunos diseñadores están considerando la aplicación de herramientas complejas de datos y evaluación, otros sienten que todavía están sobrecargados.

El objetivo de este estudio es llenar el vacío de la evaluación del impacto ambiental en el diseño conceptual a través de indicadores BIM integrados. Esta estrategia facilita la elección del diseñador sobre las mejores alternativas para reducir el impacto ambiental en un marco abierto. El trabajo propone un enfoque ascendente para la cuantificación de CDW, USW, EE y CE de acuerdo con la estructura de desglose del trabajo (WBS, por su sigla en inglés) de la ACCD (por su sigla en inglés) (Fig.1). Presto® y Medit® utilizan los elementos de los edificios BIM para extraer la lista de cantidades y costos ("Acae Presto" 2018) ("Medit Mediciones en BIM con REVIT" 2013).

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología es apropiada para el diseño conceptual aunque la definición del material no esté completamente definida porque la ACCD proporciona un catálogo completo de sistemas y materiales de construcción que están disponibles como elementos de Revit. El flujo de trabajo se divide en tres pasos para cuantificar CDW, USW, EE y CE de un edificio nuevo o modernizado (Fig. 2):

Descomposición de cada capítulo de la base de datos de costos de construcción en sus niveles inferiores: materiales de construcción, mano de obra y maquinaria, que incluye las tareas auxiliares y los costos indirectos. Adición de parámetros ambientales: CDW, EE, CE y USW a la WBS de ACCD para obtener los indicadores.

Incorporación de indicadores ambientales en los programas de despegue de materiales BIM para cuantificar EE, CE, CDW y USW.

DESCOMPOSICIÓN DE TAREAS DE CONSTRUCCIÓN

La normativa española actual se compromete a entregar nuevos proyectos de construcción en formato de archivo BIM, utilizando CCD para licitaciones públicas. Andalucía cuenta con la ACCD, que es una base de datos en línea descargable gratuita. Proporciona una descripción detallada y una medición de todas las tareas realizadas a lo largo del proceso de construcción, mientras que los archivos pueden combinarse con QTO y formatos de software de cálculo de costos (Asociación FIE-BDC).

El ACCD divide las tareas de construcción en capítulos que cuantifican el material de construcción, la mano de obra y la maquinaria llamados COSTOS DIRECTOS (DC, por su sigla en inglés) al tiempo que agrega un porcentaje para las tareas generales llamadas COSTOS INDIRECTOS (IC, por su sigla en inglés) (Barón, J. et al.2017) que afectan el conjunto del proceso de construcción como iluminación general, electricidad y combustible para maquinaria y trabajo de personal técnico y auxiliar. Las tareas auxiliares se desglosan de las tareas principales. CDW se desarrolla en capítulos específicos: uno para cada tipo de desecho (mezclado, madera, papel y cartón, acero, suelo inerte, entre otros). Cada capítulo comprende los elementos que componen una tarea medida en unidades específicas. Para la cuantificación de CDW, aplicamos la metodología desarrollada por Ramírez de Arellano (Ramírez de Arellano Agudo 2002), incluida en el ACCD en 2017 y basada en el Decreto Nacional para regular la producción y gestión de CDW (Gobierno español - Ministerio de la Presidencia, 2008) y en la Lista Europea de Residuos 2000 (Diario Oficial de las Comunidades Europeas y Decisión 2001/118/CE de residuos de la Comisión 2001). La metodología se describe completamente en (Mercader-Moyano y Ramírez-de-Arellano-Agudo 2013) y (Marrero y Ramírez de Arellano, 2010).

ADICIÓN DE LOS PARAMETROS AMBIENTALES: EE, CE, USW Y CDW A ACCD WBS

El procedimiento utiliza el presupuesto de ACCD como marco para integrar los indicadores ambientales (Freire Guerrero, A. y Marrero Meléndez, M. 2015). Los datos se dividen en dos ramas principales: costos directos (materiales de construcción, maquinaria, mano de obra) y costos indirectos (electricidad general, agua y desechos).

Los valores EE y CE se extrajeron de la base de datos Ecoinvent (Centro Suizo para Ciclo de Vida e Inventarios 2017), BEDEC (Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña 2017). Los valores de EE y USW de alimentos para el personal se extrajeron de la investigación (Solís Guzmán, J., 2010) y (Freire Guerrero, Antonio 2017). Las emisiones de CO₂ de la electricidad se obtuvieron de la matriz energética andaluza cuya mezcla de electricidad produjo 419,9 tCO₂/GWh, equivalente a 0.117 kgCO₂/MJ en 2016 (Agencia Andaluza de la Energía 2017).

Adición de parámetros ambientales a los costos directos

A continuación se muestran las ecuaciones de costos directos (DC) de cada precio unitario. La Ecuación 1 muestra la EE de cada artículo que integra un precio unitario.

$$(1) \quad EE_{DC} = \sum_{i \in I} EE_i$$

I={material de construcción, maquinaria, alimentos para el personal, USW, CDW por tipo}
 EE_i = tarea básica EE en MJ

Como los materiales de construcción se pueden medir en m³, kg, ton o m², entre otros, la EE debe convertirse a la unidad objetivo correspondiente (MJ/TU) (Tabla 1).

Material de construcción	unidad	EE MJ/TU	CE kgCO ₂ /TU
ACETO	kg	40.00	2.80
HA-25/B/20/Ila HORMIGÓN	m3	6209.97	159.46
MADERA DE PINO	m3	3.00	714.00
LADRILLO HUECO CERÁMICO	millas	5290	487.60
ARENA	m3	247.51	48.00

Tabla 1. EE y CE según unidades de precio unitario ACCD
 Fuente: los autores

La maquinaria se calcula en horas dependiendo de la EE/h de cada tipo de máquina (Ec. 2).

$$(2) \quad EE_m = \sum_{m \in M} Q_m \times EE_m/h$$

M = {camión basculante, cargador frontal, retroexcavadora, vibrador, grúa horquilla}

La cuantificación de USW se calcula con un valor fijo por hora laboral (0.077 kg/h)

La mano de obra se calcula en horas para calcular EE_{worker}
 food EE_{USW} (Eq. 3-4)

$$(3) \quad EE_{staff\ food} = \sum_{i=1}^n Q_i \times EE_{worker\ food}/h$$

$$(4) \quad EE_{USW} = \sum_{i=1}^n Q_i \times EE_{USW}/h$$

Q_i = duración de la ejecución de una tarea básica en h para el trabajador i

n = trabajadores

EE_{worker food}/h = EE por hora de trabajo

EE_{USW}/h = USW por hora de trabajo

CDW se calcula en diferentes unidades de acuerdo con la eliminación de residuos (Ec. 5).

$$(5) \quad W_{o \in O} = C_{Ro} \times C_{Co} \times C_{To}$$

W_o es el coeficiente resultante, uno por cada tipo de desecho $O = \{\text{cartón/papel, madera, suelo inerte, aluminio, cobre, bronce, hierro, acero, agregado árido/piedra, plástico/sintético, vidrio y residuos mezclados}\}$

La cantidad efectiva de residuos se muestra en Ec. 6.

$$(6) \quad EE_{CDW} = \sum_{b \in B} Q_b \times W_o \times RF_o \times EE_o$$

Q_b es la cantidad de material de construcción
 $B = \{\text{materiales de construcción}\}$
 $RF_o =$ factor de reciclaje que reduce la EE
 $EE_o =$ EE unitaria por tipo de desecho
 La emisión de carbono de DC (CE_{DC}) se muestra en la Ec. 7.

$$(7) \quad CE_{DC} = \sum_{i \in I} CE_i$$

$I = \{\text{material de construcción, maquinaria, alimentos para el personal, USW, CDW por tipo}\}$
 CE_i es la tarea básica CE en $kgCO_2$

CE/alimento kg se fija como $0.24 \text{ kgCO}_2/\text{alimento kg}$ (Ec. 8 y Ec. 9).

$$(8) \quad CE_{staff \text{ food}} = \sum_{i=1}^n Q_i \times CE_{worker \text{ food}}/h$$

$$(9) \quad CE_{USW} = \sum_{i=1}^n Q_i \times CE_{USW}/h$$

$Q_i =$ ejecución de tareas básicas en h para trabajador i
 $n =$ trabajadores $CE_{worker \text{ food}}/h =$ CE generado por hora laboral
 $CE_{USW}/h =$ CE USW generado por hora laboral
 En el caso de CDW, agregamos un factor de reciclaje RF (por su sigla en inglés), que depende del tipo de desecho y reduce la CE (Ec. 10):

$$(10) \quad CE_{CDW} = \sum_{b \in B} Q_b \times W_o \times RF_o \times CE_o$$

$RF_o =$ factor de reciclaje $CE_o =$ emisiones de carbono unitarias por tipo de residuo

Adición de parámetros ambientales a los costos indirectos

Los costos indirectos (IC) son un porcentaje fijo de los costos directos: el 10,62% de DC se adopta para la vivienda social típica en Andalucía.

El consumo de energía se divide en tres categorías: personal general, electricidad y combustible, de acuerdo con el análisis típico de IC de vivienda social. (Ec. 11).

$$(11) \quad EE_{IC} = \sum_{s \in S} EE_{ICs} \times IC_s + \sum EE_{ICsUSW}/TU$$

$EE_{ICs} =$ IC EE in MJ
 $IC_s =$ porcentaje correspondiente $S = \{\text{personal, electricidad, combustible}\}$
 $EE_{ICUSW} =$ IC EE del consumo de alimentos del personal USW en MJ
 El EE de CDW_{IC} se calcula de la misma manera que una tarea unitaria de IC.

ACCD PRECIO UNITARIO + INDICADORES AMBIENTALES

El nueva WBS de PRECIO UNITARIO ACCD + INDICADORES AMBIENTALES (EUP) comprende la adición de EE, CE, USW y CDW (Fig. 3)

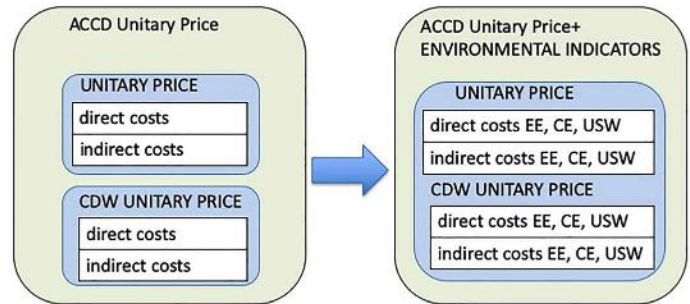


Fig. 3. WBS de precios unitarios de ACCD y precios unitarios ambientales (EUP), que muestra la adición de los indicadores ambientales y la fusión del precio unitario principal con los precios unitarios CDW correspondientes Fuente: los autores

La relación entre EE, CE, CDW y USW y EUP calcula los indicadores EE, CE, CDW y USW (Ec. 12-15).

$$(12) \quad EE_{EUP \text{ indicator}} (MJ/EUPunit) = \frac{EE_{EUP} + EE_{CDW \text{ EUP}}}{EUP_u}$$

$$(13) \quad CE_{EUP \text{ indicator}} (kgCO_2/EUPunit) = \frac{CE_{EUP} + CE_{CDW \text{ EUP}}}{EUP_u}$$

$$(14) \quad CDW_{EUP \text{ indicator}} (CDWunit/EUPunit) = \frac{CDW_{CDW \text{ EUP}}}{EUP_u}$$

$$(15) \quad USW_{EUP \text{ indicator}} = \frac{USW_{EUP} + USW_{CDW \text{ EUP}}}{EUP_u}$$

EUP = unidad de precio unitario ambiental
 $CDW_{EUP_u} =$ CDW unidad de precio unitario ambiental

COEFICIENTES AMBIENTALES QUE SE INCORPORAN EN EL MODELO Y CUANTIFICACIÓN BIM

Luego, los indicadores ambientales se integran como nuevos parámetros en cada familia BIM. Los elementos BIM se miden en las mismas unidades que los EUP. Autodesk

Revit¹ genera los horarios de descuento de materiales para cada tipo de elemento, por lo que podemos agregar parámetros ambientales: valores EE, CE, CDW y USW por unidad. Finalmente, el programa calcula las cantidades totales para cada parámetro.

ESTUDIO DE CASO

UN BLOQUE DE VIVIENDA SOCIAL: LA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN REFORZADA

Esta investigación desarrolla la cuantificación de los indicadores ambientales aplicados a la estructura de hormigón armado de un bloque de viviendas sociales típico en Sevilla (Fig. 4) en el diseño conceptual. Esta tipología representa una de las más difundidas en Andalucía y se ha descrito ampliamente (Mercader Moyano, M. 2010; González-Vallejo, Marrero y Solís-Guzmán 2015). Este tipo de edificios generalmente tiene una estructura de hormigón reforzado de 2/4 pisos, carpintería de aluminio y techo de losa plana (Marrero Meléndez, M. et al. 2015). La estructura de hormigón armado representa un gran impacto ambiental (De Wolf, Pomponi y Moncaster 2017).



Fig. 4: Bloque de viviendas sociales en Sevilla Fuente: los autores

INDICADORES AMBIENTALES

Como ejemplo, la Tabla 2 muestra la adición de indicadores ambientales a cada precio unitario para la capa de hormigón de limpieza.

MODELO BIM

El plan de piso es un cuadrado lateral de 23m y el edificio tiene dos pisos que suman 1.058 m². Vinculamos una tarea unitaria ACCD a cada elemento de construcción. Por lo tanto, ciertos elementos de construcción, que no tienen ningún elemento BIM equivalente como encofrados o excavaciones, se dibujan como elementos nuevos: superficies para medir áreas de encofrado para elementos estructurales (pilares, escaleras, losas y vigas) y cajas para excavaciones (Fig. 5).

INCORPORACIÓN DE INDICADORES AMBIENTALES

La Tabla 3 sintetiza los coeficientes ambientales por tarea unitaria de la estructura del edificio integrados en el modelo BIM como nuevos parámetros.

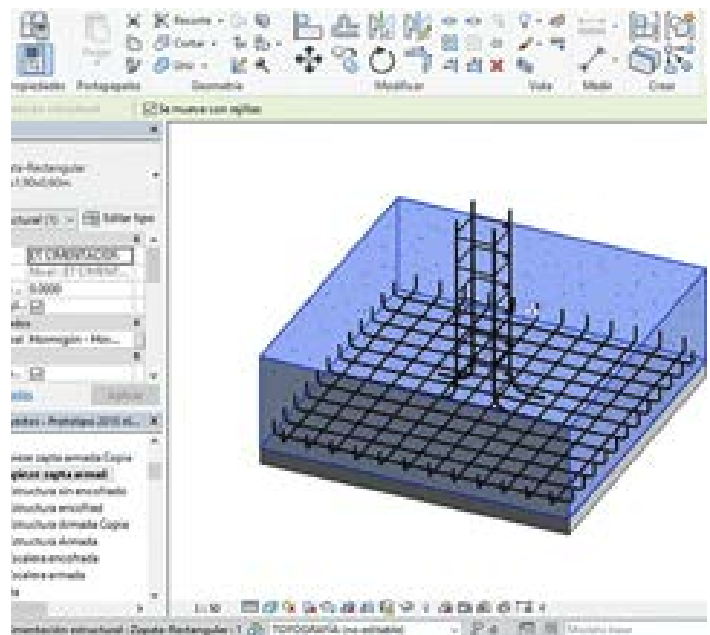


Fig. 5. Captura de pantalla de Revit que muestra los elementos BIM en correspondencia con el precio unitario ACCD de losa de cimentación y tapa de pilote Fuente: los autores

1 <https://knowledge.autodesk.com/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/Revit-DocumentsPresent/files/GUID-F8270A42-CA71-46C7-B145-85EC2CB8E4A1-htm.html>

COD.	UN	DESCRIP.	Q/u	precio unitario	WO/TU	tipo	CDW Q	unidad	EE	CE
			TU	€/TU					MJ	kgCO2
03WSS80000	m2	CAPA DE HORM. DE LIMP. med. ancho: 10 cm	1	8.62						
CH04020	m3	Pre-elaborado HM-20/P/20/I hormigón	0.11						261.80	51.20
TP00100	h	Trab. especializado	0.08						4.07	2.44E-01
	kg	USW			0.077	USW	6.16E-03	kg	5.05E-02	1.50E-03
TO02200	h	Trab. 2a categ.	0.05						2,55	0,152
		USW			0.077	USW	3.85E-03	kg	3.16E-02	9.35E-04
Cost. Ind.		10.62% DC		0.92						
	h	personal	0.01						0.50	0.03
	kg	USW			0.077	USW	7.70E-04	kg	6.30E-03	1.87E-04
		electricidad	12.85% IC						0.44	0.59
		combustible	72.76% IC						2.52	0.17
17RRR00420	m3	EXTRAC. MEZCLA DE DESECHO max. dist. 15 km		12.5						
	m3	Des. hormigón	0.01	0.21	0.11	mezcla desecho	0.01	m3	-17.85	-0,20
ME00300	h	Carg. frontal	2.00E-04	0.48					0.15	0.01
MK00100	h	Camión basculante	3.00E-03	7.68					1.26	0.07
Cost.Ind.		10.62% CDW DC		0.02						
	h	personal	3.20E-03		-				0.01	
	kg	USW			0.077	USW	2.46E-04	kg	2.00E-03	5.97E-05
		electricidad		12.85% IC					0.01	0.01
		combustible		72.76% IC					0.05	3.46E-03
INDICADORES AMBIENTALES						USW kg/m2		1.80E-02		
						MEZCLA DESECHO m3/m2		1.00E-02		
						EE MJ/m2		255.60		
						CE kgCO2/m2		52.28		

Tabla 2. Capa de hormigón de limpieza. Med. ancho: 10 cm Fuente: modificado de ACCD por los autores

TASK GROUP	UNITARY TASK	unit	CDW coefficients						EE MJ/u	CE kgCO2/u
			USW kg/u	wood ton/u	inert soil ton/u	paper & cardboard kg/u	steel ton/u	mixed m3/u		
DEMOLITION & PREVIOUS WORKS	MECHANICAL LAND CLEARING	m2	4.64E-04	8.00E-02					19.92	1.26
LAND CODITIONING	BOX EXCAVATION, MEDIUM CONSISTENCY SOIL	m3	3.36E-03		1.25				211.60	13.03
	FOUNDATION SLAB MECHANICAL EXCAVATION, MED. CONSIT., max. depth: 4m	m3	1.31E-02		1.25				267.97	17.57
	TRENCH MECHANICAL EXCAVATION, max. depth: 1.5m,width: 40 cm	m3	1.34E-02		1.25				267,26	17.42
FOUNDATIONS	FOUNDATION CORRUGATED STEEL RODS B500S	kg	1.70E-03				9.79E-06		47.10	3.38
	LOST BRICK FORMWORK OF RING BEAMS, FOUNDATION SLABS & PILE CAPS	m2	1.88E-02	2.60E-03		20.60	2.60E-03	9.10E-03	708.15	36.83
	FOUNDATION & RING BEAM CONCRETE HA-25/B/20/IIa	m3	4.26E-02					9.10E-03	2326.53	531.32
	FOUNDATION SLAB & PILE CAP CONCRETE HA-25/B/20/IIa	m3	4.00E-02					0.11	2516.52	304.78
	CLEANING CONCRETE LAYER med. width: 10 cm	m3	1,80E-02					0,01	255,60	52.28
STRUCTURE	CORRUGATED STEEL RODS B500S	kg	4.26E-02				1.08E-05		47.10	3.38
	WOOD FORMWORK REMOVAL FROM CONCRETE ELEMENTS	m2	1.54E-02						10.69	0.92

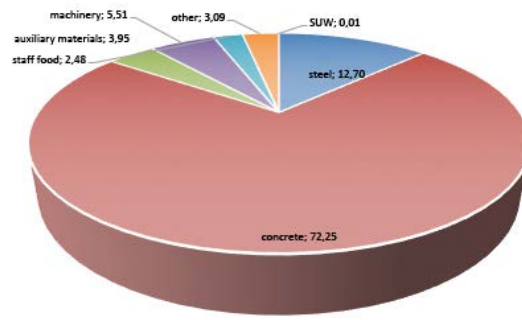
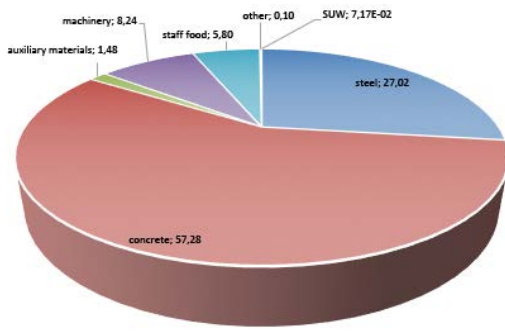


Fig. 7. Estructura de hormigón armado porcentajes EE Fuente: los autores
 Fig. 8. Estructura de hormigón armado Porcentajes CE Fuente: los autores

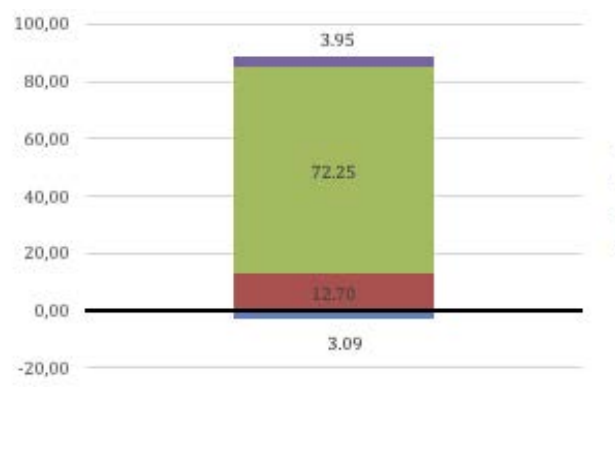
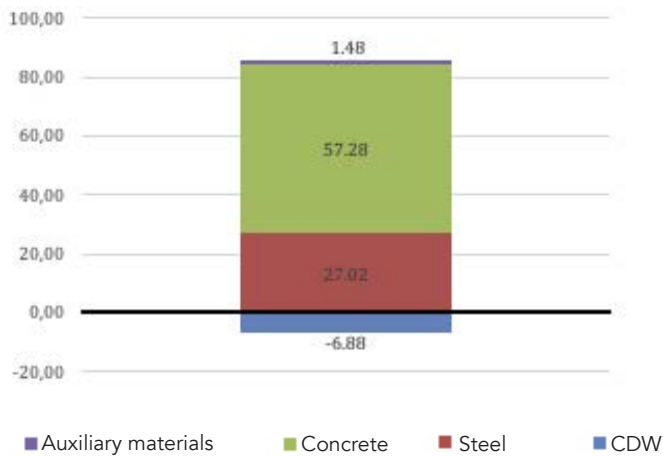


Fig. 9. Porcentajes de materiales de construcción EE y CDW Fuente: los autores
 Fig. 10. Porcentajes de materiales de construcción CE y CDW Fuente: los autores

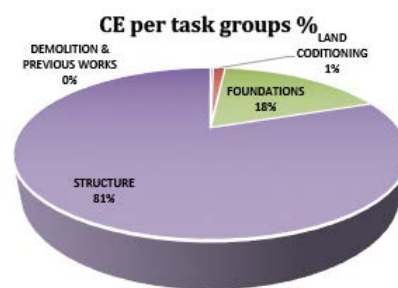
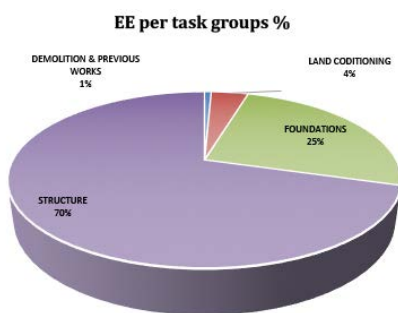


Fig. 11. Porcentajes de EE correspondientes a la estructura de soporte de carga de hormigón armado divididos por grupo de tareas Fuente: los autores
 Fig. 12: Porcentajes CE de estructura de hormigón armado divididos por grupo de trabajo Fuente: los autores

Después de dibujar todo el modelo, Revit extrae los Programas de descuento de materiales, enumerando los subcomponentes o materiales de cualquier familia de Revit. Los gráficos cuantifican USW, CDW, EE y CE, para cada familia de Revit en tiempo real, reflejando cualquier cambio realizado en el modelo. La figura 6 muestra el calendario de despegue de losas de cimentación y tapas de pilotes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los materiales de construcción, USW, CDW, EE y CE se cuantifican dentro de Revit. Los resultados se analizan después de extraer los horarios de descuento de material de cada elemento BIM, de acuerdo con EUP (Fig. 7-8). En las figuras 9 y 10, la reducción de EE-CE debido al reciclaje de CDW se calculó considerando que solo el 15% de los residuos

se recicla en España (Solís Guzmán, J. 2010). Como se esperaba, la reducción de CDW EE-CE no es considerable: -6.88% y 3.09% respectivamente.

Al analizar los grupos de tareas, EE y CE muestran resultados casi similares (70%) (Fig. 11-12). Estos grupos de tareas comprenden no solo el acondicionamiento del terreno, las excavaciones y la construcción, sino también las tareas de CDW. La división en grupos de tareas que se toma de ACCD, le permite al diseñador evaluar diferentes tipos de sistemas de construcción para cada grupo modificando el modelo BIM y cambiando los coeficientes posteriores en los horarios de despegue del material. Podemos inferir que la superestructura juega un papel clave para lograr una disminución sustancial de EE y CE (Ferreiro-Cabello et al.2016).

El siguiente paso es cuantificar la estructura de soporte de carga CDW-USW para un bloque típico de vivienda social (TSH) por metro cuadrado (Fig. 13). Si el suelo inerte y la madera se dejan aparte, ya que EE y CE son casi nulos y pueden ser reciclables a bajo costo, la estructura de soporte de carga genera 75.77 kg de CDW mixto, 0.34 kg de acero CDW, 0.69 kg de papel y cartón CDW y 0.13 kg de USW por metro cuadrado.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El marco desarrollado en este estudio permite incorporar indicadores ambientales en los modelos BIM para cuantificación EE, CE, USW y CDW, siguiendo ACBS WBS. Si se aplica en el diseño conceptual, ya que BIM regenera la geometría en tiempo real, el diseñador puede evaluar diferentes soluciones formales y técnicas cuando las decisiones impactan más en LCA. En las etapas avanzadas de diseño, realizar modificaciones sustanciales al proyecto de construcción exige más tiempo y dinero que en las primeras etapas.

Los principales hallazgos de esta investigación son:

- El desarrollo de indicadores, lo que constituye una piedra angular de evaluación cuantitativa.
- La metodología que considera las necesidades del diseñador desde una perspectiva holística que fomenta la inclusión de criterios ambientales desde las primeras etapas de diseño al simplificar el proceso de introducción de indicadores.
- El cálculo del desempeño ambiental junto con el diseño arquitectónico, al reflejar todo cambio en un flujo de trabajo continuo que retroalimenta el proceso en tiempo real.

En este estudio de caso sobre una estructura de hormigón reforzado en bloques de viviendas, estos resultados verifican los supuestos de otros autores: es mejor usar materiales con bajas EE que con altas EE debido a la baja tasa de reciclaje (González y García Navarro, 2006). Además, la

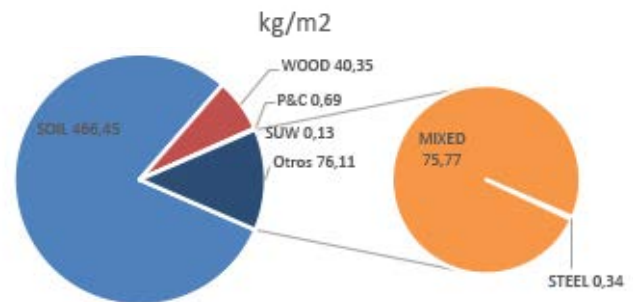


Fig. 13. Estructura de hormigón armado TSH CDW kg/m²- USW kg/m²
 Fuente: los autores

estructura de soporte de carga TSH genera 76.11 kg/m² de CDW; 75.77 kg/m² de CDW mixto, principalmente debido al hormigón y solo 0.34 kg/m² de acero CDW. Cuando se consideran por tarea, las fundaciones presentan un impacto mucho menor que la superestructura.

Estos resultados ofrecen una brecha para reducir el impacto ambiental al innovar las soluciones de estructura portante. Los materiales con baja EE/CE como la madera o los agregados inertes reciclados pueden ofrecer buenas alternativas. El sistema de construcción tradicional andaluz debe reformularse para reducir el agotamiento de los recursos naturales, el consumo de energía y la generación de CE y USW/CDW.

Una de las limitaciones de estos indicadores es que están adaptados a WBS de ACCD, ya que fueron creados para mejorar los modelos andaluces de Revit para obtener la lista de cantidades y costos a través de otros programas como Presto y Medit. En el trabajo futuro, se espera extender los indicadores ambientales a cada tarea unitaria para obtener una evaluación ambiental completa de la construcción del edificio que permita la comparación entre diferentes sistemas de construcción y materiales dentro del entorno BIM. Cuando se agreguen a ACCD, estarán disponibles para los usuarios sin una gran experiencia en herramientas de evaluación de impacto ambiental, lo que hace que esta tarea sea menos propensa a errores y consuma menos tiempo.

Una futura línea de investigación puede incluir la aplicación de la metodología a un conjunto de proyectos representativos para extender los resultados a nivel nacional y la adición de los resultados ambientales a los sistemas de certificación como BREAM y LEED. Otra línea de investigación podría ser lograr el acceso a indicadores desde otras plataformas como Navisworks, ya que ahora solo están disponibles en los horarios de despegue de materiales de Revit. Este enfoque del proceso de producción del edificio constituye una contribución importante a la sostenibilidad del entorno construido y la resistencia de las ciudades para mitigar el cambio climático, ya que los diseñadores mantienen el control de cada componente y sistema en tiempo real en la etapa de diseño conceptual.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del proyecto de investigación "Reacondicionamiento ecoeficiente de edificios y vecindarios: gestión de residuos de construcción y demolición y la aplicación de productos ecoeficientes a la normativa española" Ref: CCPI / 2015/006, así como el Ref. Del proyecto de investigación. 3548/0632, de la Universidad de Sevilla y fue financiado por MAPEI ESPAÑA, S.A.

REFERENCIAS

Abanda, F.H., A.H. Oti, and J.H.M. Tah. 2017. "Integrating BIM and New Rules of Measurement for Embodied Energy and CO 2 Assessment." *Journal of Building Engineering* 12 (July): 288–305. doi:10.1016/j.jobeb.2017.06.017.

"Acae Presto." 2018. Accessed January 21. [http://acaec.com.es//AEC \(UK\). "BIM Technology Protocol v2.1." https://aecuk.files.wordpress.com/2015/06/aecukbimtechnologyprotocol-v2-1-1-201506022.pdf](http://acaec.com.es//AEC%20(UK).%20BIM%20Technology%20Protocol%20v2.1.1.pdf)2015.

Agencia Andaluza de la Energía. 2017. "Datos Energéticos de Andalucía 2016." Conserjería de empleo, empresa y comercio. Junta de Andalucía. https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/documentos/datos_energeticos_de_andalucia_2016_0.pdf.

Ajayi, Saheed O., Lukumon O. Oyedele, Boris Ceranic, Mike Gallanagh, and Kabir O. Kadiri. 2015. "Life Cycle Environmental Performance of Material Specification: A BIM-Enhanced Comparative Assessment." *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development* 6 (1): 14–24. doi:10.1080/2093761X.2015.1006708.

Antón, Laura Álvarez, and Joaquín Díaz. 2014. "Integration of Life Cycle Assessment in a BIM Environment." *Procedia Engineering* 85: 26–32. doi:10.1016/j.proeng.2014.10.525.

Azhar, Salman, Wade A. Carlton, Darren Olsen, and Irtishad Ahmad. 2011. "Building Information Modeling for Sustainable Design and LEED® Rating Analysis." *Automation in Construction* 20 (2): 217–224. doi:10.1016/j.autcon.2010.09.019.

B. Delcambre. "Mission Numérique Bâtiment." http://www.territoires.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_mission_numerique_batiment.pdf2014.

Barón, J., Conde, J., Osuna, M., Ramírez, A., and Solís, J. 2017. "Consejería de Fomento y Vivienda / Vivienda y Rehabilitación / Base de Costes de La Construcción de Andalucía (BCCA) 29 Abril 2016. Banco de Precios." <http://www.juntadeandalucia.es/fomentoyvivienda/portal-web/web/areas/vivienda/texto/403b7931-0d21-11e6-a18a-052bf9b4a08b>.

Basbagill, J., F. Flager, M. Lepech, and M. Fischer. 2013. "Application of Life-Cycle Assessment to Early Stage Building Design for Reduced Embodied Environmental Impacts." *Building and Environment* 60 (February): 81–92. doi:10.1016/j.buildenv.2012.11.009.

Bey, Niki, Michael Z. Hauschild, and Tim C. McAlloone. 2013. "Drivers and Barriers for Implementation of Environmental Strategies in Manufacturing Companies." *CIRP Annals* 62 (1): 43–46. doi:10.1016/j.cirp.2013.03.001.

"Buildings - Energy - European Commission." 2017. *Energy*. Accessed November 22. [/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings](https://energy.ec.europa.eu/en/topics/energy-efficiency/buildings).

CEN European Committee for Standardization. 2012. "UNE-EN 15978. Sostenibilidad En La Construcción. Evaluación Del Comportamiento Ambiental de Los Edificios. Métodos de Cálculo." Asociación española de Normalización y Certificación (AENOR).

Chelsea. 2018. "DProfiler." *Cassell Consulting - Construction Operations Consulting*. Accessed August 2. <https://www.cassellconsulting.com/products/dprofiler>.

Chen, L., and W. Pan. 2015. "A BIM-Integrated Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Model for Selecting Low-Carbon Building Measures." *Procedia Engineering* 118: 606–613. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.490.

Cheng, Jack C.P., and Lauren Y.H. Ma. 2013. "A BIM-Based System for Demolition and Renovation Waste Estimation and Planning." *Waste Management* 33 (6): 1539–1551. doi:10.1016/j.wasman.2013.01.001.

Chong, Heap-Yih, Cen-Ying Lee, and Xiangyu Wang. 2017. "A Mixed Review of the Adoption of Building Information Modelling (BIM) for Sustainability." *Journal of Cleaner Production* 142 (January): 4114–4126. doi:10.1016/j.jclepro.2016.09.222.

De Wolf, Catherine, Francesco Pomponi, and Alice Moncaster. 2017. "Measuring Embodied Carbon Dioxide Equivalent of Buildings: A Review and Critique of Current Industry Practice." *Energy and Buildings* 140 (April): 68–80. doi:10.1016/j.enbuild.2017.01.075.

"EQUEST." 2018. Accessed August 1. <http://www.doe2.com/equest/>.

Ferreiro-Cabello, Javier, Esteban Fraile-García, Eduardo Martínez de Pison Ascacibar, and Francisco Javier Martínez de Pison Ascacibar. 2016. "Minimizing Greenhouse Gas Emissions and Costs for Structures with Flat Slabs." *Journal of Cleaner Production* 137 (November): 922–930. doi:10.1016/j.jclepro.2016.07.153.

FIE-BDC Association. "FORMATO DE INTERCAMBIO ESTÁNDAR DE BASES DE DATOS PARA LA CONSTRUCCIÓN - FIEBDC." <http://www.fiebdc.es/articulos/#toggle-id-1>.

Fiès, Bruno, Thomas Lützkendorf, and M Maria Balouktsi. 2013. "Life Cycle Sustainable Assessment and BIM." In *SB13 Graz*, 11. Graz.

Freire Guerrero, A., and Marrero Meléndez, M. 2015. "Evaluación a Través Del Presupuesto de La Energía Incorporada al Proyecto de Edificación." *Revista Hábitat Sustentable* 5 (1): 54–63.

Freire Guerrero, Antonio. 2017. "Presupuesto Ambiental. Evaluación de La Huella Ecológica Del Proyecto a Través de La Clasificación de La Base de Costes de La Construcción de Andalucía." Tesis doctoral, Sevilla: Universidad de Sevilla.

- Gan, Vincent J. L., Jack C. P. Cheng, Irene M. C. Lo, and C. M. Chan. 2017. "Developing a CO₂-e Accounting Method for Quantification and Analysis of Embodied Carbon in High-Rise Buildings." *Journal of Cleaner Production* 141 (January): 825–836. doi:10.1016/j.jclepro.2016.09.126.
- Gan, Vincent J.L., M. Deng, K.T. Tse, C.M. Chan, Irene M.C. Lo, and Jack C.P. Cheng. 2018. "Holistic BIM Framework for Sustainable Low Carbon Design of High-Rise Buildings." *Journal of Cleaner Production* 195 (September): 1091–1104. doi:10.1016/j.jclepro.2018.05.272.
- González, María Jesús, and Justo García Navarro. 2006. "Assessment of the Decrease of CO₂ Emissions in the Construction Field through the Selection of Materials: Practical Case Study of Three Houses of Low Environmental Impact." *Building and Environment* 41 (7): 902–909. doi:10.1016/j.buildenv.2005.04.006.
- González-Vallejo, Patricia, Madelyn Marrero, and Jaime Solís-Guzmán. 2015. "The Ecological Footprint of Dwelling Construction in Spain." *Ecological Indicators* 52 (May): 75–84. doi:10.1016/j.ecolind.2014.11.016.
- Gul, Muhammet, Erkan Celik, Alev Taskin Gumus, and Ali Fuat Guneri. 2018. "A Fuzzy Logic Based PROMETHEE Method for Material Selection Problems." *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences* 7 (1): 68–79. doi:10.1016/j.bjbas.2017.07.002.
- IEA. 2013. *Transition to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 2050*. Paris.
- Ilhan, Bahriye, and Hakan Yaman. 2016. "Green Building Assessment Tool (GBAT) for Integrated BIM-Based Design Decisions." *Automation in Construction* 70 (October): 26–37. doi:10.1016/j.autcon.2016.05.001.
- Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña. 2017. "Información Ambiental de Productos y Sistemas." <https://itec.es/>. *Instituto de Tecnología de La Construcción de Cataluña*. Accessed June 12. <https://itec.es/metabase/productos-sostenibles/m/m/m/>.
- "Introducing IESVE Software | Integrated Environmental Solutions." 2018. Accessed August 2. <https://www.iesve.com/software>.
- Inyim, Peeraya, Joseph Rivera, and Yimin Zhu. 2015. "Integration of Building Information Modeling and Economic and Environmental Impact Analysis to Support Sustainable Building Design." *Journal of Management in Engineering* 31 (1): A4014002. doi:10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000308.
- Jones, C., and Allen, Stephen. 2017. "Embodied Energy and Embodied Carbon." *Circular Ecology*. Accessed December 15. <http://www.circularecology.com/embodied-energy-and-carbon-footprint-database.html>.
- Lamé, Guillaume, Yann Leroy, and Bernard Yannou. 2017. "Ecodesign Tools in the Construction Sector: Analyzing Usage Inadequacies with Designers' Needs." *Journal of Cleaner Production* 148 (April): 60–72. doi:10.1016/j.jclepro.2017.01.173.
- "LEED | USGBC." 2018. Accessed August 9. https://new.usgbc.org/leed?gclid=Cj0KCQjwzK_bBRDDARIsAFQF7zMiWpaPRLjiG8G_eSr_VFHh3_THFyTlyUeGlpSvfvHH2llo2NR7dbAaAiq8EALw_wcB.
- López-Mesa, Belinda, Ángel Pitarch, Ana Tomás, and Teresa Gallego. 2009. "Comparison of Environmental Impacts of Building Structures with in Situ Cast Floors and with Precast Concrete Floors." *Building and Environment* 44 (4): 699–712. doi:10.1016/j.buildenv.2008.05.017.
- Lützkendorf, Thomas, Greg Foliente, Maria Balouktsi, and Aoife Houlihan Wiberg. 2015. "Net-Zero Buildings: Incorporating Embodied Impacts." *Building Research & Information* 43 (1): 62–81. doi:10.1080/09613218.2014.935575.
- Marrero, Madelyn, and Antonio Ramirez-De-Arellano. 2010. "The Building Cost System in Andalusia: Application to Construction and Demolition Waste Management." *Construction Management and Economics* 28 (5): 495–507. doi:10.1080/01446191003735500.
- Marrero Meléndez, M., Solís Guzmán, J., Llácer Pantión, R., Ramírez de Arellano Agudo, A., Alba Rodríguez, D., González Vallejo, P., Martínez Rocamora, A., and Ruiz Pérez, R. 2015. "G-GI3003/IDIS Huella Ecológica de La Rehabilitación de Edificios: Viabilidad Económica y Ambiental. (HEREVEA)." Universidad de Sevilla. http://www.aopandalucia.es/inetfiles/resultados_IDI/GGI3003IDIS/memoria/1__Memoria_Final_141215.pdf.
- Marzouk, Mohamed, Eslam Mohammed Abdelkader, and Khalid Al-Gahtani. 2017. "Building Information Modeling-Based Model for Calculating Direct and Indirect Emissions in Construction Projects." *Journal of Cleaner Production* 152 (May): 351–363. doi:10.1016/j.jclepro.2017.03.138.
- "Medit Mediciones en BIM con REVIT." 2013. *theBIMshop.es La Tienda del BIM*. <http://www.thebimshop.es/bim/software-bim/medit/>.
- Mercader Moyano, M. 2010. "Cuantificación de Los Recursos Consumidos y Cuantificación de Las Emisiones de CO₂ Producidas En Las Construcciones de Andalucía y Sus Implicaciones En El Protocolo de Kioto." Seville: School of Architecture-University of Seville. <http://fondosdigitales.us.es/tesis/tesis/1256/cuantificacion-de-los-recursos-consumidos-y-emisiones-de-co2-producidas-en-las-construcciones-de-andalucia-y-sus-implicaciones-en-el-protocolo-de-kioto/>.
- Mercader-Moyano, Pilar, and Antonio Ramirez-de-Arellano-Agudo. 2013. "Selective Classification and Quantification Model of C&D Waste from Material Resources Consumed in Residential Building Construction." *Waste Management & Research* 31 (5): 458–474. doi:10.1177/0734242X13477719.
- Ministry of Environment and Rural and Marine Affairs. 2008. *II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición Para El Período 2008–2015*. Boletín Oficial del Estado. Madrid: Spanish Government.
- Mousa, Michael, Xiaowei Luo, and Brenda McCabe. 2016. "Utilizing BIM and Carbon Estimating Methods for Meaningful Data Representation." *Procedia Engineering* 145: 1242–1249. doi:10.1016/j.proeng.2016.04.160.
- Najjar, Mohammad, Karoline Figueiredo, Mariana Palumbo, and Assed Haddad. 2017. "Integration of BIM and LCA: Evaluating the Environmental Impacts of Building Materials at an Early Stage of Designing a Typical Office Building." *Journal of Building Engineering* 14 (November): 115–126. doi:10.1016/j.job.2017.10.005.

- Official Journal of the European Communities., and Commission Decision 2001/118/EC of wastes. 2001. "European Waste Catalogue."
- Official Journal of the European Union. 2010. *EPBD Recast: Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings*.
- Official Journal of the European Union. 2012. "Guidelines Accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 Supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the Energy Performance of Buildings by Establishing a Comparative Methodology Framework for Calculating Cost-Optimal Levels of Minimum Energy Performance Requirements for Buildings and Building Elements."
- Ramírez de Arellano Agudo, Antonio. 2002. *Retirada selectiva de residuos: modelo de presupuestación*. Sevilla: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla.
- Rodríguez Serrano, Antonio, and Santiago Porras Álvarez. 2016. "Life Cycle Assessment in Building: A Case Study on the Energy and Emissions Impact Related to the Choice of Housing Typologies and Construction Process in Spain." *Sustainability* 8 (3): 287. doi:10.3390/su8030287.
- Sandberg, Nina Holck, and Helge Brattebø. 2012. "Analysis of Energy and Carbon Flows in the Future Norwegian Dwelling Stock." *Building Research & Information* 40 (2): 123–139. doi:10.1080/09613218.2012.655071.
- Solís Guzmán, J. 2010. "Evaluación de La Huella Ecológica Del Sector Edificación (Uso Residencial) En La Comunidad Andaluza." Doctoral thesis, Seville: University of Seville.
- Soust-Verdaguer, Bernardette, Carmen Llatas, and Antonio García-Martínez. 2017. "Critical Review of Bim-Based LCA Method to Buildings." *Energy and Buildings* 136 (February): 110–120. doi:10.1016/j.enbuild.2016.12.009.
- "Spain Launches BIM Strategy with Pencilled-in 2018 Mandate | BIM+." 2018. Accessed February 3. <http://www.bimplus.co.uk/news/spain-launches-bim-strategy-pencilled-2018-mandate/>.
- Spanish Government – Ministry of the Presidency. 2008. "Real Decreto 105/2008, de 1 de Febrero, Por El Que Se Regula La Producción y Gestión de Los Residuos de Construcción y Demolición (National Decree 105/2008, February 1, Which Regulates the Production and Management of Construction and Demolition Waste)." Ministry of the Presidency. Madrid. Spain.
- Surveyors, Royal Institution of Chartered. 2018. "RICS NRM: New Rules of Measurement." Accessed August 1. <http://www.rics.org/uk/knowledge/professional-guidance/guidance-notes/new-rules-of-measurement-order-of-cost-estimating-and-elemental-cost-planning/>.
- Swiss Centre for Life Cycle, and Inventories. 2017. "Ecoinvent Version 3." Accessed December 15. <http://www.ecoinvent.org/database/database.html>.
- "Tally." 2018. Accessed August 1. <http://www.choosetally.com/>.
- Tiwari, Piyush. 2001. "Energy Efficiency and Building Construction in India." *Building and Environment* 36 (10): 1127–1135. doi:10.1016/S0360-1323(00)00056-1.
- "United Nations Framework Convention on Climate Change." 2018. Accessed January 21. <http://unfccc.int/2860.php>.
- Villoria Sáez, Paola, Jaime Santa Cruz Astorqui, Mercedes del Río Merino, María del Pilar Mercader Moyano, and Antonio Rodríguez Sánchez. 2018. "Estimation of Construction and Demolition Waste in Building Energy Efficiency Retrofitting Works of the Vertical Envelope." *Journal of Cleaner Production* 172 (January): 2978–2985. doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.113.
- Wong, Johnny Kwok Wai, and Jason Zhou. 2015. "Enhancing Environmental Sustainability over Building Life Cycles through Green BIM: A Review." *Automation in Construction* 57 (September): 156–165. doi:10.1016/j.autcon.2015.06.003.
- Yang, Xining, Mingming Hu, Jiangbo Wu, and Bin Zhao. 2018. "Building-Information-Modeling Enabled Life Cycle Assessment, a Case Study on Carbon Footprint Accounting for a Residential Building in China." *Journal of Cleaner Production* 183 (May): 729–743. doi:10.1016/j.jclepro.2018.02.070.
- Yeheyis, Muluken, Kasun Hewage, M. Shahria Alam, Cigdem Eskicioglu, and Rehan Sadiq. 2013. "An Overview of Construction and Demolition Waste Management in Canada: A Lifecycle Analysis Approach to Sustainability." *Clean Technologies and Environmental Policy* 15 (1): 81–91. doi:10.1007/s10098-012-0481-6.
- ZukunftBAU. 2013. "A Research Program of the Federal Ministry for Transport, Building and Urban Affairs (BMVBS)." Federal Republic of Germany. <http://www.aec3.com/de/downloads/BIM-Guide-Germany.pdf>.





INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMÁTICAS SOCIO- PRODUCTIVAS LOCALES. CASO DE ESTUDIO: CONCORDIA, ENTRE RÍOS-ARGENTINA

Recibido 06/08/2019
Aceptado 29/12/2019

TECHNOLOGICAL INNOVATION IN THE RESOLUTION OF LOCAL SOCIO-PRODUCTIVE PROBLEMS. CASE STUDY: CONCORDIA, ENTRE RÍOS, ARGENTINA

VALERIA FENOGLIO

Doctora en Arquitectura, Investigadora
Universidad Nacional de Córdoba (UNC) - Centro de
Investigaciones y Estudios sobre Cultura y Sociedad (CIECS)
-Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
(CONICET), Córdoba, Argentina
<https://orcid.org/0000-0003-0243-1798>
valefenoglio3@gmail.com

RESUMEN

El presente trabajo pone en relevancia la promoción del diseño y gestión de innovaciones tecnológicas para la resolución de problemáticas socio-productivas locales. Desde una visión de innovación, que intenta superar la óptica exclusivamente económica, se toma como caso paradigmático una experiencia de producción de hábitat desarrollada en la localidad de Concordia (Entre Ríos, Argentina). La misma, desarrolla colectivamente una tecnología asociada a sistemas constructivos en madera, con el fin de promover procesos productivos sustentables a partir de recursos y saberes locales. Asimismo, propone una innovación que intenta modificar los modos productivos actuales, superando la transferencia tecnológica unidireccional, por nuevas formas de resolución de problemas de manera cooperativa y solidaria. Mediante un estudio interpretativo, el trabajo tiene por objetivo principal analizar el caso desde la perspectiva crítica de la tecnología, relacionando el concepto de *código técnico* (normas cognitivas y sociales que configuran los procesos de producción de conocimiento) con los modos de diseñar y gestionar la producción de hábitat en la experiencia. Como resultado, se dilucidan aspectos emergentes del caso que, a modo de insumos o lineamientos, permiten contribuir a la generación de nuevos abordajes para la producción de un hábitat sustentable y más justo cognitivamente.

Palabras clave

Energía incorporada, emisiones de CO₂, residuos de demolición y construcción, diseño por ordenador

ABSTRACT

This paper highlights the promotion of the design and management of technological innovations for the resolution of local socio-productive problems. Working from a point of view on innovation that attempts to overcome an exclusively economic perspective, a habitat production experience carried out in the town of Concordia (Entre Ríos, Argentina) was selected as a paradigmatic case. This experience collectively develops a technology related to wood construction systems in order to promote sustainable production processes based on local resources and knowledge. Likewise, it proposes an innovation that attempts to modify the current modes of production and surpass unidirectional technological transfer with new ways of solving problems cooperatively and charitably. By means of an interpretive study, the main objective is to analyze the case from the critical perspective of technology, relating the concept of technical codes (cognitive and social norms that configure the processes of knowledge production) with the ways of designing and managing habitat production in the experience. As a result, emerging aspects of the case are elucidated, which in the form of inputs or guidelines make it possible to contribute to the creation of new approaches for the production of a sustainable habitat that is more cognitively just.

Keywords

technology, society, construction systems

INTRODUCCIÓN

PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

La búsqueda de nuevos abordajes para la producción de un hábitat sustentable y más justo cognitivamente es el principal motor de marcha en el presente trabajo. Desde hace varias décadas, los Estudios Sociales de la Ciencia y la Tecnología (ESCyT) intentan cuestionar el papel del conocimiento científico-tecnológico en relación con la sociedad. Entre las diferentes disciplinas y perspectivas teóricas que integran estos estudios subyace una crítica común: superar la visión clásica y determinista de la Ciencia y la Tecnología (CyT), donde se prioriza el producto por sobre cualquier otra racionalidad, suponiendo que todo desarrollo tecnológico es la solución a un problema existente sin considerar contextos ni actores particularizados. Autores como Dagnino (2008) consideran que esta concepción lleva a que sea un asunto técnico y no político, lo cual ejemplifica a partir de una especie de barrera virtual que se forma entre el ambiente de producción científica-tecnológico y el contexto social, político y económico de nuestras sociedades. En América Latina, cuestiones como la democratización del conocimiento y la desigualdad social vienen siendo abordadas desde esta perspectiva teórica por diversas instituciones e investigaciones, cuyo énfasis está puesto en generar un manejo más apropiado de CyT.

En Argentina, todavía falta un largo camino en la construcción de abordajes alternativos que generen procesos sustentables en el campo del hábitat. Pero desde hace algunos años, un grupo de investigadores, del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de la Nación (CONICET), viene desarrollando procesos de innovación tecnológica en distintas partes de Argentina. La convicción ideológica de dichos procesos es el fortalecimiento de emprendimientos pequeños, ya que estos contribuyen a la generación de empleo (70% del empleo productivo está en manos de dichos emprendimientos) y la distribución de la renta que este tipo de proceso económico promueve, al fomentar articulaciones comerciales para un abastecimiento y consumo dentro del país (Peyloubet, 2018).

Articulando la problemática del hábitat con los procesos productivos, el equipo de investigación ha desarrollado innovaciones tecnológicas con madera de cultivo local, considerando el alto potencial socio-productivo que este tiene. Según Diana Guillén, las características de Argentina ubican a este país entre las regiones del mundo con mayores ventajas naturales por el rápido crecimiento de sus plantaciones y su potencial productivo (citado en Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria, 2014).

La ciudad de Concordia en la provincia de Entre Ríos (estudio de caso) cuenta con la mayor superficie boscosa de *Eucalyptus Grandis*. Como problemática local, se advierte que el destino principal de esta producción es el aserrado (45%), predominando las pequeñas industrias que utilizan madera corta y producen embalajes, pallets y cajones. El

porcentaje restante (55%) se considera subproducto: aserrín, costaneros, corteza y refilados destinados a la fabricación de tableros de aglomerados. En ese escenario, no se identifican procesos locales que otorguen valor agregado y distribución de renta sobre aquel 45% restante.

Frente a esta problemática socio-productiva cabe preguntarse: ¿Cómo diseñar y gestionar propuestas tecnológicas que contribuyan al mejoramiento de territorios locales? ¿Cómo proceder a otras operaciones alternativas que den lugar a nuevos códigos o normas tecnológicas más adecuadas social y técnicamente?

Siguiendo a Albornoz (2013), la innovación está hoy en el centro de las políticas que los países de América Latina aplican para impulsar el desarrollo y la equidad. Sin embargo, hubo una traslación mimética de políticas creadas en economías en las que existe una fuerte demanda de nuevos conocimientos a contextos económicos en los que tal demanda es muy escasa. (Albornoz, 2013). Asimismo, se utiliza frecuentemente la innovación para incidir en la competitividad de las empresas y muy poco para relacionarla con la mejora de los problemas sociales (OEI, 2014).

Otro cuestionamiento que se le otorga a los procesos tecnológicos de innovación son las formas tradicionales con que se legitima y construye el conocimiento en dichos procesos. Para Santos (2009), existe un intento por desmontar la dicotomía existente entre conocimiento experto o científico y conocimiento local o popular, con el objetivo de rescatar los saberes que surgen de las propias experiencias sociales.

En ese marco, el trabajo tiene por objetivo principal comprender e interpretar las particularidades que fueron dadas en un proceso de desarrollo tecnológico, que vincula al sector de CyT con el territorio. Metodológicamente, se analiza el caso desde la perspectiva crítica de la tecnología, relacionando el concepto de *código técnico* (normas cognitivas y sociales que configuran los procesos de producción de conocimiento) con los modos de diseñar y gestionar la producción de hábitat en la experiencia. Para ello, se elaboraron una serie de presupuestos de partida y categorías analíticas *ad hoc*; estas últimas reconocidas en el presente trabajo como las premisas de diseño que el equipo de investigación emplea en su labor investigativa. En cuanto a los resultados, se dilucidaron aspectos emergentes del caso, que a modo de insumos o lineamientos pretenden contribuir a la generación de nuevos abordajes para la producción de un hábitat sustentable y más justo cognitivamente.

MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

A lo largo de la historia, los procesos de industrialización y desarrollo tecnológico se han visto continuamente acompañados por contra-corrientes de innovación, como reacción y cuestionamiento a las trayectorias dominantes a partir del desarrollo de diferentes movimientos (denominados como Tecnología Apropiada y Tecnología Social), con formas

de innovación alternativa y socialmente inclusiva (Fressoli, Smith, Thomas y Bortz, 2016).

Para el presente trabajo interesa destacar a la Tecnología Social como un movimiento de innovación contemporáneo que busca proveer un nuevo modo de desarrollar e implementar tecnologías (de Producto, Proceso y Gestión), orientadas a la generación de dinámicas de inclusión socioeconómica y desarrollo sustentable (Thomas y Becerra, 2014). Este movimiento aporta una dimensión procesual, una visión ideológica y un elemento de operacionalidad diferente que no se encuentra en las actuales tecnologías disponibles (Dagnino, 2008).

La integración de conceptos teóricos y concepciones ideológicas provenientes de diferentes enfoques disciplinarios (filosofía de la tecnología; sociología de la tecnología; economía del cambio tecnológico, etc.) constituyen el marco analítico-conceptual con el que se aborda el estudio de la Tecnología Social, partiendo de una revisión crítica de la llamada Tecnología Apropriada (TA), con el objetivo que, desde allí, se pueda construir otra tecnología de base cognitiva diferente.

La crítica señalada a esta tecnología (TA), originada en la década del 60, se asienta sobre la idea de que la solución al problema se construye de una manera unidireccional, generando un juego de oferta y demanda, donde la lógica de transferencia subordina todo el proceso. Esto significa que se ha venido desarrollando una serie de tecnologías a modo de *stock*, utilizadas muchas veces según la demanda, y que principalmente ha dejado a un lado aquel conocimiento tradicional o tácito, que la academia no legitima. Así, se desperdicia el alto potencial de saberes que se encuentra contenido en actores y experiencias sociales, advirtiéndose que el conocimiento aún se construye de forma exclusiva, de arriba hacia abajo, a partir de un proceso unidireccional, es decir, a modo de transferencia.

Por lo tanto, consideramos que, en la búsqueda de alternativas para la producción de hábitat, la Tecnología Social representa un camino que va en esa dirección. Entre los modelos teóricos que conforman estos estudios, el Constructivismo Social y la Teoría Crítica de la Tecnología se constituyen en respuesta radical a la visión mono-dimensional, lineal y determinista de la tecnología. Respecto al Constructivismo Social, Valderrama (2004) describe esta teoría como una manera de abrir la caja negra del conocimiento para descubrir que, en su interior, se presentan dinámicas que se debe estudiar porque están íntimamente ligadas a procesos sociales. Esta teoría ofrece la posibilidad de considerar a la tecnología como una construcción social y como resultado de procesos de negociación y de interpretaciones diferentes entre grupos sociales relevantes, hasta que la tecnología llega a ser lo que finalmente es. Sin embargo, consideramos que no basta con

abrir la caja negra e identificar los actores relevantes y sus intereses, sino que también es necesario que, previo al diseño de las tecnologías, operen mecanismos más democráticos. En ese sentido, la propuesta de Andrew Feenberg gira en torno a la extensión del valor de democracia al ámbito de la tecnología. El autor sugiere que la noción de racionalización, hoy centrada en la idea de progreso y eficiencia, debiera fundirse en la responsabilidad de la acción técnica por los contextos humanos y naturales. Para ello, Feenberg (2006) plantea cambiar los valores dominantes de la racionalidad tecnológica, incorporando *a priori*, en el diseño de la tecnología, aspectos sociales, culturales y ambientales alternativos, que propicien formas más participativas y democráticas. Asimismo, hace referencia a la noción de *código técnico* como a la realización de un interés bajo la forma de una solución técnicamente coherente a un problema. De esta manera, "el producto de las elecciones técnicas respalda el modo de vida de uno u otro grupo social influyente" (Giuliano, 2012, p. 2). En la mayoría de los casos, los intereses de grupos dominantes se materializan en códigos técnicos que, de manera invisible, se sedimentan en reglas, procedimientos, instrumentos y artefactos en pro de la búsqueda de poder y de ventajas por una hegemonía dominante. Para Feenberg, las características de este código técnico son autoritarias y verticalistas y acarrear problemas serios, incluso en los sectores más avanzados de la sociedad (Tula Molina y Giuliano, 2015). Este abordaje hace posible apreciar con mayor claridad que en los diseños tecnológicos aparecen beneficiados y damnificados, por lo que su concretización representa una serie de luchas y estrategias entre actores diversos para desarrollar una u otra alternativa tecnológica. Según Feenberg (2006), la tecnología puede constreñir y colonizar, pero también puede liberar potencialidades reprimidas del mundo de la vida que de otra forma hubieran quedado sumergidas. Por consiguiente, para este teórico, la tecnología es esencialmente ambivalente y disponible para varios tipos de desarrollo. Además, autores como Tula Molina y Giuliano (2017) sostienen que en el diseño de la tecnología intervienen otros aspectos tales como intereses, costumbres, valores y relaciones de poder, por lo que resulta necesario que sean puestos en discusión por parte de una pluralidad de actores sociales, no solo los expertos, y organizados en base a principios democráticos.

METODOLOGÍA

El presente trabajo se posiciona en el marco del paradigma Interpretativo¹, cuyo "fundamento radica en la necesidad de comprender el sentido de la acción social en el contexto del mundo de la vida y desde la perspectiva de los participantes" (Vasilachis, 2006, p. 48). Una investigación posicionada desde este paradigma considera que el caso en sí mismo desempeña un papel fundamental, que puede aportar a la comprensión del problema en estudio (Kazez, 2009).

[1] Según Guba y Lincoln (1994) en el paradigma interpretativo existen realidades múltiples, holísticas y construidas. Esto implica la renuncia al ideal positivista de la predicción y control.

Siguiendo esa línea, el propósito de la investigación aquí expuesta es entender y dilucidar profundamente un caso particular de producción de hábitat (Concordia, Entre Ríos). En primer lugar, interesa abordar dicho caso desde la tradición cualitativa, principalmente por dos características puntuales: a) por lo que estudia esta tradición: contextos, procesos, sentidos, significados y relatos; y b) por la meta y su finalidad: búsqueda de lo nuevo y provisión de nuevas perspectivas sobre lo que se conoce, describe, explica, elucida, construye y descubre (Vasilachis, 2006).

En ese marco, se propone analizar el caso desde la perspectiva crítica de la tecnología, relacionando el concepto de *código técnico* con los modos de diseñar y gestionar la producción de hábitat en la experiencia. Así, se entiende "código técnico" como aquellas normas cognitivas y sociales que configuran los procesos de producción de conocimiento y cuyo resultado determina un tipo de innovación tecnológica. Este enfoque permite apreciar con claridad que en los diseños tecnológicos aparecen beneficiados y damnificados, por lo que su concretización representa una serie de luchas y estrategias entre actores diversos para desarrollar una u otra alternativa tecnológica. Desde esta visión crítica acerca de la tecnología, se enuncian una serie de presupuestos de partida que guiarán la actual reflexión:

- Los conocimientos locales se constituyen en insumos indispensables para producir transformaciones capaces de mejorar la calidad de vida de las personas, compatibilizándose con el contexto natural y social.
- En la mayoría de las innovaciones tecnológicas, dentro del campo del hábitat, no se incorpora el conocimiento tradicionalmente utilizado (saber local) y se privilegia al producto u artefacto tecnológico sobre los procesos o gestiones tecnológicas.
- La aplicación de modelos de gestión democráticos posibilita el empoderamiento de actores y sectores muchas veces invisibilizados en los procesos de producción de hábitat.

Consecuentemente, en la búsqueda de dilucidar insumos emergentes para la generación de un hábitat sustentable y más justo cognitivamente, se plantea como estrategia metodológica el estudio del caso a partir de tres categorías analíticas elaboradas en tal sentido:

a) Contexto de aplicación (valoración de la capacidad instalada). Esta categoría analítica hace referencia a la producción de conocimiento y su relación con la utilidad social del mismo. Esta intención, de producir conocimiento que sea útil para alguien, ya sea el sector productivo, los gobiernos locales o la sociedad en general, está plasmada de manera relevante desde el inicio de las intervenciones o investigaciones. Por tanto, esta categoría permite analizar cuál es el contexto de aplicación del caso, cuáles son las capacidades valoradas y rescatadas para la producción de hábitat y a qué sectores específicos de la sociedad se beneficia.

b) Encuentros productivos: Co-construcción del conocimiento (producción de conocimiento colectivo). Esta categoría analítica

es una premisa investigativa que el equipo de investigación viene desarrollando desde hace varios años en los procesos de producción de hábitat. La Co-construcción de conocimiento adscribe a un tipo de trabajo colectivo, donde los saberes de los diversos actores son incorporados a los procesos productivos. Permite analizar qué tipo de conocimientos circulan en esos espacios denominados "encuentros productivos", cómo se construyen dichos espacios y qué significado se le otorga a la propiedad intelectual de los resultados obtenidos.

c) Alianzas inter-actorales/inter-sectoriales (gestión democrática). Como premisa investigativa, esta categoría asume a la gestión como una activa articulación intersectorial, cuya estrategia radica en convocar en la resolución de la problemática del hábitat a la mayor cantidad de sectores relevantes para la definición de políticas públicas que generen beneficios distribuidos. Esta permite analizar los acuerdos surgidos a partir de este tipo de gestión, cómo se comparte la información, cómo convergen los sentidos e intereses de cada sector participante y cómo se toman las decisiones.

Caracterización del caso de estudio: La experiencia toma lugar en la ciudad de Concordia (provincia de Entre Ríos), ubicada en el litoral argentino (Figura 1). Como segunda ciudad más grande de dicha provincia, se caracteriza por la relevancia de la actividad forestal, ya que presenta la mayor superficie de árboles de Eucalyptus Grandis. Desde el año 2010, un grupo de investigadores de CONICET ha implementado en esta localidad (a través de diversos proyectos de investigación) una Red Inter-actoral, con el objetivo de llevar adelante desarrollos tecnológicos en madera, poniendo en valor desde sus inicios la matriz productiva local (Peyloubet, 2017) (Figura 2). En ese contexto de aplicación y bajo un proceso de innovación cognitiva, se ha desarrollado concretamente una tecnología constructiva maderera que, por su configuración de componentes, posee un diseño flexible y adaptable a diferentes usos (vivienda, equipamiento urbano, plantas de reciclado, etc.). Mediante dicha propuesta, se intenta traccionar la producción foresto-industrial de la región y localidad, con el fin de fomentar el potencial laboral en el sector, haciendo uso eficiente del recurso madera y diversificando el mismo para alcanzar niveles de rentabilidad mayores, y así generar sobre la cadena de valor una plusvalía en el uso de la materia prima a partir del diseño de producto (sistema constructivo). De igual modo, se advierte que la propuesta involucra a pequeños productores que forman parte de la economía vulnerable de la localidad, cuya inserción en el mercado requiere de un apalancamiento del Estado.

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

A) CONTEXTO DE APLICACIÓN: VALORACIÓN DE LA CAPACIDAD INSTALADA

La experiencia en Concordia se caracteriza por un modo de producción de conocimiento alternativo a los mecanismos tradicionales o hegemónicos. El equipo de investigación de CONICET ha venido desarrollando en otras localidades

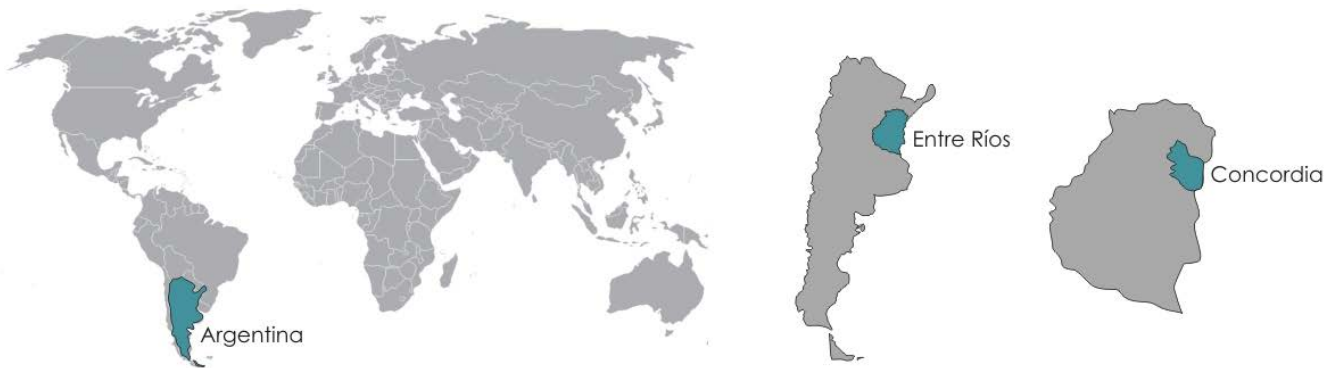


Figura 1. Ubicación geográfica. Fuente: Elaboración de la autora.



Figura 2. Producción forestal. Madera aserrada Eucalytus Grandis. Fuente: Imagen extraída de PROCODAS (2011) y PAD-ANPCYT (2017).

procesos de producción de hábitat donde la resolución de la problemática se ha generado a partir de circuitos productivos inter-actorales y no desde la concepción del artefacto, es decir, la vivienda. Ese modo alternativo de abordar la producción de hábitat llamó el interés de funcionarios municipales de Concordia y el año 2010 el equipo de investigación fue convocado por la Secretaría de Producción y Trabajo para trabajar en proyectos que dinamizaran las cadenas productivas locales del ámbito forestal, la producción de vivienda y generación de trabajo para pequeños productores. En ese contexto, Concordia contaba con una importante capacidad instalada: bosques de Eucalyptus, aserraderos y una Asociación de Carpinteros.

Frente a esta sub-utilización de recursos y conocimientos locales, la propuesta de intervención en el territorio se desarrolló bajo las siguientes premisas de diseño:

- a) Reconocer y valorar la matriz productiva local: se recorrieron aserraderos y bosques, con objetivo de poner en relevancia la capacidad instalada (Figura 3).
- b) En base a dicho reconocimiento y valoración, utilizar el mayor porcentaje posible de madera local (Eucalyptus Grandis) para la construcción de componentes: esto permitiría re-diversificar y re-significar en la población el uso que se hace del recurso maderable en la localidad².
- c) A partir de una demanda local, se decide diseñar como prototipo piloto un salón de usos múltiples (SUM), con un sistema constructivo realizado con predominancia de tablas de Eucalyptus Grandis de 1"x4", reconocidas estas como la matriz productiva local (Figura 4).

[2] En este punto, es clave aclarar que la elección de decidir por utilizar la matriz productiva local (tablas de madera de sección muy pequeña), para re-definir el uso de la madera de Eucalyptus Grandis, generó el desarrollo de un diseño estructural particular, que fuera capaz de responder prioritariamente a la solicitud de esfuerzos de viento. En tal sentido, fue necesario someter dicho diseño a rigurosos cálculos estructurales, quedando conformada una estructura de pórticos (paneles de cerramientos), columnas y una estructura de techo. Como resultado de dichos cálculos, se determinaron las dimensiones de los elementos del sistema, la colocación de diagonales para generar rigidez a la estructura, la cantidad y tipo necesario de vinculaciones metálicas, etc.



Figura 3. Recorrido por producciones forestales locales. Fuente: Imágenes extraídas de DETEM (2012).



Figura 4. Diseño y desarrollo tecnológico de un SUM con madera local. Fuente: Imágenes extraídas de PID 0079 (2016).



Figura 5. Sistema constructivo de componentes prefabricados que se adapta a distintas tipologías como vivienda o equipamientos barriales. Fuente: Imágenes extraídas de PID 0079 (2016).

d) Diseñar un desarrollo tecnológico de producto flexible capaz de adaptarse a diferentes requerimientos y usos: viviendas o equipamientos barriales (Figura 5).

Asimismo, la elección de un recurso natural renovable como la madera de Eucalyptus para la construcción implicó explorar provechosamente varias dimensiones del problema: en términos ambientales, se estaba utilizando un recurso maderero de bosque de crecimiento rápido que, al ser seleccionado como material para la construcción, contaba con significativas ventajas comparativas en relación con otros materiales de construcción, entre las que destacan las siguientes:

- La producción de madera actúa como almacén de carbono purificando el aire y contribuyendo a la reducción del efecto invernadero;
- Los procesos de producción y transformación de la madera consumen menos energía que los procesos productivos de otros materiales;

- Mucha de la energía que se consume proviene de sus propios residuos, por ende, la industrialización de la madera incide positivamente en la reducción de la demanda de combustibles sólidos;
- Se puede utilizar las cenizas de madera como fertilizantes para el campo.

Las decisiones y elecciones que se tomaron de manera colectiva en el inicio del proyecto de investigación buscaron respaldar los intereses del sector productivo local y responder a la demanda del sector gubernamental (municipio local), cuyo propósito fue re-dinamizar la economía local. Es decir, este constituye una propuesta de producción de hábitat que responde a las necesidades locales, y no al revés, como cuando la comunidad es la que tiene que ajustarse a la nueva tecnología introducida (proceso dominante en la construcción de tecnologías). Siguiendo aquí a Herrera (2010), es muy frecuente la detección de propuestas y desarrollos tecnológicos focalizados en la innovación del producto que, por lo general, desestiman, de manera



Figura 6. Lugar potencial de producción de conocimiento, llamado como Encuentros Productivos. Fuente: Imágenes extraídas de PID 0079 (2016).

previa, todas las condiciones sociales y técnicas que los actores locales pueden proveer a la construcción de dicha tecnología. El hecho de que el proyecto revalorizara el oficio y la capacidad local en la ciudad de Concordia hizo que los actores pudieran trabajar, desde su identidad; básicamente, desde lo que son y saben hacer, creando un sujeto social que puede modificar y apropiarse del producto tecnológico en base a su experiencia en el oficio (generación de trabajo autónomo). En esa dirección, la búsqueda de valor agregado a un recurso sub-utilizado y el reconocimiento de la capacidad instalada en la localidad constituyen unos de los elementos que configuran las normas cognitivas y sociales que gobiernan el proceso de producción de conocimiento en la experiencia en Concordia.

B) ENCUENTROS PRODUCTIVOS: CO-CONSTRUCCIÓN DEL CONOCIMIENTO (PRODUCCIÓN DE CONOCIMIENTO COLECTIVO)

La propuesta metodológica de abordaje de producción de hábitat que plantea esta experiencia adscribe, como se ha sostenido, a un tipo de trabajo colectivo donde los saberes de los diversos actores son incorporados a los procesos productivos, en una integración que permite abrir las cajas negras del saber experto de algunos y reivindicar el saber técnico y experiencial de otros. Esta metodología fue denominada por el equipo de investigación como "Co-construcción del conocimiento". Según Peyloubet (2018), la idea fundamental en propuestas de trabajo colaborativo como ésta se asienta en la complementariedad, que desplaza a la competitividad, en un accionar asociativo, donde la propiedad intelectual es compartida. De esta manera, el desarrollo de la tecnología constructiva, es decir de producto, se crea en espacios de interacción llamados "encuentros productivos" donde, de manera grupal y mediante una

participación respetuosa, se van plasmando ideas, saberes y decisiones técnicas sobre la tecnología en cuestión. Para los actores participantes -carpinteros, investigadores, técnicos municipales, cooperativistas de trabajo-, estos encuentros son espacios donde el saber y el conocimiento circulan solidariamente y donde todos enseñan y todos aprenden, dándose como resultado una construcción colectiva de la tecnología. En ese sentido, lo paradigmático y beneficioso de la experiencia es que el desarrollo tecnológico no llegó a la localidad como un sistema cerrado, a modo de caja negra y junto con un manual de uso, sino todo lo contrario. La predisposición de los técnicos investigadores al intercambio de conocimiento estuvo presente al llegar a la Asociación de Carpinteros de Concordia. La decisión de no transferir tecnologías por un acercamiento dialógico con los actores intervinientes le proporcionó de manera implícita a la tecnología cualidades políticas, tales como:

- La posibilidad de los actores intervinientes de sentirse parte del desarrollo de la tecnología;
- La posibilidad de cambio, ajustes y nuevas ideas a partir del intercambio,
- El enriquecimiento de todos los actores intervinientes, incluso el propio sector académico, gracias al intercambio de distintos saberes que generó nuevos aprendizajes;
- Apertura a los problemas y a la realidad local, la cual hizo posible que la tecnología fuera lo más adecuada social y técnicamente a dicho contexto.

El fuerte reconocimiento de lo local, y el uso de una metodología de trabajo de *Encuentros Productivos*, promovió otra instancia de transición en los modos de operar del sector de CyT. Una vez montado y construido el SUM, y luego del inicio de la construcción de la primera vivienda como prototipo, se advirtió de manera colectiva la necesidad de gestionar un Certificado de Aptitud Técnica³ (CAT) de tal sistema.

[3] CAT: Certificación de aptitud técnica de sistemas construidos no tradicionales como la madera requerida para la construcción con fondos nacionales.

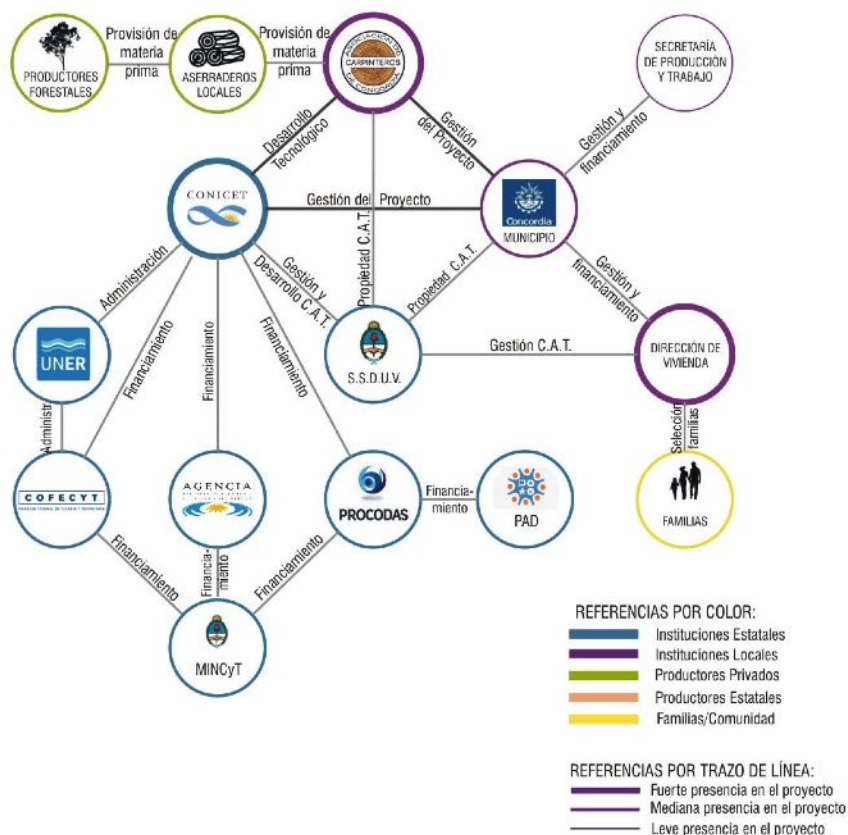


Figura 7. Red interactoral de la experiencia en Concordia. Fuente: <https://coconstrucciondelconocimiento.wordpress.com>

Para el equipo de investigación, el sistema constructivo al que se había llegado era el resultado de la integración de ideas, saberes y soluciones que la comunidad había usado tradicionalmente en la construcción de viviendas de madera (producto), así como también de los aspectos de gestión y comercialización de recursos locales (proceso). Por ello, se decidió dejarlo en manos del actor municipal y la Asociación de Carpinteros. Una tecnología cuya resolución final fue producto de una complementariedad de saberes diversos no podía estar limitada por patentes que involucraran derechos lucrativos para los supuestos desarrolladores, tecnólogos, investigadores, entre otros participantes. Es decir, no hay un actor, un héroe detrás de esa tecnología, sino que hay varios actores que pueden ir cambiando y que, además, pueden ir adaptando continuamente la tecnología, sin que esta dependa de alguien en particular o exclusivamente. En este marco, la decisión colectiva acerca de solicitar el CAT del desarrollo tecnológico significó para la experiencia una manera de descentralizar la política convencional de vivienda y reemplazarla por una nueva forma de gestionar la política habitacional desde un municipio local.

C) ALIANZAS INTER-ACTORALES/INTER-SECTORIALES (GESTIÓN DEMOCRÁTICA)

Otro elemento clave de innovación tecnológica en la experiencia aquí compartida lo constituye la articulación interactoral e intersectorial como norma cognitiva y

social de producción de conocimiento. El propósito de dicha estrategia radica en convocar a la resolución de la problemática del hábitat a la mayor cantidad de sectores relevantes que puedan contribuir a la definición de políticas públicas orientadas a generar beneficios distribuidos. En esa línea, para el equipo de investigación los sectores que deben estar presentes son:

1. Sector del Estado: en cuanto guardianes del bien común;
2. Sector productivo: emprendedores en la cadena de valor;
3. Sector cognitivo: mediadores de los saberes diversos.

En la experiencia, la mesa de participación estuvo integrada por los siguientes sectores: representantes del municipio (Instituto de Tierras y Viviendas, Sub Secretaría de Desarrollo Económico), representantes del sector productivo (Productores Forestales, Aserraderos, Cooperativas de Trabajo, Asociaciones de Carpinteros) y representantes del sector cognitivo (Universidades, Centros y Agencias de Investigación); quienes en sucesivas deliberaciones fueron construyendo acuerdos para innovar en los procesos productivos que afectan a los tres sectores, procurando promover el trabajo con autonomía y la co-resolución de problemáticas locales (Figura 7).

Los instrumentos de financiamientos que sostienen este tipo de tecnología provienen del sector de Ciencia y Tecnología, ya que el grupo promotor y mediador está



Figura 8. Alianzas inter-sectoriales / articulación de políticas. Fuente: Imágenes extraídas de PROCODAS (2011; 2017).

conformado por investigadores (sector cognitivo). Cabe aclarar que la propuesta de la Red interactoral ha contado durante los casi diez años de su existencia con el apoyo y aprobación de proyectos de financiamiento de dicho sector, ya que los aspectos clave de esta propuesta cobran relevancia por ser instrumentos de una política científica-tecnológica establecida mediante el Plan Argentina Innovadora 2020. La iniciativa contó con cinco proyectos de investigación financiados por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica. La continuidad de los instrumentos de financiamiento en la experiencia fue clave, ya que permitieron avanzar con los objetivos planteados y engendró en los actores participantes la motivación de seguir formando parte de la Red interactoral.

La premisa metodológica e ideológica de generar un modelo de gestión democrático fue esencial para el proyecto. Las sucesivas reuniones con cada representante de los sectores permitieron que allí circulara una exhaustiva información, una profunda comprensión y una democrática decisión de los aspectos y cuestiones que tienen que ver con el desarrollo de la tecnología (Peyloubet, 2018).

Un aspecto a destacar fue que las distintas reuniones en el municipio con el intendente y funcionarios contaron siempre con la presencia de los productores del desarrollo tecnológico (Asociación de Carpinteros y Cooperativas). En ese sentido, el proyecto siempre buscó el empoderamiento de sectores, muchas veces silenciados a la hora de tomar decisiones. Esta estrategia dio paso, hacia el interior de los grupos o asociaciones, a una gran disponibilidad de información y de propuestas para poder tomar el control sobre su trabajo y advertir problemas, soluciones y nuevas

oportunidades relacionadas con sus modos de trabajo. Se generó así un proceso democrático donde todos se posicionaron como co-partícipes y co-responsables del o los proyectos en curso. Este modo de gestionar la tecnología, que hace referencia a la presencia de todos los actores, sin establecer jerarquías, fomentó la construcción de una red de relaciones externas a nivel nacional como regional, donde las organizaciones, y particularmente, la Asociación de Carpinteros, lograron establecer contactos e información relevante, como así también propuestas de nuevos trabajos. El vínculo y las alianzas generadas en el marco de la Red permitieron un nuevo modo de participación en la resolución de problemáticas socio-productivas, donde (en este caso) el Estado (gobierno municipal) representó los intereses de los grupos o economías más pequeñas, originando oportunidades de trabajo y acceso a recursos, en el marco de decisiones colectivas y democráticas (Figura 8). De esta manera, la Asociación de Carpinteros accedió a y gestionó nuevos beneficios por fuera del proyecto en estudio, entre los que se cuentan:

- 1) Capitalización en infraestructura: a través del Ministerio de Desarrollo Social de la Nación obtuvieron una machimbradora ⁴;
- 2) Venta de componentes de madera para el municipio local (puertas y refugios para guardavidas en madera, para colocar en las orillas del río Paraná);
- 3) Nuevas Estaciones Saludables en madera para la localidad;
- 4) Capacitaciones en el marco de proyectos del Ministerio de Trabajo y Producción;
- 5) Convenio con el Ministerio de Desarrollo Social de la Nación para la producción de componentes estructurales de techo (madera), para una planta de tratamientos de residuos en la localidad de Concordia.

[4] Machimbradora: Máquina utilizada en carpintería para realizar en tablas aserradas molduras o encastres (machimbre).

CONCLUSIONES

La propuesta expuesta aquí viene realizándose con éxito desde el año 2010, y ha sido posible, principalmente -a partir de lo que los propios participantes atribuyen-, a la confianza construida entre los diferentes miembros que conforman la Red socio-productiva. Por un lado, la convicción teórica e ideológica del grupo de investigación es plasmada año tras año en la formulación y presentación de nuevos proyectos ante el Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Nación; institución que aprueba y continúa apoyando este tipo de desarrollos tecnológicos, mediante sus diferentes líneas de financiamiento. Por otro lado, los carpinteros de la Asociación, como el actor productivo principal, continúan apostando en generar nuevos caminos y nuevos procesos que promuevan beneficios distribuidos en su localidad. Y un municipio, que, si bien en los inicios del proyecto estuvo muy presente y luego no tanto, nunca dejó de apalancar y apoyar la propuesta investigativa.

Frente a ese escenario, se pueden destacar, a modo de conclusión, tres aspectos claves de innovación tecnológica que la experiencia en Concordia llevó adelante para el abordaje de problemáticas relacionadas con el hábitat:

-Desarrollos tecnológicos socio-productivos locales: la iniciativa se basa en un abordaje que permite comprender y aprovechar en plenitud las oportunidades que ofrece la trama productiva local, desarrollando propuestas que persiguen potenciar y diversificar nuevas formas y procesos productivos para generar dinámicas económicas re-distributivas. En el caso de la experiencia en estudio, el equipo de investigación advirtió una sub-utilización de los recursos naturales (renovable-madera), como también de las capacidades productivas locales, siendo estas consideradas como nuevas oportunidades emergentes.

-Desarrollos Tecnológicos Colaborativos y Asociativos: la metodología que implementa la propuesta adscribe a un tipo de trabajo colectivo, donde los saberes de los diversos actores son incorporados a los procesos productivos, en una integración que consigue abrir las "cajas negras" del saber consuetudinario de algunos y potenciar el saber técnico y experiencial de otros. La propuesta de la co-construcción constituye uno de los elementos investigativos más relevantes del equipo de CONICET, el cual obliga a concebir a los desarrollos tecnológicos como un patrimonio cognitivo de un conjunto de emprendedores que se organizan en una economía social basada en la distribución de la renta y la inclusión socio-productiva, promoviendo un mercado más solidario. Esa co-construcción se manifiesta fundamentalmente en lo que el equipo de investigación llama *Encuentros Productivos* donde, de manera grupal y en una participación respetuosa, se acuerdan las ideas y decisiones técnicas que darán a luz el producto tecnológico.

-Desarrollos Tecnológicos Inter-sectoriales: el abordaje para la construcción de un hábitat más justo y sostenible se da desde la articulación de diversos actores y sectores que,

desde sus diferentes posiciones e intereses promueven acuerdos surgidos de una exhaustiva información y una democrática decisión. Para la propuesta en estudio, la presencia de actores del Estado (guardianes del bien común), actores productivos (emprendedores en la cadena de valor) y actores cognitivos (mediadores de los saberes diversos) se constituye en un aspecto relevante para la promoción de nuevas políticas públicas en el campo de producción de hábitat.

Así, las normas cognitivas y sociales que gobiernan el proceso de diseño y desarrollo de tecnología en la experiencia se basan en aspectos, tales como: a) desarrollos tecnológicos que impacten lo menos posible en el ambiente (utilización de recurso renovable); b) desarrollos que apalancen economías pequeñas y vulnerables; c) desarrollos que promuevan formas de producción asociativas y cooperativas; d) desarrollos que generen distribución justa de la renta; y, e) desarrollos que co-diseñen un producto de propiedad colectiva.

En consecuencia, pensar los procesos de desarrollo tecnológico desde este enfoque representa una invitación a abordar la problemática del hábitat a partir de una construcción sistémica, ya que la dimensión, social, cultural, económica y ambiental, se encuentra en un mismo nivel de jerarquía y el producto tecnológico constituye una excusa para dinamizar y democratizar procesos tecnológicos. Asimismo, permite aproximarse a la problemática desde una perspectiva política, asumiendo que en la tecnología se concretizan disposiciones de poder, inscriptas en los desarrollos tecnológicos desde las premisas con que fueron diseñados. Este abordaje proporciona además la oportunidad de tomar conciencia sobre la importancia de la forma en que las decisiones y elecciones técnicas influyen en los procesos tecnológicos y en la necesidad de una conciencia crítica acerca de los modos convencionales de hacer tecnología. Esto conduce a asumir la relevancia de instancias reflexivas, capaces de ser llevadas adelante por gestores, técnicos, profesionales, académicos, etc., que den como resultado el desarrollo de propuestas en territorios con miras a aumentar las opciones de proceder a otras operaciones alternativas en el campo del hábitat.

En base a los resultados obtenidos, se puede señalar que cuando se enfrentan problemáticas socio-productivas de una manera conjunta, participativa y desde su génesis, se estaría desarrollando una tecnología de cualidades políticas con normas cognitivas y sociales de producción de conocimiento diferenciadas. La posibilidad de generar un proceso tecnológico donde la problemática sea co-construida, y de manera interactoral, permite la circulación y puesta en común de conocimientos y soluciones locales que son propias de los sectores relevantes de un territorio determinado.

Desde ese punto de vista, la experiencia en Concordia representa una oportunidad para sumergirse en un proceso complejo de deconstrucción para luego reconstruir una

tecnología que permita resolver problemáticas socio-productivas a partir de un abordaje tecnológico socio-productivo, solidario, cooperativo e inter-sectorial. Este trabajo, en definitiva, se constituye en una oportunidad de continuar preguntándose hacia dónde y cómo debiera dirigirse el desarrollo de una tecnología capaz de configurar un hábitat más justo y sustentable.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación viene siendo desarrollada y financiada en el marco de los siguientes proyectos de investigación:

-PICT N° 1737: Innovación para la gestión de Tecnología Social en el campo del hábitat.

(Proyectos de Investigación científica y tecnológica con fondos provenientes del FONCYT (AGENCIA NACIONAL DE PROMOCIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA);

-PFIP 2018: "Fortalecimiento de la producción maderera local a partir de la generación de una línea de desarrollo, producción y montaje de componentes de madera (*Eucalyptus Grandis*) para vivienda y su mobiliario, que consolide a la Asociación de Carpinteros de Concordia como sede de producción, transferencia y capacitación regional". Proyectos Federales de Innovación Productiva con fondos provenientes del COFECYT (CONSEJO FEDERAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albornoz, M. (2013). Innovación, equidad y desarrollo latinoamericano. *Isegoría. Revista de Filosofía Moral y Política*, (48), 111-125.

Dagnino, R. (2008). *Neutralidade da ciencia e determinismo tecnológico. Um debate sobre a tecnociencia*. 1° edición. Brasil, Campinas: Editorial Unicamp.

DETEM – ANPCYT. (2012). *Circuito productivo interactoral a partir de una tecnología social para la producción de vivienda de madera. Caso: Concordia, Provincia de Entre Ríos*.

Feenberg, A. (2006). *Del esencialismo al Constructivismo: la Filosofía de la tecnología en la encrucijada*. Recuperado de <http://www.sfu.ca/~andrewf/translations.html>

Fresoli, M., Smith, A., Thomas, H. y Bortz, G. (2016). De las Tecnologías Apropiadas a las Tecnologías Sociales: algunos dilemas persistentes de los movimientos de innovación de base para la construcción de futuros socialmente justos. En Thomas, H. y Santos, G. (Eds.), *Tecnologías para incluir. Ocho análisis socio-técnicos orientados al diseño estratégico de artefactos y normativas*. Argentina. Quilmes: Editorial Instituto de Estudios Sobre la Ciencia y la Tecnología, pp. 49-93.

Giuliano, G. (2012). Comentarios sobre el texto: Ciencia, Tecnología y Democracia. En: *I Encuentro Internacional Culturas Científicas y Alternativas Tecnológicas (Buenos Aires, 2012)*. Recuperado de <http://es.scribd.com/doc/20694868/Comentarios-de-Gustavo-Giuliano-sobre-el-trabajo-de-Andrew-Feenberg-www-eiccat-com-ar>

Guba, E. y Lincoln, Y. (1994). Paradigmas en competencia en la investigación cualitativa. En Denzin y Lincoln (Eds.), *Handbook of Qualitative Research*. Thousand Oaks, California, Sage.

Herrera, A. (2010). La generación de tecnologías en las zonas rurales. En Dagnino, R. (Ed.), *Tecnología social. Ferramenta para construir outra sociedade*. Campinas. Brasil: Editorial Komedi, pp. 23-51.

Kazez, R. (2009). Los estudios de caso y el problema de la selección de la muestra. Aporte del sistema de matrices de datos. *Subjetividad y Procesos cognitivos*, 13(1), 71-89.

OEI (2013). *Ciencia, Tecnología e Innovación para el desarrollo y la cohesión social*. Madrid, España: Organización de Estados Iberoamericanos.

PAD-ANPCYT. (2017). *Co-diseño de equipamiento para instituciones públicas a partir del recurso maderero local (Eucalyptus Grandis)*. Constitución de Consorcios Tecnoproductivos, público-privados, en el marco de la Economía Social.

Peyloubet, P. (2017). *Animarse a habitar*. Buenos Aires: Editorial Diseño.

Peyloubet, P. (2018). *Convidar Tecnología. Una propuesta a partir de la Co—construcción*. Buenos Aires: Editorial Diseño.

PID 0079-ANPCYT. (2016). *Producción a escala de viviendas de madera, en el marco de un circuito productivo interactoral a partir del uso de una tecnología social. Caso: Concordia, provincia de Entre Ríos*.

PROCODAS – ANPCYT (2011). *Tecnología para la inclusión social en el marco del desarrollo local. Caso: Concordia, provincia de Entre Ríos*.

PROCODAS –ANPCYT. (2017). *Promoción y capacitación en tecnologías constructivas de eucalipto que dinamicen la economía social de la región, a partir del recurso foresto-industrial emergente, para el fortalecimiento del desarrollo productivo, en el marco del consorcio intermunicipal del departamento de Concordia, Entre Ríos*.

Santos, B. (2009). *Una epistemología del Sur: la reinención del conocimiento y la emancipación social*. México: Editorial CLACSO.

Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA). (2014). *Bosques argentinos, actividad forestal y economías regionales*. Recuperado de <http://www.senasa.gov.ar/senasa-comunica/infografias/bosques-argentinos-actividad-forestal-y-economias-regionales>

Thomas, H. y Becerra, L. (2014). Sistemas tecnológicos para el desarrollo inclusivo sustentable. *Revista Voces en el Fénix*, (37), 120-129.

Tula Molina, F. y Giuliano, G. (2015). La teoría crítica de la tecnología: revisión de conceptos. *Revista Redes*, 21(40), 179-214.

Tula Molina, F. y Giuliano, G. (2017). *El riesgo de que todo funcione*. Buenos Aires: Nueva librería.

Valderrama, A. (2004). Teoría y Crítica de la Construcción Social de la Tecnología. *Revista Colombiana de Sociología*, (23), 217-233.

Vasilachis de Gialdino, I. (2006). *Estrategias de investigación cualitativa*. España, Barcelona: Editorial Gedisa.

