

V5
N2

HS



Revista
Hábitat Sustentable

ISSN 0719 - 0700 / Vol. 6 N°. 1/ Junio 2015

V6N1



UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO

REVISTA HÁBITAT SUSTENTABLE

Junio 2016

05 EDITORIAL

Dra. Claudia Muñoz Sanguinetti

06 INCORPORACIÓN DE HUELLA DE CARBONO Y HUELLA ECOLÓGICA EN LAS BASES DE COSTES DE CONSTRUCCIÓN. ESTUDIO DE CASO DE UNA PROYECTO DE URBANIZACIÓN EN ÉCIJA, ESPAÑA

Antonio Freire Guerrero, Madelyn Marrero, Javier Muñoz Martín

18 EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO ORIGINADAS POR EL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EDIFICIOS DE LA PROVINCIA DE SAN JUAN-ARGENTINA

Alción de las Pléyades Alonso Frank, Ernesto Kuchen, Yesica Alamino Naranjo, Bruno Arballo

26 ESTRATÉGIA PARA A INCORPORAÇÃO DE IMPACTES AMBIENTAIS, SOCIAIS E ECONÓMICOS ESPECÍFICOS NUM MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE EDIFÍCIOS DE SAÚDE (HBSA METHOD)

Maria de Fátima Castro, Ricardo Mateus, Luís Bragança

38 POTENCIAL SOLAR ACTIVO EN TECHUMBRES DE VIVIENDAS INMOBILIARIAS.

Esteban Felipe Zalamea León

50 MODELO SIMPLIFICADO PARA EL CÁLCULO DE ILUMINANCIA POR LUZ NATURAL ÚTIL (UDI) EN ESPACIOS INDIVIDUALES PERIMETRALES DE CIELOSCLAROS. CASO DE ESTUDIO: MENDOZA, ARGENTINA.

Juan Manuel Monteoliva, Ayelén Villalba, Andrés Aceña, Andrea Pattini

60 QUALIDADE DO AR INTERNO (QAI) EM UMA ESTAÇÃO CIENTÍFICA NA ANTÁRTICA: IDENTIFICAÇÃO DE FONTES DE POLUIÇÃO E ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

Érica Coelho Pagel, Cristina Engel de Alvarez, Neyval Costa Reis Júnior

72 AHORROS EN LOS CONSUMOS PARA ENFRIAMIENTO DE ESPACIOS INTERIORES MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN SOLAR EN EDIFICIOS RESIDENCIALES EN ALTURA. EL CASO DE LA “CIUDAD-OASIS” DE MENDOZA, ARGENTINA

Julieta Balter, Carolina Ganem, Carlos Discoli

84 PAUTAS DE DISEÑO PARA DISMINUIR LAS TEMPERATURAS URBANAS EN REGIONES CON ALTA PRODUCTIVIDAD SOLAR. PARÁMETROS MORFOLÓGICOS Y MATERIALES.

Noelia Liliana Alchapar, Erica Norma Correa

Editorial

Nos complace presentar un nuevo número de revista Hábitat Sustentable, el cual recoge un repertorio de artículos que, desde una perspectiva latino e iberoamericana, se enfocan en una edificación ambientalmente responsable.

El lanzamiento de esta edición posee una especial connotación, dado que reúne parte de una selección de los mejores trabajos presentados en Euro-ELECS 2015 (Conferencia Latinoamericana y Europea sobre Edificaciones y Comunidades Sostenibles), realizada en Portugal durante el mes de julio del año 2015. Esperamos, por cierto, publicar una segunda selección en el número de diciembre próximo.

Destacamos, además, que este lanzamiento coincide, a la vez, con la organización del más importante encuentro continental de instituciones de formación en arquitectura en la Universidad del Bío-Bío, el Congreso ARQUISUR, cuyo lema es precisamente el *hábitat sustentable*. Esta convergencia revela una significativa progresión en el compromiso de la enseñanza y de la investigación profesional, en los países latinoamericanos, hacia un ambiente construido sostenible. Ello ocurre en un escenario donde se debe lidiar con una intensa actividad docente, con una larga tradición y relación con la industria de la construcción local, que debe responder, a su vez, a las crecientes necesidades de habitación y servicios públicos de las ciudades latinoamericanas; en complejos y diversos contextos tecnológicos, culturales, sociales y políticos. De modo que en estos trabajos –procedentes de Argentina, Brasil, Chile y España–, son, sin duda, destacados los esfuerzos por analizar rigurosamente las específicas condiciones de estas regiones (diferentes tipologías y situaciones climáticas), con el fin de reducir los impactos ambientales y asegurar sus prestaciones, aportando al conocimiento general de la edificación y al desarrollo urbano, en aras de una mejor calidad de vida.

Efectivamente, el rol de las investigaciones universitarias para actualizar el trabajo profesional se expresa en estos trabajos con una relevante claridad. Aunque, ciertamente, se trata de estudios parciales, contribuyen con resultados específicos, metodologías novedosas y más que nada, con una visión exhaustiva y sostenible de la edificación. La convergencia con el llamado al Congreso Arquisur, organizado por la UBB establece, por tanto, una orientación a la formación e investigación universitaria para colaborar en la edificación regional de un quehacer profesional más sostenible.

De esta manera, hacemos una invitación a navegar por este bagaje de conocimiento y valiosas aportaciones, con vista a reflexionar sobre los avances y desafíos para un hábitat sustentable. El equipo editorial agradece, una vez más, el interés y confianza de los autores en nuestra revista, como asimismo la colaboración y compromiso prestado por los respectivos revisores. Muy especialmente agradecemos, por último, el apoyo recibido por el Proyecto CD-INES en Hábitat Sustentable de la Universidad del Bío-Bío, cuyo importante financiamiento operativo ha permitido optimizar el estándar editorial de HS.

En forma personal y como editora, hago públicos mis reconocimientos por el notable trabajo y compromiso del equipo editorial: a Theresa St John en su rol de productora, a Olga Ostria como correctora de estilo y a Ignacio Sáez por su talento en la diagramación de la revista.



INCORPORACIÓN DE HUELLA DE CARBONO Y HUELLA ECOLÓGICA EN LAS BASES DE COSTES DE CONSTRUCCIÓN. ESTUDIO DE CASO DE UN PROYECTO DE URBANIZACIÓN EN ÉCIJA, ESPAÑA.

THE INCORPORATION OF CARBON FOOTPRINT AND ECOLOGICAL FOOTPRINT INTO CONSTRUCTION COST DATABASES: A CASE STUDY OF A DEVELOPMENT PROJECT IN ÉCIJA, SPAIN.

ANTONIO FREIRE GUERRERO
Univerisdad de Sevilla, Departamento de Construcciones
Arquitectónicas II
Sevilla, España
antoniowebmix@hotmail.com

MADELYN MARRERO
Univerisdad de Sevilla, Departamento de Construcciones
Arquitectónicas II
Sevilla, España
madelyn@us.es

JAVIER MUÑOZ MARTÍN
Univerisdad de Sevilla, Departamento de Construcciones
Arquitectónicas II
Sevilla, España
jmunoz@gmail.com

RESUMEN

En el conjunto de factores que se consideran para diseñar, proyectar y tomar decisiones dentro de la construcción, se propone la inclusión de los indicadores “huella ecológica” y “huella de carbono” en las bases de costes de construcción (BCC), ya que constituyen herramientas simples y fáciles de utilizar que permiten integrar el aspecto ambiental en los presupuestos de los proyectos. Con el fin de demostrar dicha posibilidad, se toma como caso particular la BCC de Andalucía, para el cual se calcula un presupuesto ambiental. El modelo propuesto se valida con el análisis de un proyecto de urbanización industrial en Écija (España), proporcionando resultados comparables con otras metodologías de huella en edificación.

Palabras clave

Control de costes, huella ecológica, huella de carbono, urbanización

ABSTRACT

Among the set of factors taken into consideration during the design, planning and decision-making process of construction projects, the present article proposes that the ecological footprint and carbon footprint indicators be included in Construction Cost Databases (CCD), as they are simple, easy-to-use tools that make it possible to incorporate environmental aspects into project budgets. This research analyses the specific case of Andalusia's CCD in order to demonstrate the possibility of incorporating environmental aspects (ecological and carbon footprints) into the construction project budget, thereby creating a new “environmental budget”. The proposed model is validated through the analysis of an industrial development project in Écija, Spain; the results obtained are comparable to those of other footprint methodologies in the construction sector.

Keywords

cost control, ecological footprint, carbon footprint, urbanization

INTRODUCCIÓN.

La construcción, y otros agentes intervinientes de forma directa o indirecta, tiene notables impactos ambientales en cuanto a consumo de recursos naturales y energía o emisión de gases de efecto invernadero, de ahí la necesidad de considerar la dimensión ambiental como clave en un enfoque de construcción sostenible. El proceso de la construcción es responsable de más del 40% de los recursos naturales, más de un 30% del consumo de energía y más de un 30% de las emisiones de gases de efecto invernadero (Cambio Global España, 2010). Además, es también responsable de una parte significativa del consumo de madera y de agua en el mundo.

La razón del impacto tan considerable de la construcción radica en los procesos de edificación, desde la fabricación de materiales, pasando por su construcción y posterior uso, hasta la demolición. Ante la necesidad de implantar mejoras en el aspecto ambiental, es necesario contar con indicadores contrastables y fiables que sean sensibles a los cambios. En esta línea, dos profesores de la Universidad de la Columbia Británica, Wackernagel y Rees, definieron el concepto de "huella ecológica" (HE) como "el área de territorio ecológicamente productivo (cultivos, pastos, bosques o ecosistemas acuático) necesaria para producir los recursos utilizados y para asimilar los residuos producidos, por una población dada, con un nivel de vida específico, de forma indefinida" (1996:.. Mediante esta categoría es posible comparar la huella ambiental provocada por continentes, países, regiones, etc.

Entre los aspectos más relevantes de la HE se haya, en primer lugar, la simplicidad de sus conceptos, que además de ser fáciles de calcular, pueden ser entendidos y adoptados de manera general, con lo cual se facilita su influencia en las decisiones de consumo, legislación y regulación del sector; y, en segundo lugar, la unión de factores de diferentes fuentes en un solo indicador, que permite obtener una visión general de todos los impactos de una actividad o sector productivo. Esta unión hace posible estimar el impacto total de cualquier actividad humana de forma claramente comprensible, y ofrece también la opción de estudiar la HE por categoría (diferentes clasificaciones del territorio), para identificar de este modo sus aspectos más determinantes.

El indicador HE se ha utilizado desde su creación para la determinación de los impactos, en diferentes escalas: para predecir los impactos generados por la humanidad, para el cálculo periódico de la huella de la humanidad en el planeta o para calcular periódicamente la HE de diferentes países, ciudades, barrios, sectores productivos e industrias. Esta metodología, adaptada a las características únicas del sector de la construcción, ha sido elegida, en efecto, por su comprensibilidad, transparencia y capacidad de adaptación. En el área de la edificación, el indicador HE se ha aplicado al estudio del crecimiento de distritos de gran altura en Teherán (Samadpour y Faryadi, 2008), en viviendas de campesinos (Zhao y Mao, 2013), en hoteles (Li y Cheng, 2010) y en la rehabilitación de una casa centenaria (Bin y Parker, 2012); además de haberse

desarrollado una herramienta para la estimación de la huella ecológica y huella de carbono de edificios (Olgyay, 2008). Asimismo, se ha analizado el ciclo de vida (Teng y Wu, 2014) de los edificios (proyecto, construcción, uso y demolición) y su estudio según la HE (energía, recursos, CO₂ y residuos sólidos), aplicándolo a un centro de exposiciones en Wuhan (China). Cabe destacar otros dos estudios que han optado por adaptar el indicador HE a las particularidades del sector de la edificación (Bastianoni *et al.*, 2007; Solís, 2011). Bastianoni calculó la HE de dos edificios italianos, teniendo en cuenta principalmente la energía incorporada en los materiales y en el proceso de construcción (un 5% del total de los materiales). Los resultados de la HE se contabilizan en hectáreas de terreno necesario para la absorción del CO₂, terreno de bosques (para los materiales de madera), superficie necesaria para la producción de los alimentos de los trabajadores y el área ocupada por los edificios.

Por otro lado, Solís, Marrero y Ramírez de Arellano (2013) han desarrollado un modelo de cálculo con algunas hipótesis innovadoras, tales como incluir el consumo de comida y los traslados de los operarios, o el consumo de agua en la obra, el cual no suele aparecer en los estudios de HE, ya que no está incluido en la metodología general del indicador. Con la inclusión de los alimentos, aparecen huellas adicionales asociadas a terrenos de cultivo, pastos y pesca, necesarios para su producción. El mismo modo de cálculo ha sido empleado con éxito para la estimación de la huella de carbono (HC) (Solís, Martínez y Marrero, 2014; Solís *et al.*, 2015) en el sector de la construcción.

Siguiendo estudios previos (Freire y Marrero, 2015a), donde se establecen las características de los diferentes sistemas de clasificación de la información de construcción (SCIC) y bases de costes de la construcción (BCC), se opta por desarrollar, como modelo de base de costes ambiental, la base de costes de construcción de Andalucía (BCCA), a la que serán incorporadas la HE y HC, permitiendo su aplicación en cualquier ámbito de la edificación (urbanización, rehabilitación, nueva construcción, etc.) y cualquier tipología de viviendas (plurifamiliares, unifamiliares aisladas o adosadas) (Figura 1).

METODOLOGÍA.

En la Figura 2 se representa el esquema general de la metodología a desarrollar, con los diferentes conceptos que forman parte de la HE clasificados en varios niveles (fuentes de impacto y huellas), procediendo a la explicación de cada uno de los elementos y las hipótesis adoptadas para su cálculo. El mismo esquema es válido para el cálculo de la HC, a excepción de que en este caso solo se evalúa la huella energética.



Figura 1. Viviendas adosadas en núcleo urbano. (Elaboración del autor, 2016)

COSTES DIRECTOS.

En este apartado se analizan los costes directos, que en los presupuestos tradicionales de construcción corresponden a los costes unitarios de maquinarias, mano de obra y materiales.

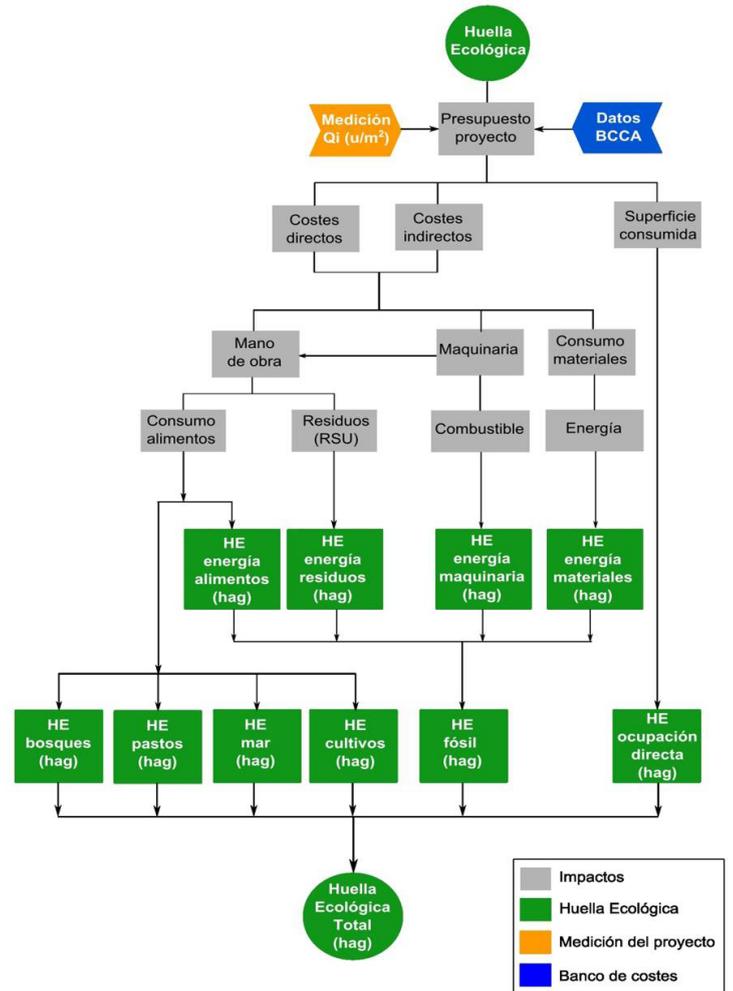


Figura 2. Metodología para el cálculo de la HE. (Elaboración del autor, 2016)

MAQUINARIA.

A partir de la metodología descrita por Freire y Marrero (2015b), adaptada para este caso, se analizan aquí las huellas provocadas por la utilización de maquinaria, concretamente por su consumo de energía (tanto consumo de combustible como energía eléctrica), vinculándola con la potencia de su motor. Cabe aclarar, que en este procedimiento se distingue la huella producida por el propio empleo de la maquinaria de la generada por el trabajador que la opera.

HE DE ALIMENTACIÓN EN ESPAÑA 2015						
Tipo Alimento	Cropland	Grazing Land	Forest Land	Fishing Grounds	Carbon Footprint	Total
	Cultivos	Pastos	Bosques	Mar	Energía	
HE (hag/persona y año)	0,57	0,13	0,01	0,33	0,10	1,15
Porcentaje	49,74%	11,06%	1,05%	29,09%	9,06%	100,00%
días/año	0,001564	0,000348	0,000033	0,000915	0,000285	0,003145
% almuerzo	60%	0,000939	0,000209	0,000020	0,000549	0,001887
horas	8,00	0,000117	0,000026	0,000002	0,000069	0,000236
hag/hora trabajo y almuerzo	0,00012	0,00003	0,00000	0,00007	0,00002	0,00024

Tabla 1. Datos para cálculo del coeficiente HEm. (Grunewald et al., 2015).

MANO DE OBRA.

En este aspecto, se analizan los impactos generados por los trabajadores: consumo de alimentos y la generación de residuos sólidos urbanos (RSU).

HUELLAS PROVOCADAS POR ALIMENTOS.

En la metodología descrita, las huellas producidas por la comida de los trabajadores se imputan a la huella de la construcción del edificio debido a que esta actividad se lleva a cabo en el lugar de trabajo, según plantea el modelo desarrollado por Doménech, donde las comidas de negocios se asignan a la HE corporativa. Para ello, es necesario obtener el número total de horas de mano de obra trabajadas en el proyecto de construcción. Las huellas se calculan usando la siguiente ecuación (Solís, 2011):

$$HE_{comida} = HE_m \times h_{totales} \quad (1)$$

Donde:

HE_{comida} : HE producida por el consumo de alimentos medida en hag/año.

HE_m : HE de cada comida servida expresada en hag/hora de trabajador.

$h_{totales}$: total de horas trabajadas por todos los empleados.

Por lo tanto, es necesario obtener el coeficiente HE_m del menú diario de cada trabajador, que genera cuatro tipos de territorios productivos: pastos, tierras de cultivo, mar productivo y bosques. Cada categoría de alimentos generará dos tipos de HE: la producida por el consumo del propio alimento (las carnes generarán HE de pastos, los pescados generarán HE de mar productivo, los cereales generarán HE de tierras de cultivo, etc.) y la que produce la manipulación y procesamiento de dicho alimento para ser ingerido, que será incluida en la HE fósil. Además, se tiene en cuenta la composición de un "menú tipo" en función del consumo de cada alimento con la productividad natural y el factor de equivalencia de cada territorio productivo (para huella de mar, pasto y cultivo), tal y como se muestran en la Tabla 1 (Grunewald et al., 2015).

HE DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU).

En la generación de residuos, se sigue un camino parecido al de la alimentación, ya que se utiliza un coeficiente que indica la generación media de RSU por trabajador (EUROSTAT, 2015) para obtener las toneladas totales de residuos producidos, frente al cálculo por naturaleza de los distintos RSU, obtenido de otros modelos ya publicados (González et al., 2015). A esta cifra, se le aplica las emisiones de CO₂ por tonelada de residuo, la capacidad de absorción de emisiones que posee el territorio (IDAE, 2011) y el factor de equivalencia correspondiente al territorio productivo de bosques, como se muestra en la siguiente expresión:

$$HE_{RSU} = (H_{TRAB} \times R_{RSU} \times E_{RSU} \times 0,72) / A_F \times FE_B \quad (2)$$

Donde:

H_{TRAB} : horas trabajadas (h)

R_{RSU} : cantidad de RSU producidos por hora de trabajo (toneladas/h x pers.)

E_{RSU} : factor de emisión por residuo (toneladas CO₂/t RSU)

0,72: reducción de emisiones a absorber (28%)

A_F : productividad del área de absorción de carbono, o factor de absorción (tCO₂/ha)

FE_B : factor de equivalencia de los bosques (hag/ha)

MATERIALES.

Para calcular la huella producida por los materiales, se tiene en cuenta la energía que se necesita durante el ciclo de vida de la cuna a la puerta. También se realiza un análisis del transporte del material, estableciendo una hipótesis de distancia recorrida por los medios de transporte y siguiendo, luego, el procedimiento indicado para las maquinarias, con el fin de convertir este dato en HE. Este factor introduce como principales novedades el análisis e inclusión del transporte de los materiales de construcción desde la fábrica hasta la obra, y la obtención de diversas "familias ambientales" procedentes de bases de datos de análisis de ciclo de vida de materiales (ACV), lo que permite obtener las emisiones de cada material producidas durante su fabricación.

UD	MATERIAL	EMISIONES (kgCO ₂ /kg)	UD	MATERIAL	EMISIONES (kgCO ₂ /kg)
 AISLANTES 			 MORTEROS 		
kg	Elastómero aislante de tubos	4,060	kg	Cal apagada suelta	0,739
kg	Espuma de urea formaldehído in situ	2,897	kg	Cal apagada empaquetada	0,749
kg	Espuma de vidrio	1,500	kg	Cal hidráulica	0,805
kg	Fibra de celulosa (incluido soplado) (d=50kg/m ³)	0,260	kg	Cal viva en cascotes suelta	0,960
kg	Fibra de vidrio	2,408	kg	Cal viva suelta	0,962
kg	Lámina de poliestireno expandido	3,355	kg	Cal viva empaquetada	0,971
kg	Lámina de urea formaldehído rígida	2,776	kg	Cemento (genérico)	0,758
kg	Lana de roca	1,368	kg	Cemento con escoria de alto horno	0,442
kg	Lana de roca, empaquetada	1,262	kg	Cemento Portland con escoria de alto horno	0,701
kg	Lana de vidrio en rollo	1,387	kg	Cemento Portland calcáreo	0,715
kg	Poliestireno extruido (XPS)	2,901	kg	Cemento Portland II/A-L 42,5 R	0,818
kg	Poliuretano (espuma)	3,498	kg	Cemento Portland 52,5 R	0,828
 ÁRIDOS Y PIEDRAS 			kg	Estuco	0,069
kg	Arcilla	0,003	kg	Mortero de cal	0,596
kg	Arcilla expandida	0,349	kg	Mortero de cemento	0,191
kg	Arena	0,002	kg	Mortero ligero	0,471
kg	Arena de Sílice	0,021	kg	Pasta adhesiva	1,023
kg	Grava genérica	0,003	kg	Pasta de arcilla	0,018
kg	Grava en bolos	0,002	kg	Suelo continuo de cemento	0,171
kg	Grava de machaqueo	0,004	kg	Tabla de fibra de yeso	0,279
kg	Bloque de arenisca	0,060	kg	Tabla de yeso laminado	0,335
kg	Perlita	0,001	kg	Yeso (mineral)	0,002
kg	Perlita expandida	0,952	 PINTURAS 		
kg	Piedra caliza	0,002	kg	Aglutinante acrílico	1,279
kg	Piedra caliza machacada para moler	0,002	kg	Barniz acrílico	1,738

Tabla 2. Familias medioambientales de las materias primas. Parte 1. (Elaboración del autor, 2016)

En el caso de los materiales, las emisiones producidas durante la fabricación de las materias primas en productos de construcción, serán contabilizadas en hectáreas, a diferencia de otras metodologías en las que se calculaba la energía y se le aplicaba un factor de emisiones medio (González, Marrero y Solís, 2015).

El primer paso a realizar para poder obtener la HE de cada elemento consiste en efectuar una conversión de la unidad de medida de origen de cada precio básico (metros, metros cuadrados, metros cúbicos, toneladas, millares) a metros cúbicos, de modo que se pueda emplear la densidad establecida en los documentos de apoyo utilizados (Catálogo de Soluciones Constructivas del Código Técnico de la Edificación (CSC) y el Documento Básico de Seguridad Estructural del Código Técnico de la Edificación. Acciones en la Edificación (DB-SE AE)), para obtener el peso de cada elemento (Freire y Marrero, 2015a). Una vez obtenido dicho

peso, se acudirá a las bases de datos de análisis de ciclo de vida (ACV), las cuales definen las emisiones que contiene cada kilogramo de material, con lo que se obtiene la HC.

Entre las diferentes bases de datos de ACV, se opta por Ecoinvent, implementada en Symapro y desarrollada por el Swiss Center for Life Cycle Inventories, debido a su transparencia en el desarrollo de procesos (informes, diagramas de flujo, metodología), consistencia, referencias y el destacado hecho de que fusiona información de varias bases de datos de la industria de la construcción (Martínez, 2016). De este repositorio, se han obtenido "familias medioambientales" que serán las encargadas de asignar a cada precio básico sus correspondientes emisiones en función de su similitud. En las Tablas 2 y 3 se exponen los materiales básicos y sus procesos o transformaciones (formación de tubos, empaquetado de áridos, formación de piezas de metal).

UD	MATERIAL	EMISIONES (kgCO ₂ /kg)	UD	MATERIAL	EMISIONES (kgCO ₂ /kg)
ÁRIDOS Y PIEDRAS			PINTURAS		
kg	Piedra caliza machacada lavada	0,002	kg	Betún	0,382
kg	Piedra caliza molida suelta	0,012	kg	Lámina de betún modificado, unión en caliente	0,486
kg	Piedra caliza molida empaquetada	0,022	kg	Lámina de betún modificado, unión en frío	0,353
kg	Piedra natural, placa para suelo	0,342	kg	Pintura (disolvente: agua)	2,212
kg	Piedra natural, placa cortada	0,251	kg	Pintura (disolvente: otro)	2,212
kg	Piedra natural, placa pulida	0,415	kg	Sellante bituminoso o slurry asfáltico	0,970
CERÁMICOS			PLÁSTICOS		
kg	Baldosa cerámica	0,766	kg	ABS (plástico)	3,121
kg	Cerámica sanitarios (porcelana)	2,258	kg	Carpintería de ventana de PVC (esp 10cm y d=1.390kg/m ³)	1,693
kg	Fibrocemento (chapa ondulada)	0,623	kg	Etileno-acetato de vinilo (caucho-vinilo)	1,815
kg	Fibrocemento (baldosa)	0,783	kg	Fenólico (resina)	3,702
kg	Fibrocemento (tejas)	0,691	kg	Goma sintética	2,394
kg	Ladrillo o bloque cerámico	0,212	kg	Látex	2,422
kg	Ladrillo refractario básico empaquetado	2,233	kg	Metacrilato	5,566
kg	Ladrillo refractario de arcilla empaquetado	1,123	kg	Poliamida reforzada con fibra de vidrio	7,629
kg	Ladrillo refractario alto en óxido alum., empaquetado	0,851	kg	Poliéster (resina)	4,268
HORMIGONES			kg	Poliéster reforzado con fibra de vidrio	3,378
kg	Baldosa de hormigón	0,225	kg	Poliestireno GPPS (general)	2,754
kg	Bloque de hormigón	0,121	kg	Poliestireno expandible (para EPS)	2,594
kg	Bloque de hormigón aireado en autoclave	0,403	kg	Poliestireno de alto impacto (HIPS)	2,794
kg	Teja de hormigón	0,206	kg	Poliétileno de alta densidad (HDPE)	1,573
kg	Hormigón (d=2380kg/m ³)	0,110	kg	Poliétileno de baja densidad (LDPE)	1,694
kg	Hormigón de cimentación (d=2385kg/m ³)	0,067	kg	Poliétileno de baja densidad linear (LLDPE)	1,495
kg	Hormigón pobre (limpieza) (d=2190kg/m ³)	0,056	kg	Poliétileno tereftalato (PET)	2,421
kg	Hormigón de alta resistencia (d=2440kg/m ³)	0,133	kg	Polipropileno	1,679
kg	Hormigón de alta resistencia contra heladas (d=2440kg/m ³)	0,118	kg	Poliuretano (espuma flexible, camas y muebles)	4,028
MADERAS			kg	PVC	1,835
kg	Carpintería de ventana madera (esp 10 cm y d=5KN/m ³)	1,026	kg	Resina epoxi	5,940
kg	Corcho (baldosa o lámina)	-0,739	kg	Sellante de goma natural (caucho)	1,690
kg	Lana de madera	-1,600	kg	Sellante de polisulfido	1,258
kg	Madera blanda (resto) (=600kg/m ³)	-1,227	kg	Tetrafluoroetileno (sustitutivo vidrios exteriores)	9,805
kg	Mad. dura (ébano, boj, encina) (d=1.100kg/m ³)	-0,998	TEXTILES		
kg	Papel	-0,675	kg	Algodón (fibra desmotada)	-0,041
kg	Papel reciclado	-0,648	kg	Algodón tejido	19,512
kg	Puerta interior madera ciega (esp 10cm y d=5 KN/m ³)	-0,802	kg	Algodón en hilo	8,909

Tabla 2. Familias medioambientales de las materias primas. Parte 2. (Elaboración del autor, 2016)

UD	MATERIAL	EMISIONES (kgCO ₂ /kg)	UD	MATERIAL	EMISIONES (kgCO ₂ /kg)
MADERAS			TEXTILES		
kg	Puerta interior madera-vidrio (esp 10 cm y d= 5Kn/m ³)	-0,323	kg	Lana	32,600
kg	Puerta exterior madera-vidrio (esp 10cm y d= 5kN/m ³)	1,077	VARIOS		
kg	Tablero de lana de madera aglomerada con cemento (d=5 kN/m ³)	-0,097	kg	Agua potable en usuario final	0,000
METALES			kg	Emulsión asfáltica	0,193
kg	Acero de baja aleación (genérico)	1,623	kg	Explosivo	1,384
kg	Acero cromado (inoxidable)	4,906	kg	Tensioactivos (prod. limpieza)	1,872
kg	Acero reforzado	1,344	kg	Plastificante	4,405
kg	Aluminio mixto (genérico)	6,698	VIDRIOS		
kg	Aluminio primario	9,533	kg	Vidrio plano no recubierto	0,520
kg	Bronce	2,682	kg	Vidrio plano recubierto	0,628
kg	Cobre (genérico)	1,853			
kg	Cobre primario	1,785			
kg	Hierro de fundición	1,343			
kg	Latón	2,364			
kg	Pellets de hierro, de la fabricación	0,079			
kg	Plomo	0,998			
kg	Zinc	3,165			

Tabla 2. Familias medioambientales de las materias primas. Parte 3. (Elaboración del autor, 2016)

UD	MATERIAL	EMISIONES (kgCO ₂ /kg)	UD	MATERIAL	EMISIONES (kgCO ₂ /kg)
ÁRIDOS Y PIEDRAS			MORTEROS		
kg	Arcilla en saco	0,008	kg	Cal hidráulica en saco	0,814
kg	Arcilla expandida	0,349	kg	Cal viva en cascotes en saco	0,960
kg	Arcilla expandida en saco	0,354	kg	Cemento (genérico) en saco	0,009
kg	Arena	0,002	kg	Cemento cola	0,969
kg	Grava de machaqueo	0,004	kg	Cemento con escoria de alto horno en saco	0,758
kg	Grava en bolos	0,002	kg	Cemento Portland con escoria de alto horno en saco	0,005
kg	Caliza machacada (albero, marmolina, polvo mármol)	0,002	kg	Cemento Portland calcáreo en saco	0,763
kg	Arena de Sílice	0,021	kg	Cemento Portland 42,5 R en saco	0,758
kg	Arena de sílice empaquetada	0,026	kg	Cemento Portland 52,5 R en saco	1,279
CERÁMICOS			kg	Mortero de cemento	1,520
kg	Ladrillo o bloque cerámico	0,212	kg	Tabla de yeso laminado y fibra de vidrio	0,442

Tabla 3. Familias medioambientales de los materiales con transformaciones. Parte 1. (Elaboración del autor, 2016)

UD	MATERIAL	EMISIONES (kgCO ₂ /kg)	UD	MATERIAL	EMISIONES (kgCO ₂ /kg)
HORMIGONES			MORTEROS		
kg	Bloque de hormigón aireado en autoclave	0,403	kg	Tabla de yeso laminado y poliestireno expandido	95,550
kg	Hormigón (d=2380kg/m3)	0,110	kg	Tabla de celulosa de cemento	0,446
kg	Bloque de hormigón	0,121	PLASTICOS		
MADERAS			kg	Película de PVC	71,200
m3	Madera blanda tratada	-730,309	kg	Tubo de polietileno	0,402
m3	Madera dura tratada	-1091,709	kg	Tubo de polipropileno	2,237
kg	Papel reciclado	-0,648	kg	Tubo de PVC	1,573
m3	Tablero de lana de madera aglomerada con cemento	-49,399	kg	Pieza PVC	0,312
METALES			kg	Bloque de poliestireno	116,700
kg	Cable de aluminio	8,760	kg	Pieza polietileno (enchufe, interruptor...)	1,679
kg	Cable de cobre	1,853	kg	Pieza poliéster	0,312
m2	Carpintería de aluminio anodizado	2,062	kg	Pieza ABS	1,991
m2	Carpintería de aluminio lacado	3,915	kg	Pieza Polipropileno	1,835
kg	Lámina Aluminio	397,058	kg	Pieza/Plancha Poliuretano	0,312
kg	Lámina de acero	3,841	kg	Tubería polietileno	2,147
kg	Perfil de acero laminado	400,899	kg	Tubería etileno-acetato vinilo (caucho-vinilo)	1,835
kg	Pieza de acero cromado/galvanizado	397,058	kg	Plancha poliestireno	1,179
kg	Pieza de aluminio	8,188	kg	Película de polietileno	2,096
kg	Tubería de cobre	2,202			
kg	Tubería de acero	1,623			
kg	Pieza latón	0,349			
kg	Pieza bronce	1,972			

Tabla 3. Familias medioambientales de los materiales con transformaciones. Parte 2. (Elaboración del autor, 2016)

COSTES INDIRECTOS.

Siguiendo el enfoque de Freire y Marrero (2015a) para el cálculo de la energía incorporada en los costes indirectos (elementos que no pueden imputarse a una actividad única dentro de la obra), se efectúa a continuación el análisis de la HE. Para este efecto, se debe realizar un estudio de los costes indirectos atribuibles a cualquier proyecto de edificación, tomando como referencia la BCCA y recogiendo todos los elementos que conforman este grupo. Cada concepto se traduce en datos útiles para calcular la HE (horas anuales efectivas de trabajadores, consumos de combustible por la maquinaria, consumo de agua y electricidad en las casetas de obra, etc.), empleando la metodología descrita en las secciones previas, las diferentes conversiones y aplicación de coeficientes para obtener la HE de la mano de obra, maquinaria, consumo eléctrico y de agua.

SUPERFICIE CONSUMIDA.

Para la estimación de la HE de la superficie consumida se tiene en cuenta el suelo que se ocupa directamente, ya que será biológicamente improductivo desde el momento en que sea urbanizado. En el presente análisis dicha superficie responderá a la que se considerará en el proyecto.

Por tanto, la HE de superficie ocupada, vendrá dada por la transformación sufrida por el suelo a analizar. Dicha huella se obtendrá calculando la superficie a través de la memoria de cada proyecto analizado. No se aplica ningún factor de conversión, ya que se trata de unidades de superficie (ha), pero sí se aplica el factor de equivalencia correspondiente al territorio donde se actúa; tal y como se muestra en la siguiente expresión (Solís, 2011):

$$HE_{sup} = S \times FE_x \quad (3)$$

Donde:

S: superficie de ocupación directa en hectáreas (ha).

FE: factor de equivalencia de la superficie construida (hag/ha). En el indicador se definen dos posibles tipos de territorio: bosques o cultivos.

Huella Total							19.927,08 hag
Impacto	Fósil	Pastos	Bosques	Mar	Cultivos	Superficie construida	
Maquinaria	12.937,81	11,89	7,35	31,27	52,72		
Mano de obra	8,75	5,02	0,47	13,20	52,72		
Costes indirectos	211,12	2,22	0,21	5,84	9,98	0,21	
Materiales	6.576,30						
Total	19.733,99	19,13	8,03	50,30	115,41	0,21	

Tabla 4. Resultados de caso práctico. (Elaboración del autor, 2016)

MATERIAL	EMISIONES (tCO₂)	HE (hag)
Hormigón	7.527,876	3.669,578
PVC	1.988,227	969,192
Áridos	1.147,006	559,126
Asfalto	1.055,005	514,278
Agua	789,635	385,636
Cerámicos	677,910	330,457
Cemento	567,397	276,587
Hierro	438,220	213,617
Acero	168,235	82,011
Bronce	8,000	3,900
Polietileno	7,021	3,423
Pintura	2,869	1,398
Cobre	1,555	0,758
Plastificante	1,189	0,579
Fibra de vidrio	0,022	0,011
Madera	-3,808	-1,856

Tabla 5. Resultados por materiales. (Elaboración del autor, 2016)

CASO PRÁCTICO.

A continuación, se muestra la aplicación de la metodología descrita a un caso práctico, eligiendo para tal fin el Proyecto de Urbanización del Sector Industrial SUB-O-03 UE-1 de Écija (Sevilla, España) (Figura 3), del cual se han obtenido todos los datos técnicos y económicos necesarios.

En este proyecto de urbanización se incluyen los procesos requeridos para llevar a cabo la ejecución de los trabajos de movimiento de tierras, pavimentaciones e instalaciones necesarios para la urbanización de la zona, con el fin de crear un polígono industrial (Figura 4). El presupuesto está constituido por 181 precios básicos, entre los que se encuentran materiales, maquinaria y mano de obra, del que resulta un importe total de 11.557.028,87 €, en un ámbito de actuación de 620.256 m².

Tras la aplicación de toda la metodología a los datos del proyecto, se obtienen los resultados que se resumen en la Tabla 4 y en la Figura 5. En la Tabla 5 se muestran los materiales con mayor repercusión en cuanto a impacto ambiental.



Figura 3. Parcela a urbanizar. (Elaboración del autor, 2016)



Figura 4. Polígono industrial. (Elaboración del autor, 2016)

Huella ecológica

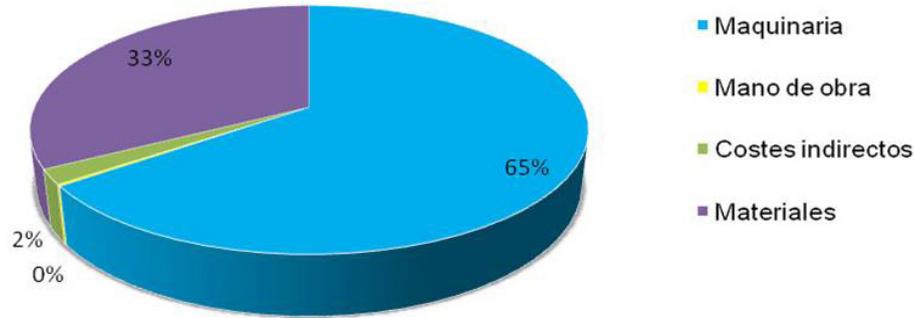


Figura 5. HE, según fuente de impactos. (Elaboración del autor, 2016)

Tras aplicar la metodología al caso práctico, se obtiene una HE total de 19.927,08 hag del proyecto, que al calcularse considerando la superficie de actuación del proyecto deviene en 321,14 hag/ha; huella similar a la de la construcción de viviendas evaluada por otros autores (Solís, 2011; González, Marrero y Solís, 2015). Aunque, a diferencia de ellos, aquí no resultan significativas las huellas relacionadas con la mano de obra y, en concreto, con su alimentación. Se puede apreciar en la Figura 5 que la mayor parte de las huellas viene provocada por el empleo de maquinaria (66%) y uso de materiales (33%), correspondiendo primordialmente a HC. La alta repercusión de la maquinaria, en este sentido, se debe a que se trata de un proyecto de urbanización del terreno, que implica la utilización de equipo pesado y una mayor presencia aquellos que se necesitan para la realización de los elementos comunes de las urbanizaciones (asfalto y áridos) y las diferentes instalaciones (pvc y hormigón).

CONCLUSIONES.

El presente trabajo de investigación demuestra la viabilidad de la incorporación de un indicador ambiental, como es la huella ecológica, dentro de la estructura de costes y presupuestación de los proyectos de obra (tanto de construcción como de urbanización), siguiendo la línea de presupuesto ambiental dentro del mundo de la construcción.

De este modo, se facilita la opción de tomar decisiones en fase de proyecto, que tendrán como resultado la mejora de la "calificación ambiental" de la actividad.

También se comprueba que es posible la incorporación de los indicadores HC y HE en el sistema de clasificación sistemática de los bancos de costes de construcción, manteniendo su misma organización. Simplemente, se añaden otros elementos diferenciadores de cada componente del presupuesto (precio básico) que pueda servir para su futura elección a la hora de incorporarlo en el desarrollo de un proyecto, no siempre basada en el aspecto económico.

Queda patente, por último, la cada vez más necesaria incorporación de aspectos ambientales en los trámites y quehaceres diarios de la administración pública, y la fácil adaptación que permite la metodología descrita en este artículo del modelo desarrollado en el sistema de clasificación de la información de construcción (SCIC), que emplea la administración en Andalucía, España. En efecto, el modelo constituye un elemento diferenciador para tomar una serie de decisiones sobre, por ejemplo, criterios de adjudicación de proyectos, aspectos fiscales (rebajas en impuestos de inmuebles, exención de tasas urbanísticas de proyectos), entre otros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- BASTIANONI, Simone; GALLI, Alessandro; PULSELLI, Ricardo María y NICCOLUCCI, Valentina. Environmental and economic evaluation of natural capital appropriation through building construction: practical case study in the Italian context. *Ambio*, 2007, vol. 36, n° 7, pp. 559-565.
- BIN, Guoshu y PARKER, Paul. Measuring buildings for sustainability: Comparing the initial and retrofit ecological footprint of a century home – The REEP House. *Applied Energy*, 2012, n° 93, pp. 24-32.
- CAMBIO GLOBAL ESPAÑA 2020/50. Sector edificación. *Programa Cambio Global España 2020/50 del Centro Complutense de Estudios e Información Medioambiental de la Fundación General de la Universidad Complutense de Madrid*, Madrid, 2010.
- EUROSTAT. *Municipal waste generated by country in selected years* (kg per capita), 2015.
- FREIRE, Antonio y MARRERO, Madelyn. Evaluación a través del presupuesto de la energía incorporada al proyecto de edificación. *Hábitat Sustentable*, 2015a, vol. 5, n° 1, pp. 54-63.
- FREIRE, Antonio y MARRERO, Madelyn. *Ecological Footprint in Indirect Costs of Construction*. Ponencia presentada en II Congreso Internacional y IV Nacional de Construcción Sostenible y Soluciones Ecoeficientes, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla, 2015b.
- GONZÁLEZ, Patricia; SOLÍS, Jaime; LLÁCER, Rafael y MARRERO, Madelyn. La construcción de edificios residenciales en España en el período 2007-2010 y su impacto según el indicador Huella Ecológica. *Informes de la Construcción*, 2015, vol. 67, n°539.
- GONZÁLEZ, Patricia; MARRERO, Madelyn y SOLÍS, Jaime. The ecological footprint of dwelling construction in Spain. *Ecological Indicators*, 2015, n° 52, pp. 75-84.
- GRUNEWALD, Nicole; GALLI, Alessandro; KATSUNORI, Iha; HALLE, Martine y GRESSOT, Michel. The Ecological Footprint of Mediterranean Diets. International Centre for Advanced Mediterranean Agronomic Studies CIHEAM, 2015, Wach Letter n° 32.
- INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDEA). *Factores de emisión de CO2*, Madrid 2011.
- LI, Bing y CHENG, Dong-Jing. Hotel ecological footprint model: Its construction and application. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, n° 29, pp. 1463-1468.
- MARTÍNEZ, Alejandro, SOLÍS GUZMÁN, Jaime, MARRERO Madelyn. LCA databases focused on construction materials: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 58, pp. 565-573.
- OLGYAY, Víctor. Greenfoot: A tool for estimating the carbon and ecological footprint of buildings. American Solar Energy Society - SOLAR 2008, Including Proc. of 37th ASES Annual Conf., 33rd National Passive Solar Conf., 3rd Renewable Energy Policy and Marketing Conf.: Catch the Clean Energy Wave 8, 2008, pp. 5058-5062.
- DOMÉNECH QUESADA Juan Luis: Huella Ecológica y Desarrollo sostenible. AENOR. Madrid, España. 2007.
- SAMADPOUR P, FARYADI Sh. Determination of ecological footprints of dense and high-rise districts, case study of Elahie neighbourhood, Tehran. *Journal of Environmental Studies*, 2008, vol. 34, n° 45, pp. 63-72.
- SOLÍS, Jaime. *Evaluación de la huella ecológica del sector edificación (uso residencial) en la comunidad andaluza*. Tesis de Doctorado, Universidad de Sevilla, 2011.
- SOLÍS, Jaime; MARRERO, Madelyn y RAMÍREZ DE ARELLANO, Antonio. Methodology for determining the ecological footprint of the construction of residential buildings in Andalusia (Spain). *Ecological Indicators*, 2013, n° 25, pp.239-249.
- SOLÍS, Jaime; MARTÍNEZ, Alejandro y MARRERO, Madelyn. Methodology for determining the carbon footprint of the construction of residential buildings. *Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors, Volume 1*. Springer, 2014, pp. 49-83.
- SOLÍS, Jaime; GONZÁLEZ, Patricia; MARTÍNEZ, Alejandro; MARRERO, Madelyn. The Carbon Footprint of Dwelling Construction in Spain. *The Carbon Footprint Handbook*. CRC Press - Taylor & Francis Group, 2015, pp. 261-283.
- TENG, Jiaying y WU, Xianguo. Eco-footprint-based life-cycle eco-efficiency assessment of building projects. *Ecological Indicators*, 2014, n° 39, pp. 160-168.
- WACKERNAGEL, Mathis y REES, William. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Canadá: New Society Publishers, 1996.
- ZHAO, Xueyan y MAO, Xiaowen. Comparison environmental impact of the peasant household in han, zang and hui nationality region: Case of zhangye, Gannan and Linxia in Gansu Province. *Shengtai Xuebao/Acta Ecologica Sinica*, 2013, vol. 33, n° 17, pp. 5397-5406.



EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO ORIGINADAS POR EL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EDIFICIOS DE LA PROVINCIA DE SAN JUAN-ARGENTINA

CARBON DIOXIDE EMISSIONS CAUSED BY ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION IN BUILDINGS IN THE PROVINCE OF SAN JUAN- ARGENTINA

ALCIÓN DE LAS PLÉYADES ALONSO FRANK
Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat - Facultad de
Arquitectura, Urbanismo y Diseño -
Universidad Nacional de San Juan
San Juan, Argentina
afrank@faud.unsj.edu.ar

YESICA ALAMINO NARANJO
Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat - Facultad de
Arquitectura, Urbanismo y Diseño -
Universidad Nacional de San Juan
San Juan, Argentina
yalaminonaranjo@conicet.gov.ar

ERNESTO KUCHEN
Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat - Facultad de
Arquitectura, Urbanismo y Diseño -
Universidad Nacional de San Juan
San Juan, Argentina
ernestokuchen@faud.unsj.edu.ar

BRUNO ARBALLO
Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat - Facultad de
Arquitectura, Urbanismo y Diseño -
Universidad Nacional de San Juan
San Juan, Argentina
arballobruno@conicet.gov.ar

RESUMEN

Sin un uso consciente de la energía que consume, la población en crecimiento produce efectos irreversibles en el ambiente. La generación de energía con fuentes no renovables es responsable de impactos ambientales negativos por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). La concentración de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera es un indicador GEI. Este gas tiene la capacidad de almacenar la energía de radiación de onda larga (calor) en su molécula y evitar el equilibrio térmico natural entre la tierra y el espacio extraterrestre. El objetivo de este trabajo es encontrar un valor representativo de las emisiones de CO_2 producidas por el consumo de energía eléctrica del sector edilicio (residencial, comercial y oficial) de la Provincia de San Juan (Argentina), y desarrollar una etiqueta gráfica para indicar el grado de emisiones. Para la evaluación, se consideran referencias internacionales en los valores de emisiones de CO_2 , datos de consumo eléctrico y datos de población censada. Se calculan, así, emisiones de CO_2 per cápita, en función de los valores de consumo local y se procede a categorizar por equivalentes numéricos que se expresan en la etiqueta. Los valores de emisión de $\text{CO}_{2\text{-equivalente}}$ obtenidos resultan notablemente bajos en relación a la media mundial.

Palabras clave

consumo eléctrico, $\text{CO}_{2\text{-equivalente}}$, etiqueta

ABSTRACT

Population growth without awareness of energy consumption produces irreversible effects on the environment. Power generation from non-renewable sources is responsible for negative environmental impacts due to the emission of greenhouse gases (GHGs). The concentration of carbon dioxide (CO_2) in the atmosphere is a GHG indicator. The CO_2 molecule has the ability to store longwave radiation (heat) and avoid the natural heat balance between the Earth and outer space. The aim of this paper is to find a representative value of the CO_2 emissions produced by electric energy consumption in the building sector (residential, commercial and public) in the Province of San Juan, Argentina and develop a graphic label to indicate the level of emissions. The analysis takes into consideration international CO_2 emissions reference values, energy consumption data and population census data. CO_2 emissions per capita are calculated based on local electricity consumption values, categorized by numerical equivalent, and displayed on a graphic label. The $\text{CO}_{2\text{-equivalent}}$ emissions values obtained are notably low compared to the world average.

Keywords

electricity consumption, $\text{CO}_{2\text{-equivalent}}$, graphic label

INTRODUCCIÓN.

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) producidas por el sector energético, a causa de la actividad humana (Aliano, Rodríguez y Sagardoy, 2012), son la mayor causa del cambio climático (Duarte, 2006). Y, concretamente, las concentraciones de CO₂ liberadas en la atmósfera representan más del 75% del total de emisiones mundiales de GEI, expresadas en CO₂-equivalente (CO₂-e) (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007). Éstos se obtienen al ponderar cada uno de los gases con su respectivo potencial de calentamiento, establecido por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) en el año 1996.

Conocer las emisiones de CO₂ permite, a nivel de Estado, proyectar rutas de acción a efecto de disminuir el impacto ambiental asociado (Carbon Decisions, 2010). Las emisiones dependen del origen de la energía. Por ello es que hoy, a nivel internacional, se procura incrementar la producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables (Cámara Sánchez, Flores García y Fuentes Saguar, 2011).

El año 2009, en Argentina, se constituye el Comité Gubernamental de Cambio Climático (CC) y se elabora una estrategia nacional en CC para diversificar la matriz energética. El país presenta diversidad de fuentes de generación de energía eléctrica, aunque muy pocas de origen renovable (ver Figura 1). Entre las mismas, se destacan las de origen hidroeléctrica (5%), leña y bagazo (2%), aceite (2%) eólica y solar (1%) (Secretaría de Energía de la Nación, 2016).

En este ámbito, la provincia de San Juan se distingue por ser una región modelo, en la medida en que el 75,5% de la energía producida allí proviene de fuentes renovables (ver Figura 1). En total, se generan 1500 GWh/a, que representa el 84% del total de energía que se consume (EPSE en Alamino Naranjo et al, 2015). El resto se debe comprar al mercado eléctrico nacional e internacional (aprox. 300 GWh/a). En este trabajo se considera sólo aquellas emisiones producidas por la generación de energía eléctrica, por ser la de consumo predominante en la provincia.

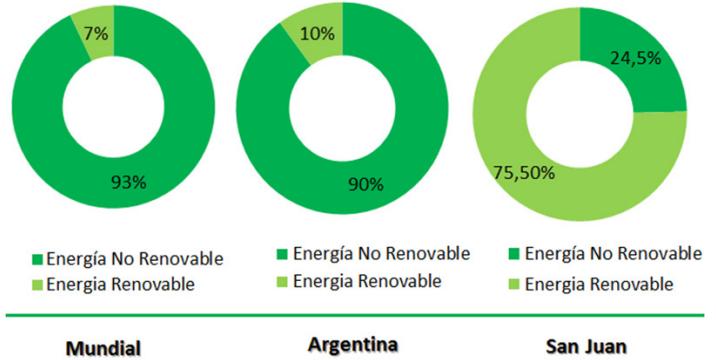


Figura 1: Generación de energía eléctrica por recurso a nivel mundial, nacional y provincial.
 Fuentes: BP Statistical of world Energy - Secretaría de Energía de la Nación - Energía Provincial Sociedad del Estado (EPSE).

METODOLOGÍA.

Para la cuantificación de las emisiones de CO₂, producto del uso de energía eléctrica en el sector edificación, se construye una base de datos a partir de: los valores de población discriminada por Departamento (Comuna) de la Provincia de San Juan, obtenidos del último Censo Nacional (INDEC, 2010); la composición de la matriz energética provincial (EPSE- Ente Provincial Regulador Eléctrico (EPRE), 2014); y el consumo eléctrico por sectores, proporcionado por la Secretaría de Energía de la Nación (SEN, 2016) y de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. Dicha base de datos permite calcular un equivalente numérico de referencia (siguiendo a Ferraro, Gareis y Zulaica, 2013), calificar los rangos de emisión de CO₂ y comparar valores locales en el ámbito nacional e internacional.

Para la cualificación de las emisiones de CO₂, se desarrolla una barra gráfica o etiqueta, a fin de comunicar el mejor/ peor nivel de emisiones provocadas por el consumo de energía eléctrica.

BASE DE DATOS.

POBLACIÓN LOCAL.

Con el propósito de conocer la relación consumo/habitante, se releva la población existente por Departamento (ver Tabla 1) (INDEC, 2010). La Provincia de San Juan se divide en 19 Departamentos. La Tabla 1 muestra que la mayor cantidad de habitantes se concentra en el área netamente urbana, particularmente en cuatro Departamentos: Capital (16%), Chimbab (12,8%), Rawson (16,8%) y Rivadavia (12,1%), los cuales reúnen al 57,7% de la población. La Figura 2 muestra la distribución Departamental. En relación al área de ocupación de cada Departamento, se advierte que los más densos son Capital, Chimbab y Santa Lucía, con más de 1000 habitantes/hectárea

Ref.	Departamento	Población	[%]	Ref.	Departamento	Población	[%]
1	25 de Mayo	17.119	2,5	11	Pocito	53.162	7,8
2	9 de Julio	9.307	1,4	12	Rawson	114.368	16,8
3	Albardón	23.888	3,5	13	Rivadavia	82.641	12,1
4	Angaco	8.125	1,2	14	San Martín	11.115	1,6
5	Calingasta	8.588	1,3	15	Santa Lucía	48.087	7,1
6	Capital	109.123	16,0	16	Sarmiento	22.131	3,2
7	Caucete	38.343	5,6	17	Ullum	4.886	0,7
8	Chimbas	87.258	12,8	18	Valle Fértil	7.222	1,1
9	Iglesia	9.099	1,3	19	Zonda	4.863	0,7
10	Jáchal	21.730	3,2		Total San Juan	681.055	

Tabla 1. Población San Juan por Departamento. Fuente: INDEC - <http://www.sig.indec.gov.ar/censo2010/>

Energía	Aprovechamientos	Pot. Inst. [MW]	Estado	Generación [GWh/a]	Potencial [GWh/a]	Escenario Futuro
Hidro	a) Quebrada de Ullum	47	1980	235,0	-	235,0
	b) La Olla	42	1988	172,0	-	172,0
	c) Punta Negra	65	2015	300,0	-	300,0
	d) Los Caracoles	130	2009	730,0	-	730,0
	e) El Tambolar	75	ejecución	-	345,0	345,0
	f) El Horcajo	75	proyecto	-	345,0	345,0
Solar	g) Solar Cañada Honda I	7	2011	13,5	-	13,5
	Solar Cañada Honda II	13	proyecto	-	25,1	25,1
	h) Solar San Juan	1,2	2014	11,0	-	11,0
	i) Parque Solar Ullum	20	ejecución	-	38,0	38,0
	j) Solar Las Lomitas	2,5	ejecución	-	4,8	4,8
Geo	k) Los Despoblados	5	proyecto	-	9,5	9,5

Tabla 2. Generación de energía eléctrica renovable. Fuente: EPSE.

MATRIZ ENERGÉTICA.

ENERGÍA DE ORIGEN RENOVABLE.

La topografía de montañas y valles en torno a la cordillera de los Andes, permite hacer uso del potencial hidroeléctrico. En la actualidad, la provincia consume 1.871.222 MWh/a (EPSE, 2015). Este flujo energético es abastecido, principalmente, a través de cuatro complejos hidroeléctricos localizados sobre el río San Juan. En la Tabla 2 se destacan las represas de Quebrada de Ullum y La Olla, Punta Negra y Caracoles, con un total de 284 MW de potencia instalada. De ponerse en funcionamiento las centrales El Tambolar y El Horcajo, se ampliaría a 434 MW, es decir, un incremento del potencial de generación del 48% en hidroeléctrica.

El plan de desarrollo del complejo hidroeléctrico del río San Juan contempla en su finalización a seis hitos energéticos. La Figura 3 expone el esquema de desarrollo con localizaciones y valores de potencia instalada/a instalar sobre el río San Juan. Se persigue, una vez concluido el

proyecto, alcanzar autoabastecimiento energético para 630.000 habitantes, distribuidos en 15 Departamentos del sureste provincial (Ministerio de Planificación - Presidencia de la Nación, 2015).

La alta diafanidad del cielo y elevada radiación solar de la provincia estudiada, la posicionan como una de las más importantes para la generación solar del país. En este contexto es que, en complemento a la generación de energía eléctrica, la provincia produce energía a partir de la solar fotovoltaica desde 2011. Actualmente cuenta con dos centrales en producción: Cañada Honda (Departamento: Sarmiento) y Solar San Juan I (Departamento Ullum), con una potencia instalada de 8,2MW y dos instalaciones en ejecución (ver Tabla 2) que ampliarían el potencial de generación solar en un 73%. La Solar San Juan I es una planta piloto por estar provista de paneles solares monocristalinos (mayor grado de pureza). Se prevé el desarrollo de un Polo Industrial para la fabricación de paneles fotovoltaicos en la provincia (Ley N° 1136-J, Decreto N° 719-MlyT, 2012).

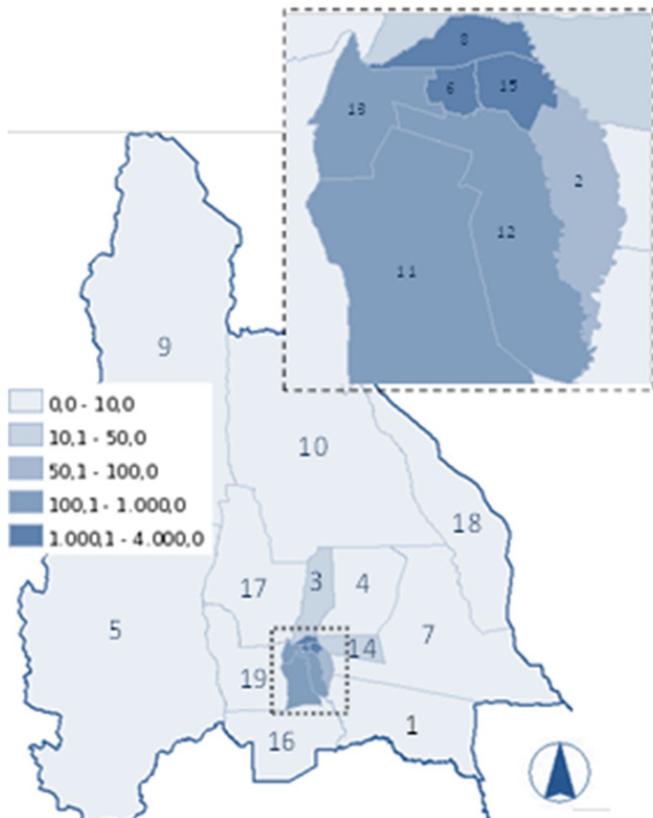


Figura 2. Densidad de población de la Provincia de San Juan, por departamento. Año 2010. Fuente: INDEC, 2010.
 Figura 3. Complejo hidroeléctrico. Plan de Energía Solar. Fuente: Ministerio de Planificación. Presidencia de la Nación.

En cuanto a otros tipos de energía renovable, cabe destacar que también en 2011 se inicia el estudio de factibilidad de uso de energía geotérmica de alta entalpía para producción de energía eléctrica, en el paraje Los Despoblados, Departamento Iglesia, a 370 kilómetros de la ciudad de San Juan. Se pretende instalar inicialmente 5MW de potencia. De considerar el escenario futuro que se muestra en Tabla 2, se alcanzaría la generación de más de 2,2GWh/a solo con energías renovables, cubriendo el 100% de la demanda energética actual de la Provincia.

ENERGÍA DE ORIGEN NO RENOVABLE.

En San Juan, la generación de energía eléctrica que aporta la central térmica Sarmiento es del 24,5%, con una potencia instalada de 30MW y una capacidad de generación de 372 GWh/a. El objetivo de la conversión a energías renovables, para cubrir la demanda energética provincial, contempla igualmente prescindir de esta central a futuro.

EVALUACIÓN DE RESULTADOS.

CONSUMO ENERGÍA ELÉCTRICA POR DEPARTAMENTO.

Los datos suministrados por la SEN (2015) sirven para observar la distribución de diferentes sectores de consumo (ver Figura 4). Del total de los 1.871.222 MWh/a que consume en promedio la provincia, el mayor de esos consumos lo representa el sector residencial (44%), seguido del industrial (36%). La esfera edilicia reúne, por su parte, los sectores residencial, comercial y oficial, sumando un total de un 56% del consumo total. Así, la Figura 5 muestra el consumo edilicio discriminado por Departamento. Los mayores consumos se presentan en el Departamento Capital, seguido por Rawson, Rivadavia, Chimbass y Santa Lucía, los que son proporcionales a su densidad poblacional.

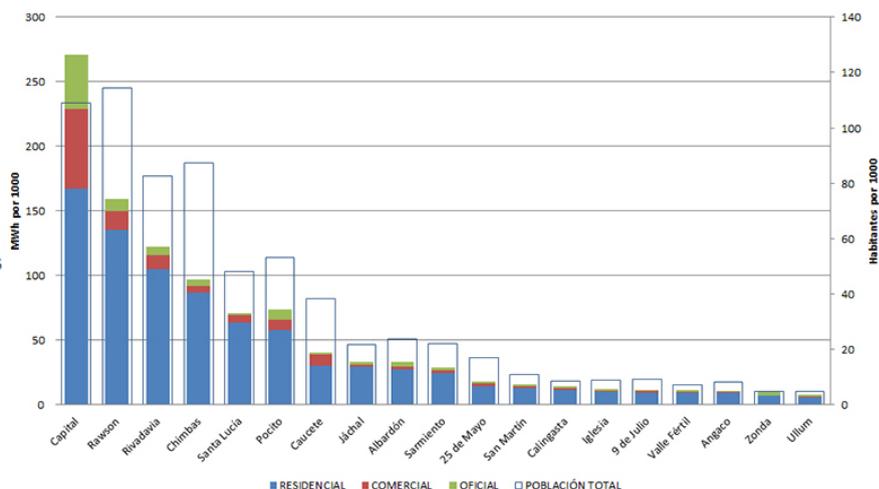
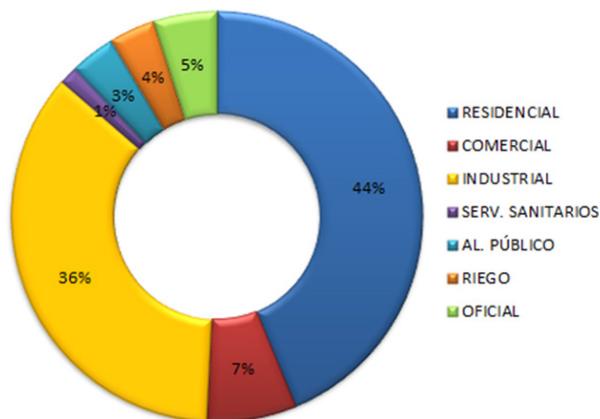


Figura 4. Consumo de energía eléctrica - San Juan. Fuente: Secretaría de Energía de la Nación (SEN).

Figura 5. Relación consumo de energía eléctrica por sector edilicio – Habitantes por Departamento -San Juan. Fuente: Secretaría de Energía de la Nación (SEN).

CONSUMO PER CÁPITA.

En base a datos de población y consumo por Departamento se determina el consumo energético eléctrico *per cápita*, que en promedio es de 1479,35 kWh por año. La Figura 5 muestra la relación entre consumo del sector edilicio y población local de cada Departamento. Se observa que el Departamento Capital es el de mayor valor puesto que posee un consumo promedio de 2482,11 kWh/Persona, por contar con un elevado consumo oficial y comercial.

EMISIONES DE CO₂.

Una vez determinados los consumos eléctricos para cada Departamento, se estiman las emisiones indirectas asociadas a la utilización de este recurso -por sector y por Departamento- a fin de obtener un factor de emisión local. El cálculo se realiza en base a las emisiones de CO₂-e generadas por el sistema eléctrico durante el año 2010 y considerando las características propias de la matriz energética argentina para ese año.

Como referencia, el factor de emisión provisto por la SEN y la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación es de 0,38 tCO₂/MWh. El valor "0,38" está en relación a la potencia instalada en renovables en Argentina (ver Figura 1), que apenas alcanzó el 10% en 2010. Al considerar que en San Juan el 75,5% de generación proviene de renovables, el factor de conversión para las emisiones es de 0,10 tCO₂/MWh. La Figura 6 expone las toneladas de dióxido de carbono equivalentes (tCO₂-e) emitidas por el sector edilicio en la provincia de San Juan, en un año.

En la Figura 6 se observa que las mayores emisiones liberadas a la atmósfera, a causa del consumo de energía eléctrica, las genera el sector residencial. La Tabla 3 muestra las emisiones de CO₂-e *per cápita*.

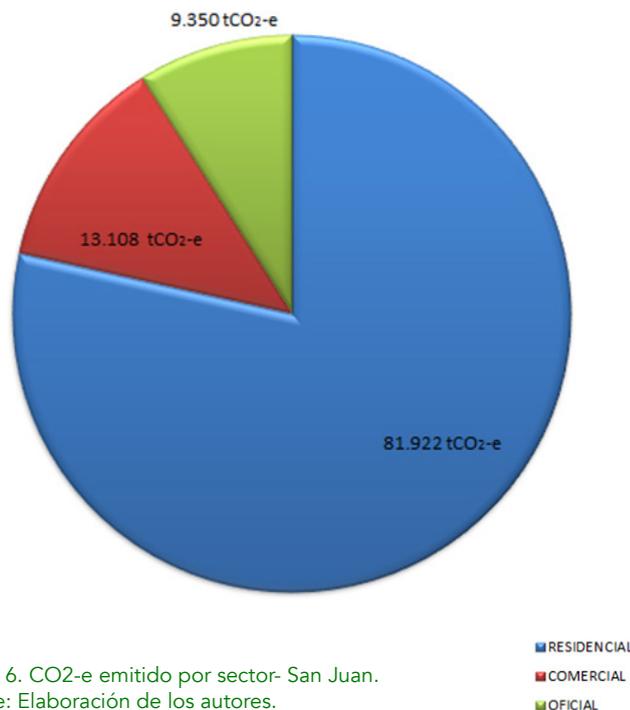


Figura 6. CO₂-e emitido por sector- San Juan. Fuente: Elaboración de los autores.

Ref.	Consumo Edificio [MWh/a]	tCO ₂ Per Cápita	Ref.	Consumo Edificio [MWh/a]	tCO ₂ Per Cápita	Ref.	Consumo Edificio [MWh/a]	tCO ₂ Per Cápita
1	18.157	0,106	8	96.787	0,111	15	70.809	0,147
2	11.420	0,123	9	12.173	0,134	16	29.061	0,131
3	33.198	0,139	10	33.572	0,154	17	7.873	0,161
4	10.959	0,135	11	73.682	0,139	18	11.341	0,157
5	14.661	0,171	12	159.384	0,139	19	10.664	0,219
6	270.855	0,248	13	122.716	0,148			
7	40.812	0,106	14	15.684	0,141			
						PROMEDIO		0,147

Tabla 3. Emisiones de CO₂ per cápita por departamento considerando el coeficiente 0,10 tCO₂/MWh. Fuente: Elaboración de los autores.

Muy inferior a la media	Inferior a la media	Media	Superior a la media	Muy superior a la media
0,08-0,46	0,47-0,86	0,86-1,25	1,25-1,64	1,64-2,03

Tabla 4. Rangos de desvío estándar mundial. Fuente: Ferraro, Gareis y Zulaica (2013).

La Tabla 3 indica que el valor de emisiones promedio de la ciudad de San Juan es de 0,147 tCO₂/Persona por año. Para la comparación y posicionamiento de San Juan en el panorama internacional se toma la clasificación de Ferraro, Gareis y Zulaica (2013), que establece el nivel de emisiones de CO₂-e *per cápita* por medio de cinco categorías, diferenciadas por desvío estándar. La Tabla 4 expone la clasificación en términos de: emisiones muy inferiores a la media del conjunto, emisiones inferiores a la media, la media misma, emisiones superiores a la media y emisiones muy superiores a la media. Los valores encontrados en torno a los rangos definidos en Tabla 4, conducen al desarrollo de una etiqueta de valoración.

Los resultados obtenidos del nivel de emisión de tCO₂-e/ Cápita, se clasifican por dispersión por Departamento. La Figura 8 muestra el desempeño del Departamento Capital, que alcanza las 0,248 de tCO₂-e/Cápita y de la provincia en general, 0,153 tCO₂-e/Cápita, lo cual significa un excelente valor de emisión ya que se ubica muy por debajo de la media respecto al valor de referencia. La obtención de un indicador de emisiones de CO₂-e/Cápita propio, permite realizar una evaluación sobre el impacto ambiental del uso de la energía a nivel local. La provincia de San Juan se posiciona, de esta manera, como un bajo emisor de GEI.

ETIQUETA DE VALORACIÓN DE EMISIONES DE CO₂.

Para comunicar los valores encontrados, se desarrolla una etiqueta gráfica de valoración del nivel de emisión de CO₂-e. Mediante esta, se pretende dar información general sobre el mejor/peor escenario, para el futuro del ambiente. Para ello, se toman de referencia las barras gráficas empleadas en los sistemas de etiquetado de eficiencia energética, puesto que demuestran ser una herramienta beneficiosa dentro del conjunto de acciones que comprenden los *Programas de uso racional de la energía* (Berset Tanides y Grünhut, 2004).

Se diseña una barra de colores que comienza con el verde (que se traduce en un bajo nivel de emisión de CO₂) y finaliza en el rojo (alto nivel de emisión), pasando por el amarillo (medio nivel de emisión). Ello posibilita una rápida aprehensión a quien interpreta la afección ambiental del uso de la energía. Una flecha que cruza la barra gráfica indica el valor propio (ver Figura 7).

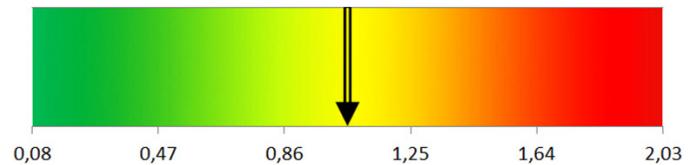


Figura 7. Etiqueta de calificación de las emisiones de CO₂-e, producto del consumo de energía eléctrica. Ejemplo: Nivel de emisión "medio". Fuente: Elaboración de los autores.

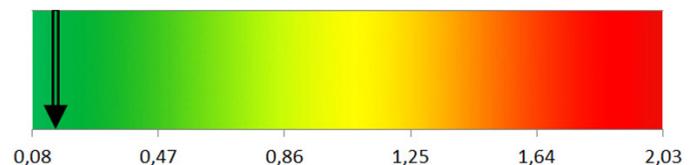
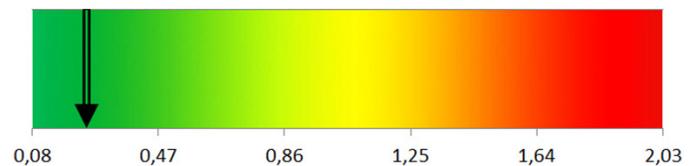


Figura 8. Etiqueta de calificación de las emisiones de CO₂-e, producto del consumo de energía eléctrica generado por el Departamento Capital y por la provincia de San Juan. Fuente: Elaboración de los autores.

CONCLUSIONES.

En 2015, el sector edilicio (residencial, comercial y oficial) de la provincia de San Juan (Argentina) consumió el 56% de energía eléctrica, distribuida principalmente en el área central, en directa correlación con la mayor densidad poblacional. El consumo promedio del Departamento Capital (mayor población) duplica el valor de la media provincial de 1479,35 kWh/Persona por año, dando un claro indicio sobre dónde deben implementarse estrategias de mitigación de emisiones GEI para edificios.

El aprovechamiento del potencial orográfico y topográfico en esta zona se encuentra en pleno auge de desarrollo y constituye el mayor avance en materia de reducción de emisiones equivalentes. A través de la ubicación estratégica de diques para la generación hidroeléctrica y la instalación de plantas solares fotovoltaicas, se conduce en los últimos años a la obtención de energía eléctrica de origen renovable en un alto porcentaje (> 75%).

El factor de emisión promedio de la provincia calculado en este trabajo es de 0,10 tCO₂/MWh; que en relación a la media nacional de GEI de referencia (0,38 tCO₂/MWh) constituye un valor notoriamente bajo. El valor de emisiones promedio por persona es de 0,147 tCO₂/por año. La cualificación de este indicador sobre la etiqueta gráfica desarrollada logra sintetizar los equivalentes numéricos obtenidos, y servir a público en general, usuarios de edificios públicos y agentes del Estado, para tener una rápida aprehensión sobre la situación ambiental local. Se pretende, finamente, que dicha etiqueta pueda ser adaptada a diferentes matrices energéticas, con el fin de obtener un panorama de comparaciones y referencias de los casos de estudio.

AGRADECIMIENTOS:

Se agradece al MINCyT (Ministerio de Ciencia y la Tecnología de la Nación Argentina), al CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Argentina) y a la FAUD-UNSJ (Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño - Universidad Nacional de San Juan), por el fomento a investigadores vinculados a este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ALAMINO NARANJO, Yesica; KUCHEN, Ernesto; GIL ROSTOL, María Celeste y ALONSO FRANK, Alción. Monitoreo de funcionamiento y estrategias de eficiencia energética para el edificio público de Obras Sanitarias Sociedad del Estado, San Juan, Argentina. *Hábitat Sustentable*, 2015, vol. 5, n° 1, pp. 14-23,

ALIANO, María Sol, RODRÍGUEZ, Camila y SAGARDOY, Ignacio. *Fortalecimiento de capacidades para contribuir con un desarrollo de bajo carbono y resiliente al cambio climático*. UNDP – Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. Buenos Aires-San Carlos de Bariloche, 2012.

BERSET, Alberto, TANIDES, Carlos, y GRÜNHUT, Enrique. *Etiquetado en eficiencia energética en motores eléctricos industriales y ahorro de energía*, 2004.

CÁMARA SÁNCHEZ, Ángeles, FLORES GARCÍA, Mónica y FUENTES SAGUAR, Patricia. Análisis económico y medioambiental del sector eléctrico en España. *Estudios de Economía Aplicada*, 2011, vol. 29, n°2, pp. 493 – 514.

CARBON DECISIONS. Carbon footprinting: An introduction for organizations [en línea], 2010. [Consultado 8 febrero 2015]. Disponible en: http://www.carbondecisions.ie/resources/footprint_for_organisations.pdf

DUARTE, Carlos María (coord.). *Cambio Global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. Madrid: CSIC, 2006.

EMPRESA DE SERVICIO DE SUMINISTRO DE LA ELECTRICIDAD EN SAN JUAN (EPSE). *Generación de energía eléctrica por recursos* [en línea], 2015. [Consultado 12 febrero 2016]. Disponible en: <http://www.energiasanjuan.com.ar/>

ENTE PROVINCIAL REGULADOR ELÉCTRICO (EPRE). *Consumo energético anual* [en línea], 2014. [Consultado 20 enero 2016]. Disponible en: <http://www.epresj.gov.ar>

FERRARO, Rosana, GAREIS, María Cecilia y ZULAICA, Laura. Aportes para la estimación de la huella de carbono en los grandes asentamientos urbanos de Argentina. *Cuadernos de Geografía. Revista Colombiana de Geografía*, 2013, vol. 22, n° 2, pp. 87-106

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS Y CENSOS (INDEC). *Censo nacional de población, hogares y viviendas: Resultados preliminares* [en línea], 2010. [Consultado 12 marzo 2016]. Disponible en: <http://www.censo2010.indec.gov.ar/>

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra: IPCC, 2007.

LEY N° 1136-J, Decreto N° 719-MlyT. *Convenio de desarrollo de la Energía Solar Fotovoltaica en la Provincia de San Juan, a través del proyecto tecnológico denominado Polo de Desarrollo Productivo Solar San Juan*, 2012.

MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN - PRESIDENCIA DE LA NACIÓN [en línea]. [Consultado 3 diciembre 2015]. Disponible en: <http://www.energiasanjuan.com.ar>.

SECRETARÍA DE ENERGÍA DE LA NACIÓN (SEN) [en línea]. [Consultado 23 enero 2016]. Disponible en <http://www.energia.gov.ar>



ESTRATÉGIA PARA A INCORPORAÇÃO DE IMPACTES AMBIENTAIS, SOCIAIS E ECONÓMICOS ESPECÍFICOS NUM MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE EDIFÍCIOS DE SAÚDE (HBSA METHOD)

A STRATEGY FOR THE INCORPORATION OF SPECIFIC
ENVIRONMENTAL, SOCIAL AND ECONOMIC IMPACTS INTO A
HEALTHCARE BUILDING SUSTAINABILITY ASSESSMENT (HBSA)
METHOD

MARIA DE FÁTIMA CASTRO
Universidade do Minho
Guimarães, Portugal
info@mfcastro.com

LUÍS BRAGANÇA
Universidade do Minho
Guimarães, Portugal
braganca@civil.uminho.pt

RICARDO MATEUS
Universidade do Minho
Guimarães, Portugal
ricardomateus@civil.uminho.pt

RESUMO

O projeto de um ambiente hospitalar requer uma série de preocupações com a satisfação e bem-estar da equipa de trabalho, pacientes e administradores, ao mesmo tempo que possui uma forte responsabilidade social e impacto na cidade. Atualmente, verifica-se que a maioria deste tipo de edifícios não é concebida ou utilizada de forma sustentável, apesar de já existirem algumas ferramentas que têm vindo a ser desenvolvidas com o objetivo de serem utilizadas no suporte de decisões que permitam otimizar a sustentabilidade dos mesmos. Tendo por base este contexto, o presente artigo tem como objetivos discutir as barreiras existentes na disseminação de práticas sustentáveis nos edifícios de saúde e apresentar uma proposta de estrutura para uma metodologia que, dando resposta a algumas das barreiras identificadas, facilite a incorporação de princípios de sustentabilidade durante as diferentes fases do ciclo de vida de um edifício hospitalar. A estrutura apresentada é orientada para o contexto português e encontra-se baseada no trabalho desenvolvido até então pelas organizações ISO e CEN e noutras metodologias internacionais de avaliação da sustentabilidade já disponíveis no mercado.

Palabras clave

métodos de avaliação, método HBSA, edifícios de saúde, hospitais, sustentabilidade

ABSTRACT

The design of a hospital environment involves many concerns related to the satisfaction and well-being of the medical personnel, patients, and administrators, and at the same time requires strong social responsibility and has a high impact on a city. Currently, it seems that the majority of this type of building is not designed or used in a sustainable way, although some tools have already been developed to support decision-making to optimize building sustainability. Based on this context, the aim of this article is to discuss the barriers to the dissemination of sustainable practices in healthcare buildings, and to propose the structure of a methodology that facilitates the incorporation of sustainability principles during the different life-cycle stages of a hospital building while overcoming some of the identified barriers. The structure presented is oriented to the Portuguese context and is based on the work done to date by the ISO and CEN organizations and other international sustainability assessment schemes already available on the market.

Keywords

assessment methods, HBSA method, healthcare buildings, hospitals, sustainability

Artículo
Recibido 02-04-2016
Aceptado 08-06-2016

INTRODUÇÃO.

ENQUADRAMENTO.

As problemáticas e condicionantes associadas aos edifícios de saúde, variam de continente para continente e até mesmo de país para país. Por exemplo, no contexto Europeu sabe-se que, aproximadamente, 10% do PIB de cada país é utilizado em edifícios orientados para os cuidados médicos e, de acordo com os dados de 2008, estes edifícios acabam por contribuir com, pelo menos, 5% das emissões totais de CO₂ dos países da União Europeia (ASHE, 2002; Vaquero, 2013). Por sua vez, de acordo com *U.S: Energy Information Administration*, durante o ano de 2007 nos E.U.A, o setor foi responsável por 5,5% do total da energia consumida pelo setor comercial, tendo-se constatado um aumento em relação aos 4,3%, verificados em 2003 (ASHE, 2002; Pentland, 2012). Em comparação com outros sectores, o sector da saúde apresenta uma evolução muito dinâmica, pautada pelo aparecimento de novos equipamentos e técnicas de diagnóstico e tratamento de doenças, pelo que o seu impacto nas três dimensões do desenvolvimento sustentável tem vindo a aumentar. Desta forma, é cada vez mais relevante a existência e aplicação de sistemas de avaliação da sustentabilidade no contexto do sector da saúde.

O projeto, construção e utilização sustentáveis de um edifício, baseiam-se no equilíbrio entre: as questões ambientais (relacionadas com o impacto ambiental); as características sociais (relacionadas com o conforto dos utilizadores e com outras questões sociais); e os aspetos económicos (associados ao custo do ciclo de vida). Assim, o projeto sustentável de um edifício, analisado como um todo, procura a melhor compatibilidade possível entre o ambiente construído e o natural, não comprometendo os requisitos funcionais e respetivos custos associados para os quais os edifícios são projetados.

Este objetivo é a base das principais metodologias de avaliação da sustentabilidade existentes, assim como dos documentos orientadores que têm vindo a ser desenvolvidos com a finalidade de apoiar tanto as equipas de projeto como as de gestão dos edifícios. Neste contexto, têm surgido várias questões: será que estas metodologias consideram as especificidades dos edifícios de saúde? Incorporarão elas, verdadeiramente, os impactes específicos deste tipo de edifícios nas três dimensões do Desenvolvimento Sustentável? Quais são as principais preocupações consideradas na conceção dos reconhecidos casos de estudo? As respostas a estas questões serão apresentadas e discutidas ao longo deste artigo.

As mais reconhecidas iniciativas de desempenho ambiental que cedo se fizeram notar, focaram-se especialmente na preocupação com a redução do consumo de energia. Assim, diferentes instituições e iniciativas governamentais desenvolveram ferramentas e diretrizes orientadas para este problema.

Nos anos 80 e 90 do século XX, algumas destas iniciativas começaram a incorporar preocupações sustentáveis, no que diz respeito à indústria de construção, e em 1993 o UIA/AIA Word Congress for Architects concluiu que era um desafio prioritário para os profissionais de arquitetura porem em prática os princípios da sustentabilidade nos seus processos de projeto (Guenther e Vittori, 2008).

No ano 2000 muitas das iniciativas passaram a incorporar práticas sustentáveis de projeto como a base e fundamento do pensamento do processo arquitetónico e projetual. Em 2005 o American Institute of Architects (AIA), estabeleceu a posição mais firme relativamente às responsabilidades dos profissionais de arquitetura, defendendo que estes deveriam alterar as ações dos processos de projeto e trabalharem juntamente com os clientes para que se conseguisse alterar o atual paradigma no que respeita à falta de ligação entre o processo de projeto e o de utilização de um edifício (Hamilton, 2006).

O projeto sustentável requer uma verdadeira revolução na maneira de pensar o projeto de um edifício, por isso torna-se fundamental que esta transformação, a qual atravessa todas as fases do ciclo de vida de um edifício, seja refletida na fase inicial do projeto de arquitetura, essencialmente na fase de organização e conceção espacial.

Se o projeto de arquitetura deve conter as necessidades específicas dos pacientes e utilizadores de um edifício hospitalar, as preocupações ambientais e ainda gerar sinergias entre todos os intervenientes no processo de construção de um edifício desta tipologia, então estes princípios deverão ser considerados nas ferramentas de avaliação da sustentabilidade dos edifícios de saúde. Isto torna-se essencial para apoiar os profissionais que desenvolvem estes projetos, a fim de os apoiar desde a fase inicial de pensamento do projeto de arquitetura e também para reconhecer os esforços que foram desenvolvidos no sentido de construção de um edifício mais sustentável.

Michael Lerner (2000) lançou a seguinte questão: "A questão é se os profissionais de saúde estão a começar a reconhecer as consequências ambientais das nossas ações e têm vontade de colocar esta casa em ordem?" (Roberts e Guenther, 2006: 82). Esta não é uma pergunta trivial, mas sim a base de todas as outras questões que possam ser levantadas em torno desta mesma preocupação. Com base neste princípio, a Figura 1 ilustra a relação entre a saúde humana, o tratamento médico e a poluição ambiental, aspetos que afetam diretamente a missão da indústria de cuidados de saúde.

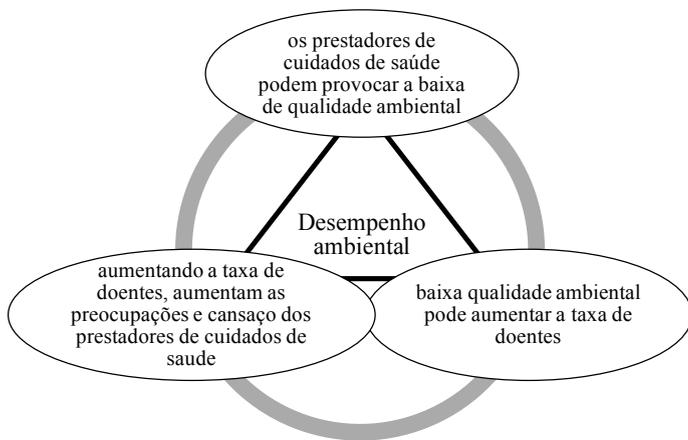


Figura 1. Relação existente entre poluição ambiental e cuidados de saúde (Roberts e Guenther, 2006:83).

BARREIRAS E BENEFÍCIOS ASSOCIADOS ÀS PRÁTICAS DE SUSTENTABILIDADE NOS EDIFÍCIOS DE SAÚDE.

O processo de definição dos benefícios, tanto para a organização, como para a comunidade, resultantes da introdução das práticas sustentáveis de projeto no setor da saúde, continua a ser um desafio. Assim, torna-se importante que estes benefícios sejam definidos e quantificados, assim como comunicados e rapidamente compreendidos por todos os intervenientes do sector.

Os benefícios resultantes da aplicação de práticas sustentáveis que visam a “eficiência” e “redução” são geralmente mal interpretados pelos utilizadores dos edifícios de saúde, uma vez que este sector trata das pessoas e da sua qualidade-de-vida e bem-estar (Guenther e Vittori, 2013). Paralelamente, as organizações de saúde têm vindo a reunir esforços, no sentido de se alcançarem e explicarem os benefícios sociais da implementação de estratégias de redução do impacto ambiental destes edifícios. Inúmeras organizações e edifícios de saúde têm vindo a ser reconhecidos pelas suas iniciativas: tratamento de resíduos hospitalares; programas de reciclagem; programas de melhoria do impacto ambiental que têm reflexo nas comunidades vizinhas; redução do consumo de energia; redução do consumo de água; etc.

Assim, neste contexto, é fundamental promover o diálogo entre os princípios fundamentais de projeto desta tipologia de edifícios e as estratégias de introdução de práticas sustentáveis na indústria de saúde. A maior distinção que se pode fazer sobre estes dois conceitos é que: os princípios fundamentais de projeto são fruto da investigação focada nas preocupações médicas e no objetivo definido para cada espaço de trabalho que incorpora as recomendações de ambiente controlado que este tipo de edifícios deve manter; por seu lado, as práticas sustentáveis de projeto são um processo em desenvolvimento

que definem um determinado número de critérios para melhoria do impacto ambiental do edifício, com base em considerações, normas e estudos que estão em constante desenvolvimento (Hamilton 2006). As estratégias tomadas pela implementação das práticas sustentáveis de projeto têm em consideração a saúde pública, a comunidade e as preocupações sociais.

Robert e Guenther definem como “*Triple Bottom Line for Health*” o entendimento feito pelo sector da saúde acerca da sustentabilidade dos edifícios e da sua exequibilidade e que assenta nos três seguintes pilares (Roberts e Guenther, 2006): desempenho económico; desempenho ambiental; e desempenho social/ético do sucesso de cada unidade de atendimento de saúde. Esta é a base das mais reconhecidas ferramentas de avaliação da sustentabilidade que têm vindo a ser desenvolvidas com o propósito de reconhecer as organizações e os projetistas que têm em conta estas preocupações nas suas intervenções. Contudo, estas considerações aumentam de complexidade quando se acrescentam os interesses da comunidade e da população que podem induzir à ineficácia ou aplicação incorreta das mesmas. Neste sentido, a indústria de saúde deve fazer um esforço para incorporar não só as exigências técnicas dos hospitais, dos pacientes e do ambiente, como também da comunidade como um todo.

Shepley and Baum (2009) têm estudado os conflitos existentes entre os dois seguintes conceitos: Eco-Effective Design (EED); Evidence-Based Design (EBD). Embora os seus princípios possam estar assentes nas mesmas bases e numa mesma estrutura, existem conflitos entre estes dois conceitos que se prendem, por exemplo, com a conceção e construção de quartos maiores para os pacientes (Baum et al., 2009b). Por um lado, esta opção pode aumentar o conforto do paciente, possibilitando-lhe mais espaço e melhores condições. Por outro lado, este aumento de área levará a uma maior utilização de recursos construtivos, aumentará o consumo de água e energia para possibilitar uma boa iluminação e refrigeração ou aquecimento do ar. Assim, mais de 50% de especialistas em EED e EBD defendem que estes dois conceitos devem caminhar juntos e com um mesmo objetivo, promovendo-se e complementando-se (Baum e Shepley, 2009).

Princípios EBD	Principais Categorias				
	Saúde, segurança e bem-estar do paciente	Saúde, segurança e bem-estar dos profissionais	Eficiência operacional	Tecnologia	Flexibilidade ao longo do ciclo-de-vida
Gestão	sinergia	sinergia	possibilidade de sinergia	possibilidade de sinergia	possibilidade de sinergia
Saúde e Bem-estar	sinergia	sinergia	possibilidade de sinergia	sinergia	possibilidade de sinergia
Qualidade dos serviços	sinergia	sinergia	sinergia	sinergia	sinergia
Energia	possibilidade de conflito	possibilidade de conflito	possibilidade de conflito	possibilidade de conflito	possibilidade de conflito
Transporte	possibilidade de conflito	possibilidade de conflito	possibilidade de sinergia	conflito	possibilidade de sinergia
Água	conflito	possibilidade de conflito	possibilidade de conflito	conflito	possibilidade de conflito
Materiais	possibilidade de conflito	possibilidade de conflito	possibilidade de sinergia	sinergia	sinergia
Resíduos	sinergia	sinergia	possibilidade de sinergia	possibilidade de sinergia	possibilidade de sinergia
Uso do solo e ecologia	possibilidade de sinergia	possibilidade de sinergia	possibilidade de sinergia	possibilidade de conflito	possibilidade de conflito
Poluição	sinergia	sinergia	sinergia	possibilidade de sinergia	possibilidade de sinergia

Legenda: ■ conflito ■ possibilidade de conflito ■ possibilidade de sinergia ■ sinergia

Figura 2. Relação existente entre os princípios defendidos pelo conceito EBD e as principais categorias das metodologias de avaliação da sustentabilidade dos edifícios hospitalares (Castro, Mateus e Bragança, 2014:610).

EVOLUÇÃO E INTEGRAÇÃO DOS ATUAIS PARADIGMAS DE PROJETO: SUSTAINABLE-EFFECTIVE DESIGN (SED) VERSUS EVIDENCE-BASED DESIGN (EBD).

A relação entre os dois conceitos já anteriormente apresentados, Evidence-Based Design (EBD) e Eco-Effective Design (EED), tem vindo a ser discutida, estudada e apresentada, conforme literatura revista (Baum et al., 2009a). No entanto, pode dizer-se que no conceito de EED não cabem todas as preocupações inerentes ao conceito de construção sustentável. Assim, torna-se fundamental a introdução de um novo conceito, Sustainable-Effective Design (SED), capaz de refletir todas as questões que devem ser tidas em conta nas metodologias de avaliação da sustentabilidade dos edifícios hospitalares. A maioria dos estudos que se focam no conceito EED procuram uma resposta para a conceção de um edifício com o mínimo impacto ambiental possível, para que seja gerado um “healing environment”. Tendo em conta este contexto, a Figura 2 reflete as sinergias e conflitos entre as estratégias apontadas e defendidas pelo conceito EBD e as principais categorias das metodologias de avaliação da sustentabilidade em estudo neste artigo.

Salvo raras exceções, como as categorias “Água” e “Transporte”, todas as restantes categorias estão intrinsecamente relacionadas com as estratégias defendidas pelo conceito EBD. A maior parte das categorias apresentam

possibilidade de sinergia ou total sinergia com os princípios defendidos pelo conceito EBD, sendo de realçar a categoria “Qualidade dos Serviços” como a que apresenta total sinergia com todos os princípios defendidos.

Para um melhor entendimento desta relação, todos os indicadores de cada categoria deveriam ser tidos em conta numa análise comparativa como a da Tabela 1, a fim de se compreender quais os indicadores que seguem a par ou não com os princípios defendidos pelo EBD. Da mesma forma, as melhores práticas do EBD deveriam ser tidas em conta nesta análise. Assim, é importante salientar que se torna importante ter em conta estas sinergias e conflitos para melhorar a compreensão entre estas duas realidades, a fim de se começar a pensar no conceito SED como aglutinador de todos estes princípios.

Um dos objetivos destas metodologias é ajudar as equipas projetistas na fase de projeto e construção. Assim, a combinação entre os princípios defendidos pelo conceito EBD e as estratégias do conceito EED, é importante para se conseguir alcançar os indicadores que poderão enquadrar o conceito SED a fim de este ser claramente considerado nas metodologias de avaliação da sustentabilidade em constante desenvolvimento.

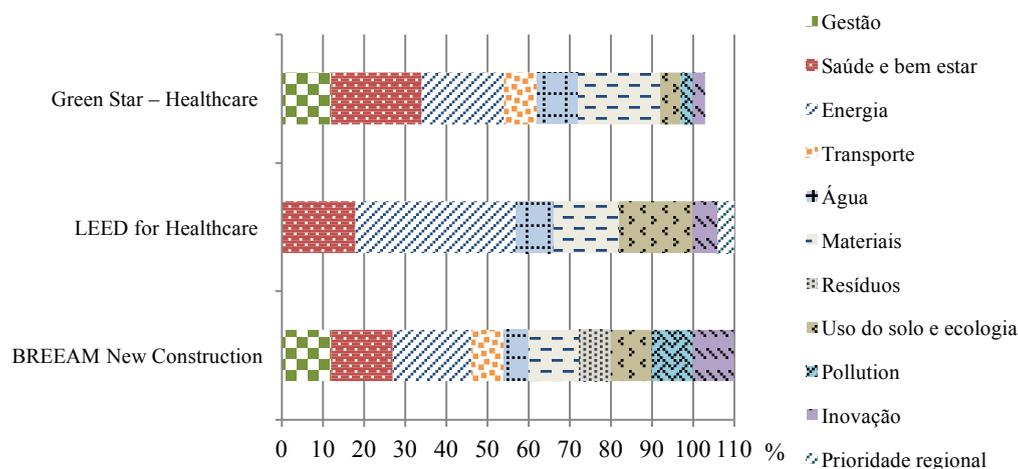


Figura 3. Distribuição de pesos nas metodologias de avaliação BREEAM New Construction, LEED for Healthcare e Green Star – Healthcare (elaborada pelo autor).

AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE NO CONTEXTO DOS EDIFÍCIOS DE SAÚDE.

Com o intuito de promover a introdução de práticas sustentáveis no projeto e utilização de edifícios hospitalares, alguns países, organizações e associações têm vindo a publicar algumas diretrizes neste domínio. De entre elas são de destacar as recomendações para projetos hospitalares que o Green Building Committee da American Society of Healthcare Engineering (ASHE) publicou em 2002. Pensando em melhorar o meio ambiente, a American Hospital Association's, juntamente com a United States Environmental Protection Agency, propôs, através dos princípios da arquitetura sustentável, regras para reduzir os resíduos e outros impactos associados aos hospitais (ASHE, 2002).

Nessas recomendações, a ASHE propõe um desenvolvimento arquitetónico e construtivo capaz de melhorar as preocupações a nível da saúde em três escalas (ASHE 2002):

- proteção da saúde de todos os utilizadores dos edifícios;
- proteção da saúde da comunidade vizinha;
- proteção da saúde da comunidade global e dos recursos naturais.

Neste sentido, há um número significativo de metodologias de avaliação da sustentabilidade, orientadas para o sector da construção, que têm como foco a construção nova, os edifícios existentes e/ou a reabilitação e manutenção dos mesmos. Dentro destas metodologias, alguns sistemas têm vindo a orientar-se também para o sector da saúde, procurando desenvolver ferramentas específicas para a avaliação desta tipologia de edifícios. Analisando o estado da arte destas metodologias, é possível salientar as seguintes, pela sua maior presença e afirmação a nível mundial: BREEAM New Construction; LEED for Healthcare; Green Star – Healthcare; and CASBEE for New Construction (Castro, Mateus e Bragança, 2015a).

CARACTERIZAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO EXISTENTES.

As metodologias de avaliação da sustentabilidade de edifícios de saúde, apresentam no geral uma estrutura semelhante. São todas compostas por categorias (as quais identificam as principais áreas de avaliação), e indicadores (que possibilitam a avaliação do comportamento das soluções escolhidas em relação a diferentes objetivos do conceito de desenvolvimento sustentável) e permitem fazer a avaliação e ponderação de cada ponto que se considera relevante para a avaliação da sustentabilidade da construção dos edifícios hospitalares.

Segundo Lee (Lee *et al.*, 2002), a estrutura é a base de todos os sistemas de avaliação, uma vez que é esta que estabelece e permite ponderar a classificação final do desempenho global do edifício. No entanto, ainda não existe unanimidade no que diz respeito à ponderação feita nestes sistemas de avaliação. Assim, cada sistema de avaliação da sustentabilidade considera no cálculo do desempenho global um diferente sistema de pesos para a ponderação do desempenho obtido ao nível de cada indicador de sustentabilidade.

Na Figura 3 apresentam-se os diferentes pesos atribuídos a cada uma das categorias de sustentabilidade pelas metodologias em análise. No que respeita às metodologias BREEAM New Construction, LEED for Healthcare e Green Star – Healthcare, estas apresentam para além de uma estrutura semelhante, um sistema de ponderação de pesos idêntico, embora o peso atribuído a cada categoria seja diferente. Quanto à metodologia CASBEE for New Construction – Hospitals, não é possível compará-la com as outras metodologias uma vez que a sua estrutura assenta em dois principais grupos de indicadores [qualidade ambiental do edifício (Q) e impacto ambiental do edifícios (LR)] e não têm correspondência com a das outras metodologias. Adicionalmente, o peso final destas duas categorias varia de acordo com as pontuações atribuídas aos indicadores intermédios.

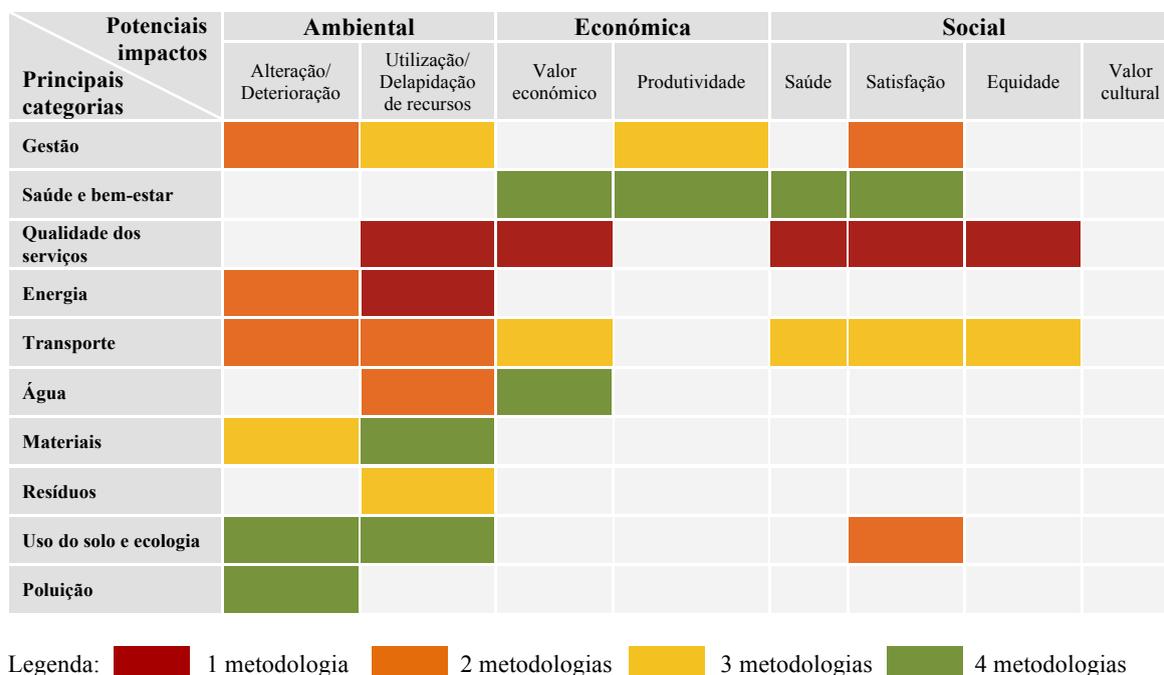


Figura 4. Relação entre os potenciais impactes determinados pela norma ISO/AWI 21929 e as principais categorias definidas pelas metodologias de avaliação da sustentabilidade dos edifícios de saúde estudadas (Castro, Mateus e Bragança, 2015b:610)

Analisando a Figura 3, verifica-se que as metodologias BREEAM New Construction e Green Star – Healthcare aproximam-se quanto às categorias de sustentabilidade que contemplam. No entanto, em termos de ponderação (sistema de pesos), esta última tende a assemelhar-se ao LEED for Healthcare, onde as categorias “Energia” e “Saúde e bem-estar” contêm mais de 50% dos créditos, enquanto que as mesmas categorias no BREEAM New Construction apresentam um peso de apenas 30%. Por sua vez, a metodologia BREEAM New Construction destaca-se por possuir uma distribuição mais equilibrada dos pesos e por conter um maior número de categorias principais de sustentabilidade principais, seguida do Green Star – Healthcare.

Nas metodologias LEED for Healthcare e Green Star – Healthcare é ainda de ressaltar a existência de duas categorias (Inovação e Prioridade Regional), que premeiam o nível de inovação incorporado no projeto e a prioridade regional dada a cada uma das restantes categorias. Isto é, estas duas categorias permitem um reconhecimento adicional para um edifício que inove no campo do desenvolvimento sustentável e se preocupe com a promoção e sustentabilidade da região apresentando um desempenho acima e além do nível que é atualmente reconhecido e recompensado pela metodologia em questão. A satisfação dos indicadores desta categoria permite um aumento de 10% no resultado da avaliação global do edifício (Figura 3).

NORMAS EXISTENTES E EM DESENVOLVIMENTO.

Nos últimos anos, a International Organization for Standardization (ISO) e o European Committee for Standardization (CEN) têm vindo a tentar estabelecer uma definição para o conceito de “construção sustentável”. Como resultado existem várias normas já publicadas por ambos: ISO 15392; ISO/IEC TS 17021-4; ISO 20121; ISO 21929-1; ISO 21930; ISO 21931-1; ISO/TR 21932; EN 15643; EN 15942; EN 15804; EN 15978; EN 16309; e EN 16627.

Analisando estas normas é possível concluir que construção sustentável não significa apenas melhorar e defender o meio ambiente, mas também promover e estabilizar o equilíbrio entre este e os aspetos sociais e económicos. Neste contexto, a Figura 4 apresenta a relação entre as categorias definidas pelas metodologias acima referidas e estudadas e as três dimensões da sustentabilidade (e os seus potenciais impactes), de acordo com a divisão proposta pela norma ISO/AWI 21929 (ISO TS 2010).

Tendo por base os resultados apresentados na Figura 4, é possível concluir que a dimensão ambiental é a que possui maior peso e presença em todas as categorias. Por sua vez, é ainda possível ressaltar que estas quatro metodologias em análise, consideram de forma diferente as três dimensões do desenvolvimento sustentável.

PROPOSTA PARA A ESTRUTURA DE UMA NOVA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE EDIFÍCIOS DE SAÚDE PORTUGUESES - HBSATOOL – PT.

CONTEXTO PORTUGUÊS.

Em Portugal, o Ministério da Saúde realizou, em 2008, um documento que enumera as recomendações e especificações técnicas dos edifícios hospitalares. Neste documento reeditado em 2012 (ACSS, 2012), encontram-se detalhadas diversas especialidades, como a arquitetura, instalações e equipamentos de águas e esgotos, sistemas elétricos e mecânicos, gestão técnica centralizada, espaços exteriores, gestão integrada de resíduos, manutenção, etc. A par deste tipo de documentos, existem outros regulamentos que especificam as exigências de cada espaço específico ao nível de iluminação, qualidade do ar interior, temperatura, ventilação, etc. No entanto, no que respeita à gestão sustentável dos edifícios hospitalares não existe nenhum documento com força de lei, ou de recomendação.

Em 2013, o Ministério da saúde publicou o “Guia de boas práticas para o setor da saúde”, o qual apresenta-se como um instrumento de promoção da redução do consumo de energia, de água, de produção e gestão de resíduos e a disseminação e promoção de comportamentos que promovam economias de baixo carbono. Este guia pode ser utilizado como uma ferramenta de disseminação e divulgação das melhores práticas a todos os utilizadores dos edifícios de saúde. A ideia foi a de demonstrar medidas que exigem custos muito baixos de investimento e a importância de se começar a introduzir tais preocupações nesta tipologia de edifícios (ACSS, 2013).

APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA.

Não existe uma simples resposta que se possa dar à seguinte pergunta: “O que faz um edifício de saúde ser sustentável?”. Isto acontece porque a sustentabilidade não é um conceito que se possa medir e qualificar facilmente (Mateus 2009). No entanto, as metodologias de avaliação da sustentabilidade tentam ajudar a encontrar uma resposta cada vez mais clara para esta pergunta. Assim, elas necessitam de ser o mais abrangentes possível, mas também ser simultaneamente fáceis de entender e de serem aplicadas.

A estrutura da metodologia de avaliação da sustentabilidade que se propõe, permite avaliar e classificar o desempenho de um edifício de saúde relativamente a dois níveis de referência, prática convencional e melhor prática (adaptados ao contexto português), e tem como principais objetivos:

Ser adaptada à realidade portuguesa tendo por base as metodologias mais conhecidas a nível mundial no contexto dos edifícios de saúde, os casos de estudo mais proeminentes e o trabalho desenvolvido pelas organizações ISO e CEN;

Incluir as três principais dimensões do Desenvolvimento Sustentável e permitir a identificação rápida das áreas a avaliar; Apresentar uma lista de indicadores suficientemente extensa (incluindo os impactes mais importantes) ao mesmo tempo que o mais reduzida possível a fim de potenciar a sua utilização;

Permitir a coexistência entre critérios quantitativos e qualitativos, tentando reduzir ao máximo a subjetividade destes últimos, aumentando a fiabilidade dos resultados;

Desenvolver um sistema de avaliação e um certificado facilmente entendível por todos os intervenientes no setor dos edifícios hospitalares.

Esta estrutura de avaliação assenta em critérios de avaliação, repartidos por cinco Áreas, vinte e duas Categorias e cinquenta e dois Indicadores, referentes à fase de conceção de um edifício de saúde novo, ou às fases de utilização e/ou reabilitação de um edifício existente (Tabela 1). A classificação final deste sistema é apresentada através de uma escala de qualitativa (de A+ a E), sendo necessária a satisfação de todos os requisitos obrigatórios de acordo com a legislação em vigor em Portugal. Neste momento, a metodologia de avaliação ainda se encontra em fase de desenvolvimento e contemplará um guia de avaliação que apoiará as avaliações de sustentabilidade ao nível de cada uma das cinco Áreas contempladas (Figura 5): A1) Ambiental; A2) Sociocultura e Funcional; A3) Económica; A4) Técnica; A5) Lugar. Tal como apresentado na Figura 5, a metodologia de avaliação assenta em quatro etapas: quantificação; normalização; agregação; e avaliação do desempenho e comunicação. Cada uma destas etapas é apresentada de forma resumida nas secções seguintes.

ÁREA	CATEGORIA	INDICADOR
A1: AMBIENTAL	C1: Avaliação do impacte ambiental de ciclo de vida	I1: Impactes ambientais do ciclo de vida
	C2: Avaliação do impacte ambiental de ciclo de vida – Energia primária	I2: Energia primária não renovável
		I3: Produção local de energia
	C3: Uso do solo e biodiversidade	I4: Otimização da implantação
		I5: Impermeabilização do solo
		I6: Reutilização de áreas previamente utilizadas
		I7: Proteção ecológica do lugar
		I8: Reabilitação da envolvente
	C4: Materiais e resíduos sólidos	I9: Uso de plantas autóctones
		I10: Efeito de ilha de calor
I11: Aquisição responsável de produtos de base orgânica		
I12: Separação de resíduos		
A2: SOCIOCULTURAL E FUNCIONAL	C5: Água	I13: Tratamento de resíduos tóxicos
		I14: Consumo de água potável
		I15: Reciclagem e aproveitamento de efluentes
		I16: Tratamento de efluentes contaminados
		I17: Eficiência da ventilação natural em espaços interiores
	C6: Conforto e saúde dos utilizadores	I18: Toxicidade dos materiais de acabamento
		I19: Conforto Térmico
		I20: Conforto Visual
		I21: Conforto Acústico
		I22: Qualidade do ar interior
I23: Ventilação e temperatura		
C7: Capacidade de controlo por parte dos utilizadores	I24: Vistas e privacidade	
C8: Enquadramento paisagístico	I25: Ligação visual com a paisagem envolvente	
C9: Desenho passivo	I26: Implantação e orientação	
	I27: Sistemas passivos	
	C10: Plano de mobilidade	I28: Acessibilidades
	C11: Flexibilidade e adaptabilidade espaciais	I29: Existência e acessibilidade a áreas sociais
		I30: Otimização espacial
I31: Flexibilidade do espaço		
A3: ECONÓMICA	C12: Custos de ciclo de vida	I32: Adaptabilidade do espaço
	C13: Promoção da economia local	I33: Custo de investimento inicial
		I34: Custos de utilização
A4: TÉCNICA	C14: Sistemas de gestão ambiental	I35: Contratação de bens e serviços locais
		I36: Comissionamento
		I37: Plano de gestão ambiental
	C15: Sistemas	I38: Qualidade do ar interior
	C16: Segurança	I39: Redução da poluição sonora
	C17: Durabilidade	I40: Eficiência dos sistemas de iluminação e climatização
		I41: Segurança dos ocupantes
	C18: Sensibilização e educação para a sustentabilidade	I42: Materiais de elevada resistência e durabilidade
	C19: Competências na área da sustentabilidade	I43: Seleção adequada de mobiliário
I44: Formação dos ocupantes		
A5: Lugar	C20: Comunidade local	I45: Formação dos prestadores de serviços
	C21: Valor cultural	I46: Inquéritos de satisfação
		I47: Integração na equipa de um Avaliador Qualificado
C22: Acessibilidades	I48: Desenvolvimento da comunidade local	
		I49: Enquadramento patrimonial
		I50: Acessibilidade a transportes públicos
		I51: Mobilidade de baixo impacte
		I52: Amenidades locais

Tabela 1. Proposta para a estrutura da metodologia de avaliação da sustentabilidade de edifícios de saúde portugueses – metodologia HBSAtool - PT (elaborada pelo autor).

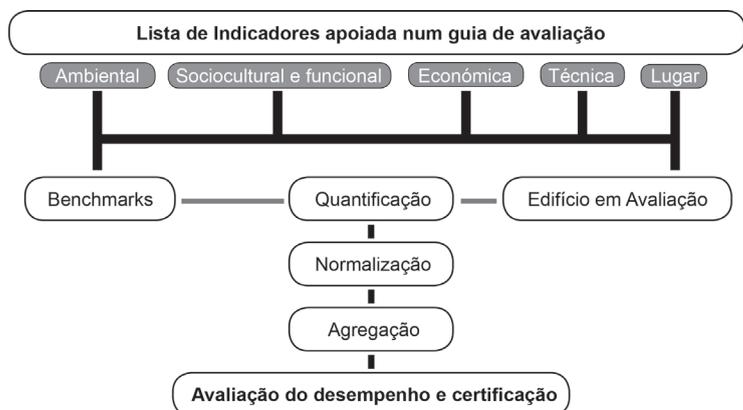


Figura 5. Esquema representativo do funcionamento do sistema de avaliação HBSATool – PT (elaborada pelo autor).

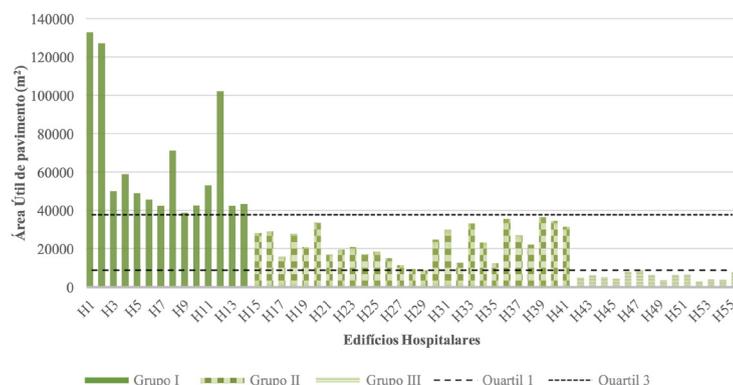


Figura 6. Divisão por grupos dos edifícios hospitalares portugueses em estudo (Castro et al., 2015: 13230).

UNIDADE FUNCIONAL E BENCHMARKS.

Para alcançar os valores de referência necessários ao bom funcionamento da metodologia proposta, têm sido estudados os edifícios hospitalares nacionais, os quais foram divididos em três grupos, em função da sua Área Útil de pavimento. Optou-se por dividir os hospitais em diferentes grupos de modo a facilitar o processo de comparação dos níveis de desempenho, uma vez que hospitais com dimensões distintas apresentam normalmente um conjunto de serviços diferente e cobrem um número variável de pacientes, pelo que apresentam um impacto diferente em cada uma das cinco áreas de sustentabilidade em avaliação. Assim, a unidade funcional definida para este estudo é 1 m² de área útil de pavimento, pelo que a quantificação dos indicadores e definição dos respetivos valores de referência (*benchmarks*) são realizados para esta área equivalente. Para cada um dos três grupos foram definidos os *benchmarks* respetivos.

Em comparação com outros parâmetros como, por exemplo, o número de camas, o ano de construção e a localização geográfica, a área útil de pavimento mostrou ser aquele que apresenta melhor correlação com o consumo de recursos de cada edifício hospitalar estudado.

Em Portugal, o Ministério da Saúde tem determinado a eficiência de cada instituição através da relação de custos utilizando a medida “doente-padrão” (ACSS, 2016). O cálculo do “doente padrão” baseia-se na transformação da atividade hospitalar, por natureza heterogénea, numa unidade de produção única de forma a possibilitar o exercício de comparação entre entidades. No entanto, importa esclarecer que o cálculo da medida “doente-padrão” não incorpora especificidades particulares e toda a carteira de serviços das entidades hospitalares, pelo que, qualquer análise de dados deve considerar uma avaliação mais profunda ao nível micro. Assim, entendendo-se que esta medida facilita apenas a comparação de custos entre edifícios, rapidamente se compreendeu que teria de se utilizar uma medida de comparação mais abrangente.

Na Figura 6 apresenta-se o modo como os cinquenta e cinco edifícios hospitalares portugueses foram agrupados de modo a definir os três grupos de edifícios.

Para cada grupo são estipulados valores de referência que permitirão a avaliação de edifícios hospitalares que se proponham para análise, independentemente da sua dimensão.

QUANTIFICAÇÃO DOS RESULTADOS.

A quantificação é indispensável para a comparação de soluções, agregação dos indicadores e avaliação precisa da solução. O método de quantificação a utilizar na avaliação do desempenho do edifício ao nível de cada indicador é especificado no guia de avaliação e inclui: resultados de estudos realizados anteriormente (bases de dados), normas, regulamentos e ferramentas de simulação. Por exemplo, na quantificação do consumo de energia não renovável (I2) o método a aplicar é o definido pelo Sistema Nacional de Certificação Energética dos Edifícios (Decreto-lei 118/2013).

Ao nível da quantificação das Áreas Ambiental e Técnica, a informação pode ser encontrada em diferentes fontes: Declarações Ambientais de Produto (DAPs); bases de dados gerais de Análise do Ciclo de Vida (ACV) de materiais e produtos de construção; e bases de dados genéricas de ACV de países vizinhos. Na utilização de dados de ACV, é necessário utilizar métodos de Avaliação do Impacte do Ciclo de Vida (AICV) para quantificar esses indicadores.

Em relação às Áreas sociocultural e funcional, e de lugar, os métodos de análise que devem ser utilizados para quantificar os indicadores propostos são apresentados no guia de avaliação. Finalmente, ao nível dos indicadores económicos, a metodologia é também apresentada no guia de avaliação e baseia-se na consideração de custos locais de mercado (custos relacionados com a água, gás e consumo de energia, custos de materiais, etc.).

NORMALIZAÇÃO E AGREGAÇÃO DE RESULTADOS.

A estrutura proposta terá como base um guia de avaliação que permitirá analisar o edifício relativamente a cada Indicador proposto. No final é atribuída uma classificação geral, que pode ser apreciada ao nível de cada Indicador, Categoria ou Área. Os indicadores sujeitos à regulamentação nacional em vigor (como por exemplo o I2: Energia primária não renovável) terão de responder às exigências nacionais mínimas para poderem ser avaliados pela metodologia proposta. No entanto, tendo esta estrutura metodológica a intenção de apoiar decisões em fases preliminares de projeto, o seu guia poderá ser utilizado como manual de consulta sempre, sendo que apenas posteriormente é possível ser atribuída uma classificação final por parte do Avaliador Qualificado. À parte disto, todo e qualquer edifício de saúde Português poderá ser avaliado por esta metodologia.

Mediante a existência de indicadores qualitativos e quantitativos na estrutura metodológica de avaliação proposta, torna-se necessário apresentar um método de avaliação coerente que seja transversal a todos os indicadores e equilibrado nas suas tomadas de decisão. Assim, enquanto que nos indicadores quantitativos é relativamente simples apontar valores de referência (máximos e convencionais) que permitem ao utilizador enquadrar a sua solução, nos indicadores qualitativos torna-se fundamental conhecer as expectativas de diferentes decisores de modo a definir os extremos da escala de avaliação. Deste modo, para ambas as situações, é fundamental analisar, tendo em conta cada indicador, o edificado existente e o espectável a fim de se alcançarem os valores de referência que possibilitarão a comparação. No entanto, enquanto que para o primeiro caso (como por exemplo para o I2: Energia primária não renovável) existem valores numéricos que podem ser usados, no segundo caso (como por exemplo para o I25: Ligação visual com a paisagem envolvente) é necessário recorrer a listas de créditos que permitem igualmente alcançar valores numéricos que possibilitam a comparação de casos.

Após quantificação de todos os Indicadores, é necessário proceder-se à sua normalização a fim de se possibilitar posteriormente a agregação dos mesmos para se atingir a classificação final. Deste modo é utilizada a equação 1 (Castro et al., 2015):

$$\bar{P}_i = \frac{P_i - P_{*i}}{P_i^* - P_{*i}} \quad \forall_i \quad (1)$$

\bar{P}_i = Resultados da normalização do indicador i

P_i = Resultado da quantificação de P_i^*

P_{*i} = Valores de referência do Indicador i , representando respetivamente a melhor prática e prática convencional

CLASSIFICAÇÃO E COMUNICAÇÃO DE RESULTADOS.

O desempenho global do edifício, o qual serve de comparação entre casos, através de uma nota final, resulta da média ponderada da soma do desempenho obtido em cada Área. Isto porque os Indicadores avaliados não apresentam a mesma importância/peso na quantificação geral de desempenho. Assim, os resultados obtidos dependem sempre do sistema de pesos definido na metodologia, o qual por sua vez reflete a existência de diferentes fatores agregados ao contexto de cada país. Por isso, não existindo ainda consenso sobre o melhor método a aplicar, é possível identificar diferenças quando se comparam pesos atribuídos por sistemas de avaliação distintos a critérios semelhantes.

Neste caso em concreto, a comunicação de resultados é feita através de uma escala de letras compreendida entre "E" (o menos sustentável/abaixo do valor convencional de referência) e "A+" (o mais sustentável/acima do valor da melhor prática de referência). O nível "D" é o correspondente à prática convencional e o "A" à melhor prática (Tabela 2) (Castro et al., 2015).

Escala qualitativa de sustentabilidade	Valores normalizados
A+	$\bar{P}_i > 1,00$
A (Melhor prática)	$0,70 < \bar{P}_i \leq 1,00$
B	$0,40 < \bar{P}_i \leq 0,70$
C	$0,10 < \bar{P}_i \leq 0,40$
D (Prática convencional)	$0,00 < \bar{P}_i \leq 0,10$
E	$\bar{P}_i \leq 0,00$

Tabela 2. Classificação final (elaborada pelo autor).

CONCLUSÕES.

Inicialmente, as ferramentas desenvolvidas para reconhecer o compromisso de um projeto com os objetivos do desenvolvimento sustentável eram apelidadas de "Metodologias de avaliação ambiental dos edifícios". No entanto, tendo por base a constante evolução e adaptação do conceito de sustentabilidade, torna-se cada vez mais apropriado a utilização do termo "Metodologias de avaliação da sustentabilidade dos edifícios". Atualmente não é possível falar-se apenas de ambiente sem se pensar nos outros pilares do conceito de Desenvolvimento Sustentável: o social e o económico. É fundamental que estas duas dimensões não se apresentem apenas como um dado adquirido, mas que assumam presença na lista de critérios de avaliação das metodologias. Neste sentido, é necessário alterar a forma de pensar os projetos de edifícios de saúde, uma vez que as questões ligadas à sustentabilidade, no seu sentido lato, não podem mais ser consideradas como um conjunto de princípios

externos que poderão ou não ser considerados no pensamento projetual. Esta evolução corresponde a uma alteração de paradigma, no sentido da integração destes princípios com todas as outras exigências que compõe o projeto de um edifício hospitalar. É por isso que se torna importante falar de *Sustainable-Effective Design* (SED) e não apenas de *Evidence-Based Design* (EBD) ou *Eco-Effective Design* (EED). Por seu lado, as metodologias de avaliação da sustentabilidade de edifícios hospitalares devem ser cada vez mais específicas e abarcarem as necessidades desta tipologia de edifícios, ao invés de serem apenas adaptações das metodologias existentes para outros tipos de novas construções, o que acontece na generalidade dos casos.

Assim, reforça-se a importância do desenvolvimento da metodologia de avaliação da sustentabilidade apresentada neste artigo. Com este propósito, defende-se que o estudo e investigação no ramo das metodologias de avaliação da sustentabilidade de edifícios hospitalares deveriam estar focados em encontrar o melhor processo de avaliação (que terá de ser um misto entre avaliação qualitativa e quantitativa) e quais os indicadores que devem ser presentes à avaliação para cada categoria proposta. No caso concreto deste artigo, apresenta-se uma proposta para a estrutura e conjunto de indicadores de uma nova metodologia para a avaliação da sustentabilidade de edifícios hospitalares situados no contexto português. O desenvolvimento de estudos semelhantes noutras áreas geográficas deverá considerar as especificidades ambientais, sociais e económicas do contexto.

Os autores agradecem o financiamento atribuído pela Fundação para a Ciência e Tecnologia e o programa POPH/FSE com a referência SFRH/BD/77959/2011.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ACSS. *Recomendações e especificações técnicas do Edifício Hospitalar*. 2011. Lisboa: ACSS - Administração Central do Sistema de Saúde, 2012.

ACSS. *Guia de boas práticas para o sector da saúde*. 1.3 (2013). Lisbon: ACSS, 2013.

ACSS. *Portal da Saúde* [online], 2016. [Data de consulta: 14 de maio 2016]. Disponível em: <http://www.portaldasaude.pt/portal>.

ASHE. *Green healthcare construction guidance statement*. Chicago: ASHE, 2002.

BAUM, Mara e SHEPLEY, Mardelle. *Eco-Effective Design & Evidence-Based Design*. Documento apresentado em: *Cleanmed*. Chicago, 2009, pp. 1–63.

BAUM, Mara; SHEPLEY, Mardelle; GINSBERG, Rachel e ROSTENBERG, Bill. *Eco-Effective Design and Evidence-Based Design: Perceived Synergy and Conflic*. *HERD*, 2009a, vol. 2, no. 3, pp. 56–70.

BAUM, Mara; SHEPLEY, Mardelle; ROSTENBERG, Bill e GINSBERG, Rachel. *Eco-Effective Design and Evidence-Based Design: Removing Barriers to Integration*. 1. San Francisco: AIA Board Knowledge Committee, 2009b.

CASTRO, Maria de Fátima; MATEUS, Ricardo e BRAGANÇA, Luís. *Proposal for a Healthcare Building Sustainability Assessment (HBSA) Method*. Em: *World SB14 Barcelona*. vol. 5. Barcelona: GBCe, 2014, pp. 607–613.

CASTRO, Maria de Fátima; MATEUS, Ricardo e BRAGANÇA, Luís. *A critical analysis of building sustainability assessment methods for healthcare buildings*. *Environment, Development and Sustainability*, 2015a, vol. 17, no. 6, pp. 1381–1412.

CASTRO, Maria de Fátima; MATEUS, Ricardo e BRAGANÇA, Luís. *Estratégia para a incorporação de impactes ambientais, sociais e económicos específicos num método de Avaliação da Sustentabilidade de Edifícios de Saúde (HBSA)*. Em: *Latin American European Conference on Sustainable Buildings and Communities*. EURO ELECS 2015, Guimarães, 2015b.

CASTRO, Maria de Fátima; MATEUS, Ricardo; BRAGANÇA, Luís e SERÓDIO, Francisco. *Development of Benchmarks for Operating Costs and Resources Consumption to be Used in Healthcare Building Sustainability Assessment Methods*. *Sustainability*, 2015, vol. 7, no. 10, pp. 13222–13248.

GUENTHER, Robin e VITTORI, Gail. *Sustainable healthcare architecture*. 1. Nova Jérсия: John Wiley & Sons, Inc., 2008.

GUENTHER, Robin e VITTORI, Gail. *Sustainable healthcare architecture*. 2. Nova Jérсия: John Wiley & Sons, Inc., 2013

HAMILTON, Kirk. *Four Levels of Evidence-Based Practice*. *AIA Journal of Architecture*. Nova Iorque: AIA, 2006, pp. 1–2.

ISO TS. *ISO/AWI 21929, Building Construction – Sustainability in Building Construction – Sustainability Indicators - Part 1 - Framework for the development of indicators for buildings and core indicators*. 2010. Geneva: ISO, 2010.

LEE, Wai-ling; CHAU, Chi-kwan; YIK, Francis; BURNETT, John e TSE, Man Sze. *On the study of the credit-weighting scale in a building environmental assessment scheme*. *Building and Environment*, 2002, vol. 37, no. 12, pp. 1385–1396.

MATEUS, Ricardo. *Avaliação da Sustentabilidade da Construção*. Guimarães: Escola de Engenharia da Universidade do Minho, 2009.

PENTLAND, William. *Heal Thy Self: U.S. Hospitals Are Huge Energy Hogs*. *Forbes* [online] [Data de consulta: 17 de outubro de 2013]. Disponível em: <http://www.forbes.com/sites/williampentland/2012/08/20/u-s-hospitals-are-huge-energy-hogs-better-light-bulbs-are-not-the-solution/>.

ROBERTS, Greg e GUENTHER, Robin. *Environmentally Responsible hospitals*. Em: S. MARBERRY (ed.), *Improving healthcare with better building design*. 1. Chicago: Health Administration Press, 2006, pp. 81–107.

VAQUERO, Petra. *Edifícios de saúde: Qual o caminho para a eficiência energética?* Em: A. MALHEIRO (ed.), *Tecno Hospital – revista de engenharia e gestão da saúde*. vol. 58. Lisboa: EH ATEHP, 2013, pp. 18–20.



POTENCIAL SOLAR ACTIVO EN TECHUMBRES DE VIVIENDAS INMOBILIARIAS.

THE POTENTIAL OF ACTIVE SOLAR SYSTEMS ON DWELLING ROOFS

ESTEBAN FELIPE ZALAMEA LEÓN
Universidad de Cuenca
Cuenca, Ecuador
esteban.zalamea@ucuenca.edu.ec

RESUMEN

El presente artículo analiza las características geométricas de las techumbres de viviendas unifamiliares pertenecientes a conjuntos inmobiliarios recientes en Concepción (Chile) y su potencial de captación solar. Para ello, se ejecuta un registro de 2.139 casas construidas posteriores al año 2006, correspondientes a 68,3% del total. Al describir las cubiertas existentes, se detecta una superficie media de techumbre inclinada de 84,7 m² y fragmentada, entre 3 y 12 alas o faldones, con inclinación media de 37,48°, que generan al menos un ala mayor o secundaria con superficie promedio es 33,9 m² orientada al norte, este u oeste. Esta superficie recibe una radiación anual total de entre 954 kWha/m² a 1.732,8 kWha/m², según azimut e inclinación, lo que con paneles fotovoltaicos integrados produce potencialmente una media de 6.317,4 kWha. Además, se estudian casos extremos acorde a máxima y mínima superficie captadora por superficie construida, demostrando que la producción energética alcanzaría a abastecer eléctricamente con la tecnología fotovoltaica (PV) integrada. Finalmente, se evalúa el potencial de la tecnología híbrida térmica-fotovoltaica con fluido calotransportador de aire (PVTa).

Palabras clave

vivienda unifamiliar, potencial solar, techumbre, integración arquitectónica térmica fotovoltaica.

ABSTRACT

This paper presents an analysis of the geometric characteristics of roofs in recently-built, single family dwellings in housing developments in Concepcion, Chile, and their solar energy collection potential. Data was recorded for 2,139 houses built after 2006, which corresponds to 68.28% of the total number of possible dwellings. It was found that the average surface area of sloped roofs is 84.7 m² and is divided between three and twelve wings or gables, with an average incline of 37.48°. These result in at least one primary or secondary wing with an average surface of 33.9 m² facing north, east or west. This surface receives a total annual solar radiation of from 954 kWha/m² to 1,732.8 kWha/m² depending on the azimuth and the roof's slope. With the integration of photovoltaic panels, an average of 6,317.2 kWha per year, per house can potentially be produced. Additionally, when extreme cases were studied, including those with the largest and smallest roof surface areas, it was demonstrated that the energy produced would supply sufficient electricity with the integration of photovoltaic technology. Lastly, the potential of hybrid thermalphotovoltaic (PV/T) air technology is evaluated.

Keywords

single family dwelling, solar energy potential, roofing, thermphotovoltaic architectural integration.

INTRODUCCIÓN.

Lund (2012) y la International Energy Agency (2009) han expuesto cómo, en el futuro, ciudades enteras deberán incorporar masivamente energías renovables para reducir el alto impacto ambiental que supone su funcionamiento. Entre ellas, la captación solar activa juega un papel primordial, especialmente en zonas de latitudes medias. Para ello, es necesario caracterizar entornos urbanos, estableciendo potencialidades diversas frente a la demanda energética, con la finalidad de diseñar redes, almacenamiento y distribución adecuados. Un esquema urbanístico usual de ciudades en Chile, similar a muchos otros en el mundo, lo constituyen los centros urbanos densos, consolidados, con alta tasa de habitabilidad y usos variados: servicios administrativos, de comercio y habitacionales. Mientras, en los suburbios existe una menor densidad, con tendencia al uso habitacional y una tipología de casas unifamiliares. Dicha configuración está, en efecto, presente en Concepción.

Concepción es una ciudad costera localizada en la zona centro-sur de Chile y posee una población estimada de 230.730 habitantes (Observatorio Habitacional, 2014). Se encuentra en latitud media a 36,48° Sur, presenta clima estacional, oscilaciones diarias e influencia marítima. La oferta inmobiliaria nos sugiere que la masa edificada nueva tipo casa predomina en el cinturón urbano externo, lo cual es fácilmente comprobable al comparar fotos satelitales secuenciales de distintos años recientes. Se levantan casas masivamente en forma repetitiva y seriada; y se ven modelos alternados iguales o similares, con techumbres siempre inclinadas. La relevancia de esta tipología está dada por su alta oferta y demanda, así como por las ventajas constructivas que representa la repetitividad.

La IEA (International Energy Agency, 2009) ha descrito condiciones de áreas urbanas que han de adoptar recolección solar activa de forma masiva. Wall *et al.* (2012), Munari (2009) y la IEA (IEA SHC Task 41 2012) en tanto, han analizado la situación actual y limitaciones para su implementación desde el ámbito arquitectónico. Hachem (2012), por su parte, ha propuesto una metodología para estimar el potencial solar de techumbres y barrios durante el proceso de diseño, no así para dimensionar emprendimientos ya existentes. Se han publicado, asimismo, alternativas para dimensionar el potencial solar a través de mapeo GIR (Izquierdo, Rodrigues y Fueyo, 2008) o por tomas aéreas con sobrevuelos LIDAR (Lukač y Žalik 2013), los cuales no consideran toda la techumbre, como tampoco el faldón o ala de techumbre con mayor aptitud por dimensión, orientación e inclinación, característica de las cubiertas inclinadas. La novedad del presente planteamiento consiste en dimensionar estadísticamente el ala de techumbre con mayor capacidad individual y, a la postre, dimensionar también su producción energética teórica en relación a la superficie construida y las demandas características promedio. Como se considera únicamente un faldón por caso y además las inclinaciones

y la orientación (aunque de manera estadística), y como se adopta, asimismo, solamente una tipología de casas en emprendimientos inmobiliarios, los resultados no son comparables con ningún otro caso detectado en la literatura especializada; no obstante, la menor variabilidad estacional y de irradiación que está presente en el contexto de estudio comparativamente con, el existente, por ejemplo, en el centro-norte de Europa, implica naturalmente una superior aptitud natural de Concepción, frente a aquellos sitios donde se ha desarrollado la recolección solar activa.

METODOLOGÍA.

Se delimitan zonas de la ciudad desarrolladas en años recientes y, seguidamente, se analiza el crecimiento desde finales de 2006 porque a partir de entonces están disponibles, a través de la herramienta temporal de GoogleEarth®, fotos aéreas en alta resolución de la zona de estudio, lo que hace factible establecer comparaciones anuales de crecimiento, identificando los nuevos desarrollos y permitiendo *a posteriori* establecer la relación con los datos municipales de aprobaciones hasta 2013 (Observatorio Habitacional, 2015). Luego, se caracterizan los emprendimientos que ocupan más de 4000 m², fácilmente identificables.

Se modela y dimensiona cada techumbre, se obtienen relaciones de ocupación, superficie de techumbre, superficie construida (en horizontal e inclinada), orientación, número de aguas, alas de techo potencialmente útiles, etc. Se precisa el Ala de cubierta de Mayor Dimensión (AMD), por modelo, aquella que posee mayor superficie con mayor potencial de captación; también la Segunda Ala de Mayor Dimensión (SAMd), como alternativa cuando la primera no esté bien orientada (Figura 1). Las pendientes se miden por caso; aspecto fundamental teniendo en cuenta, en primer lugar, que para la captación fotovoltaica la inclinación para maximizar la producción anual corresponde a aquella que coincide con la latitud o con pocos grados menos que ésta (hasta 10°), y, en segundo, que para captación térmica se supone una inclinación superior a la latitud (CDT, 2007; Hachem, 2012; Kalogirou, 2004).

Para obtener los indicadores principales se considera las características y parámetros dimensionales y la repetitividad de las viviendas. Después, se determina la irradiación factible mensual acorde a la inclinación y la orientación, y con desvíos previsible, de acuerdo a datos recogidos de loteos a partir de modelo matemático. Tomando la irradiación horizontal global publicada en CDT (2007) y aplicando la fórmula [1] adoptada desde *Ley Chilena 20365* (MINENERGIA, 2009), se obtiene el nivel de irradiación bajo distintas condiciones por m², mensualmente:

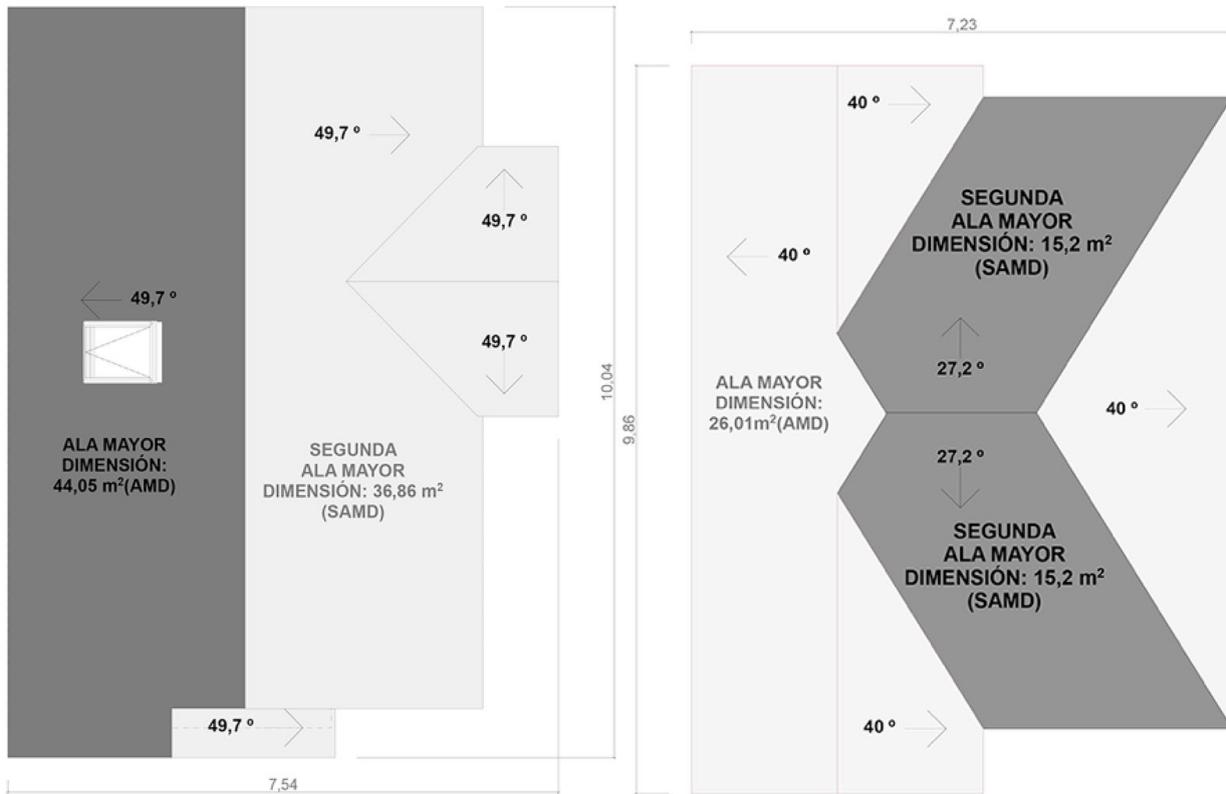


Figura 1. Viviendas en emprendimientos inmobiliarios y Ala de Mayor Dimensión (derecha) y dos Segundas Alas de Mayor Dimensión (izquierda).
 Fuente: Elaboración propia.

$$R_{Gm_inc-i} = R_{Gm_i} \times F_{d_i} \times [1 - (3,5/100000) \times O_{PS}] \times [1 - (PS/100)] [1]$$

Donde:

R_{Gm_inc-i} : Radiación solar global media mensual sobre superficie inclinada del mes i [kWh/m²].

R_{Gm_i} : Radiación solar global sobre superficie horizontal media mensual para el mes i en [kWh/m²].

F_{d_i} : Factor modificador de la radiación incidente en una superficie inclinada para el mes i . Este valor se obtiene del Anexo II de la Ley 20365, conforme a la inclinación y a la latitud media de la comuna correspondiente.

O_{PS} : Orientación del plano solar.
 PS: Pérdidas por sombra [%].

Las pérdidas por sombra, así como por topografía o bloqueo por vegetación, se consideran de forma estadística de acuerdo a estimaciones provenientes de otros contextos (Pelland y Poissant, 2006).

RESULTADOS.

DIMENSIONAMIENTO DE CONJUNTOS HABITACIONALES DE VIVIENDAS UNIFAMILIARES.

Las viviendas unifamiliares ocupan una superficie horizontal considerable, seleccionable y trazable. Se detecta un crecimiento de ciudad de 906.783,4 m² solamente en emprendimientos residenciales unifamiliares. Se identifican modelos individuales a través de un sistema de Catastro Municipal Electrónico de la Municipalidad (Dirección de Obras Municipales de Concepción, 2015) y se obtienen datos de más de la mitad de los conjuntos de las casas, que ocupan 633.350,1 m², el 69,8% de un total de 22 conjuntos detectados.

La casa promedio posee 289,47 m² en superficie de ocupación de ciudad, correspondiente al lote propio más las vías y cuotas de espacio público respectivos. El crecimiento entre 2006 y 2013 es proyectado en 3.133 casas, correspondiente al 90,6% de permisos emitidos, de acuerdo al Observatorio Urbano de Chile (3.458 licencias) (Observatorio Habitacional, 2015). El 9,4% restante se refiere a unidades construidas fuera de conjuntos habitacionales, o bien, aprobados no edificados (Figura 2). Las 2.139 casas efectivamente analizadas representan el 3,3% frente a la totalidad de viviendas existentes (65.626, según CASEN, 2009), y el 4,1% respecto a la tipología casa (52.630 unidades registradas legalmente). No es una muestra representativa de la totalidad de la tipología "Casa de Concepción", porque los modelos en emprendimientos unifamiliares presentan diferencias en relación a tipologías anteriores, pero sí lo es de la que se ejecuta en la actualidad. Respecto a la representatividad del universo de estudio, se espera un error del 1,1% y una confianza del 95%. Asimismo, se encuentran superficies construidas variables entre 57m² hasta 170m², con un promedio de 93,32 m²; dimensión superior a la estadística nacional (CCHC, 2014), pero cercana a la observada para la ciudad (MINVU, 2013). Casi la totalidad de las viviendas poseen dos plantas (98,7%), solo 28 poseen tres. Presentan sistemas constructivos similares entre sí, todas las plantas bajas son de albañilería y el segundo nivel es mayoritariamente de estructura liviana de madera o metal liviano galvanizado semejante a lo descrito por otros autores (Celis et al., 2012)

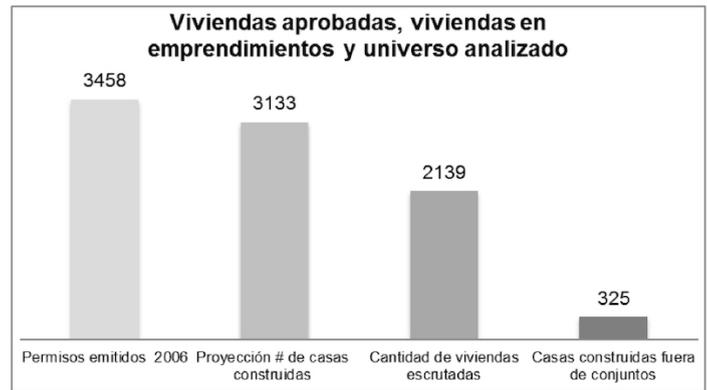


Figura 2. Representatividad de vivienda unifamiliar en emprendimientos inmobiliarios y sujeto de estudio frente a viviendas unifamiliares aprobadas entre 2006 y 2013. Fuente: Elaboración propia.

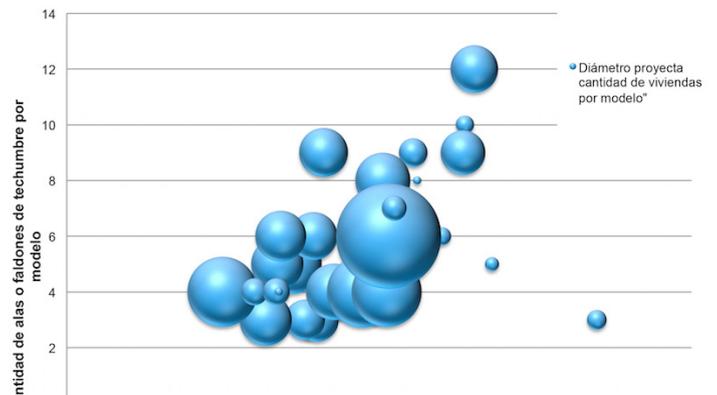


Figura 3. Relación de cantidad de alas de techumbre frente a superficie de vivienda y cantidad de viviendas por modelo. Fuente: Elaboración propia.

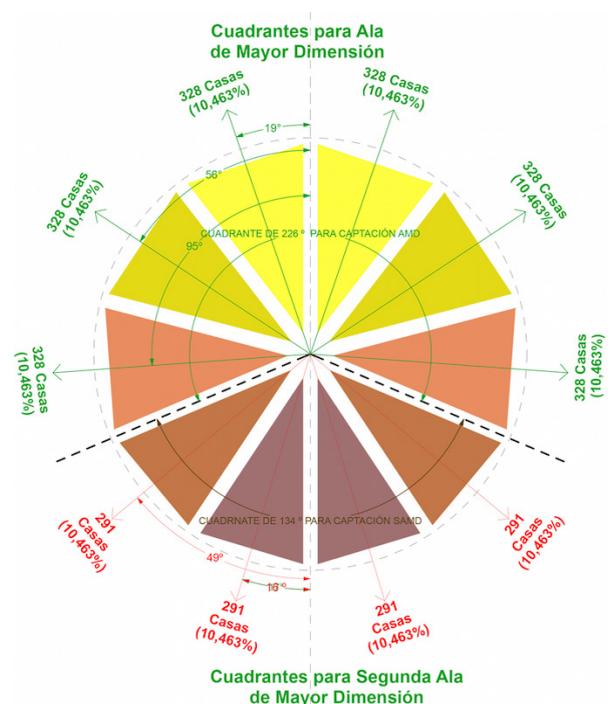


Figura 4. Distribución de número de casas de universo construido a partir de 2006 en emprendimientos inmobiliarios masivo, como representación de orientaciones probables de ala de techumbre captadora (AMD y SAMD). Fuente: Elaboración propia.

CARACTERIZACIÓN DE TECHUMBRES.

La proyección plana de techos ocupa 209.479,9 m² o el 23% de la superficie total de los loteos; lo restante corresponde a jardines, vías, espacios públicos o terrazas. Al calcularse como superficie inclinada, esta resulta obviamente superior a la horizontal en 129%. Las techumbres poseen entre 3 y 12 faldones de cubierta por casa, pero la mayor recurrencia, en ese sentido, se encuentra entre los 3 y 6 (Figura 2). A mayor tamaño de casa, la tendencia es tener techumbres más facetadas. La media, considerando todos los casos, está entre 5 y 6 faldones.

Se advierten dos pendientes moda, de 40,0° y 26,71°, utilizadas por 1000 casos (47%). El promedio global es de 37,5°, cercana al óptimo para recolección fotovoltaica. El rango máximo y mínimo de inclinaciones es de 19,7° hasta 49,7°. El 54,7% de casos posee inclinación superior a la latitud (entre 40° y 49°), condición adecuada para la recolección de energía térmica útil (Gajbert, 2008; Munari, 2009).

DETERMINACIÓN DE AMD, SAMD Y AZIMUT.

El potencial energético solar está en relación directa y lineal con la superficie captadora disponible: a mayor superficie, mayor producción. Emprendimientos con criterio de aprovechamiento solar-activo presentan generalmente amplios paños y correcta orientación (IEA, 2009; Hachem, 2012). Los diagramas tridimensionales permiten encontrar el AMD y SAMD por caso. Al relacionar la superficie captadora con la superficie construida, se detecta el potencial por modelo, que en la mayoría de casos está entre 0,25 y 0,45, casos extremos muestran 0,20 como mínimo y 0,62 como máximo. El promedio aquí, de 0,39 (Figura 3), indica una potencial superficie colectora de 1.222 m² en las 3.133 unidades, lo cual representa 9,1 m² por habitante; frente a ello Izquierdo, Rodrigues y Fueyo (2008) determinaron, para España, una superficie colectora de 14 m² por habitante, no obstante, adoptaron una superficie de techumbre en proyección plana y en diversas tipologías, sin tener en cuenta los faldones y su aptitud. La relación entre AMD frente a la superficie de ciudad es 0,13.

Los análisis de los loteos evidencian que existe una orientación anárquica de faldones de techumbre, de hecho AMD o SAMD pueden encarar hacia delante, detrás o a los costados; además, los loteos y su consecuente orientación tampoco llevan ninguna relación respecto a orientación de faldones. En consecuencia, se supone igual posibilidad de orientación para cualquiera de los puntos cardinales.

ESTIMACIÓN DE IRRADIACIÓN SOLAR INCIDENTE EN TECHUMBRES INCLINADAS Y PRODUCCIÓN ELÉCTRICA PV.

Para determinar el potencial solar, se dimensiona la irradiación anual que recibe el faldón AMD o SAMD. Cuando AMD se orienta desfavorablemente, SAMD está en dirección opuesta o perpendicular mejor dispuesta, en consecuencia. Se calcula la condición promedio cuando el SAMD es más favorable. Y se estima la irradiación acorde a la inclinación y orientación frente a la relación promedio de 77,24 %, que corresponde al promedio de superficie SAMD respecto a AMD. Se utilizan, entonces, dos inclinaciones representativas para el cálculo, las que son resultado de las dos pendientes moda. El primer grupo representa pendientes pronunciadas que engloban el 54,4% de los casos (1.163 viviendas), cuyo promedio es de 43,7°; mientras que el segundo grupo contiene el 45,6% (976 casos) restante y una inclinación promedio de 26,8°.

La irradiación disponible se obtiene aplicando el modelo [1] descrito en el Apartado 2 de este documento. En primera instancia, no se consideran las "Pérdidas por Sombras" (PS), ya que esta variable debería analizarse para cada caso puntual. Sin embargo, se estipulan pérdidas conjuntas estadísticamente posibles, a partir de estudios referentes en viviendas de similares características que incorporan captación activa por condiciones de sombras, limpieza, mantenimiento, etc. (Pelland y Poissant, 2006). El cálculo de potencial captación por orientación en inclinación establece que cuando AMD está desviada 113,0° respecto al norte verdadero, la irradiación captada es similar a la SAMD con una rotación de 90° respecto al norte (considerando las dos pendientes promedio), por lo tanto, se adopta como desviación estadística para, con desviación superior a 113°, empezar a utilizar el indicador SAMD. En consecuencia, se reparte el universo de casas distributivamente con AMD, captando dentro del rango de 226° con dirección norte (113° desvío al este y oeste), grupo al que corresponde a 1.967 casas. Luego, para las unidades restantes se supone captación con SAMD, encarando dentro del ángulo de 139° restantes siendo en un número de 1166 (Figura 4).

En la misma Figura 4, el cuadrante de 226° que se representa en la zona superior de la distribución, muestra seis subcuadrantes correspondientes a seis grupos con desviaciones de AMD; y el cuadrante de SAMD, en zona inferior, de 134°, se subdivide en cuatro. De este modo, los cuadrantes AMD y SAMD presentan similar cantidad de casas (328, las AMD y 292, las SAMD). Los seis subcuadrantes superiores de AMD configuran un ángulo de 37,2°, los de SAMD, ángulos de 33,5°. Para calcular la irradiación solar, la orientación este y oeste se suponen similares, cuantificándose conjuntamente. Así, la fracción con captación AMD incluye 656 casas con desviación de

IRRADIACIÓN SOLAR ANUAL (MGWh) EN AMD o SAMD Y POTENCIAL PV ESTADÍSTICAMENTE DETERMINADO

Desvío en Azimuth(°) de captación	Inclinación (°)	# de viviendas	AMD o SAMD (m2)	Irradiación mensual (MGWh)												Promedio Anual	TOTAL
				Ene	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic		
19,1	26.8 (45.6% de 655 casos)	299	37,24	2.263,8	1.852,2	1.841,1	1.399,5	905,8	765,2	813,6	1.134,8	1.453,3	1.870,4	1.983,5	2.135,4	1.534,9	18.418,6
	43.7 (54.4% de 656 casos)	356	37,24	2.444,6	2.122,2	2.250,4	1.804,5	1.233,5	1.071,4	1.119,5	1.502,5	1.803,3	2.166,3	2.168,6	2.258,8	1.828,8	21.945,7
57,50	26.8 (45.6% de 655 casos)	299	37,24	2.027,9	1.659,2	1.649,3	1.253,6	811,4	685,5	728,8	1.016,6	1.301,8	1.675,5	1.776,9	1.912,9	1.375,0	16.499,4
	43.7 (54.4% de 656 casos)	356	37,24	2.189,9	1.901,1	2.015,9	1.616,5	1.105,0	959,8	1.002,9	1.345,9	1.615,4	1.940,5	1.942,7	2.023,5	1.638,3	19.659,0
95,83	26.8 (45.6% de 655 casos)	299	37,24	2.004,3	1.640,0	1.630,1	1.239,1	802,0	677,5	720,3	1.004,8	1.286,7	1.656,0	1.756,2	1.890,7	1.359,0	16.307,6
	43.7 (54.4% de 656 casos)	356	37,24	2.164,4	1.879,0	1.992,4	1.597,7	1.092,1	948,6	991,2	1.330,3	1.596,6	1.918,0	1.920,1	1.999,9	1.619,2	19.430,4
16,24 con SAMD	26.8 (48.72% of 583 casos)	266	28,28	1.534,4	1.255,5	1.247,9	948,6	613,9	518,7	551,4	769,2	985,0	1.267,8	1.344,4	1.447,4	1.040,4	12.484,2
	43.7 (51.28% of 583 casos)	317	28,28	1.657,0	1.438,5	1.525,3	1.223,1	836,1	726,2	758,8	1.018,4	1.222,3	1.468,3	1.469,9	1.531,1	1.239,6	14.874,9
48,75 Con SAMD	26.8 (48.72% of 583 casos)	266	28,28	1.419,9	1.161,8	1.154,8	877,8	568,1	480,0	510,3	711,8	911,5	1.173,1	1.244,1	1.339,4	962,7	11.552,4
	43.7 (51.28% of 583 casos)	317	28,28	1.533,3	1.331,1	1.411,5	1.131,8	773,7	672,0	702,2	942,4	1.131,0	1.358,7	1.360,2	1.416,8	1.147,1	13.764,7
TOTAL		3133		19.239,6	16.240,6	16.718,7	13.092,0	8.741,5	7.504,8	7.899,1	10.776,6	13.306,9	16.494,6	16.966,6	17.956,0	13.744,7	164.937,0
Potencial Eléctrico PV (IEA/ PELLAND Y POISSANTE / HACHEM)(EN MWh anual)			12%	2.308,8	1.948,9	2.006,2	1.571,0	1.049,0	900,6	947,9	1.293,2	1.596,8	1.979,4	2.036,0	2.154,7	1.649,4	19.792,4

Tabla 1. Cálculo de irradiaciones en grupos de casas en indicadores AMD y SAMD, mensual y anualmente. Fuente: Elaboración propia.

19,10°, 57,5° y 95,83° respecto al norte; en tanto, el grupo SAMD resulta en 583,0 casos con desviación de 16,24° y 48,75°. Con la Fórmula [1] se estima la irradiación recibida en las techumbres por cada grupo, tanto AMD como SAMD, de manera mensual y con ello se consolida en producción conjunta de la totalidad de casas en margen anual.

La Tabla 1 muestra la irradiación total conjunta, oscilaciones acorde a inclinación promedio y por número. Lógicamente, el grupo que exhibe máxima producción con captación AMD es aquel con menor desviación (19,1°) e inclinación de 43,7°, el cual recibe irradiación conjunta de 21945,7 MWh al año. El grupo con menor producción utiliza su SAMD con alta desviación (48,75°) e inclinación de 26,8°, captando anualmente 11.552,4 MWh. El mes con máxima irradiación conjunta es enero, con 19.239,0 MWh; junio posee la mínima, con 7.504,8 MWh. La producción energética en el conjunto de casas con captación AMD y desvío de 95,8° es superior a aquellas que utilizan la SAMD desviadas 16,24° (aunque también son más numerosas). Se observa escasa diferencia de irradiación promedio anual por m² entre techos inclinados 43,7° y con inclinación de 26,8°, aunque mensualmente se adviertan mayores distinciones.

Con la irradiación obtenida se puede prever generación eléctrica PV. La literatura especializada presenta una eficiencia de $\eta=16\%$ como un válido promedio para fotovoltaicos instalados en centros urbanos conectados a red, no obstante, este potencial debe castigarse, por pérdidas estadísticamente determinadas por inversores, distribución, sombreados, factores de conexión, etc., en un porcentaje del 25% (Pelland y Poissant, 2006). Se

espera entonces una producción útil del 12% respecto a la irradiación recibida. Esta estadística es obtenida con redes, instalaciones, tecnología y condiciones adecuadas en comunidades que han adoptado la recolección solar como política de estado (IEA, 2009), y podría esperarse en el caso chileno solamente si se siguieran similares impulsos, facilidades, conexiones y distribución de excedentes.

La Tabla 1 también expresa la producción eléctrica estimada en las 3.133 techumbres de 19.792,4 MWh anualmente, lo que supone 6.317,4KWh por casa en promedio. Al expresarse por superficie construida y casa promedio de 93,32 m², se puede inferir una producción de 67,71 KWh de electricidad anual por m² habitable. La superficie de techumbre productora total es 106.197,4 m², lo cual significa una producción anual de 186,4 KWh por m² de techumbre recolectora al año.

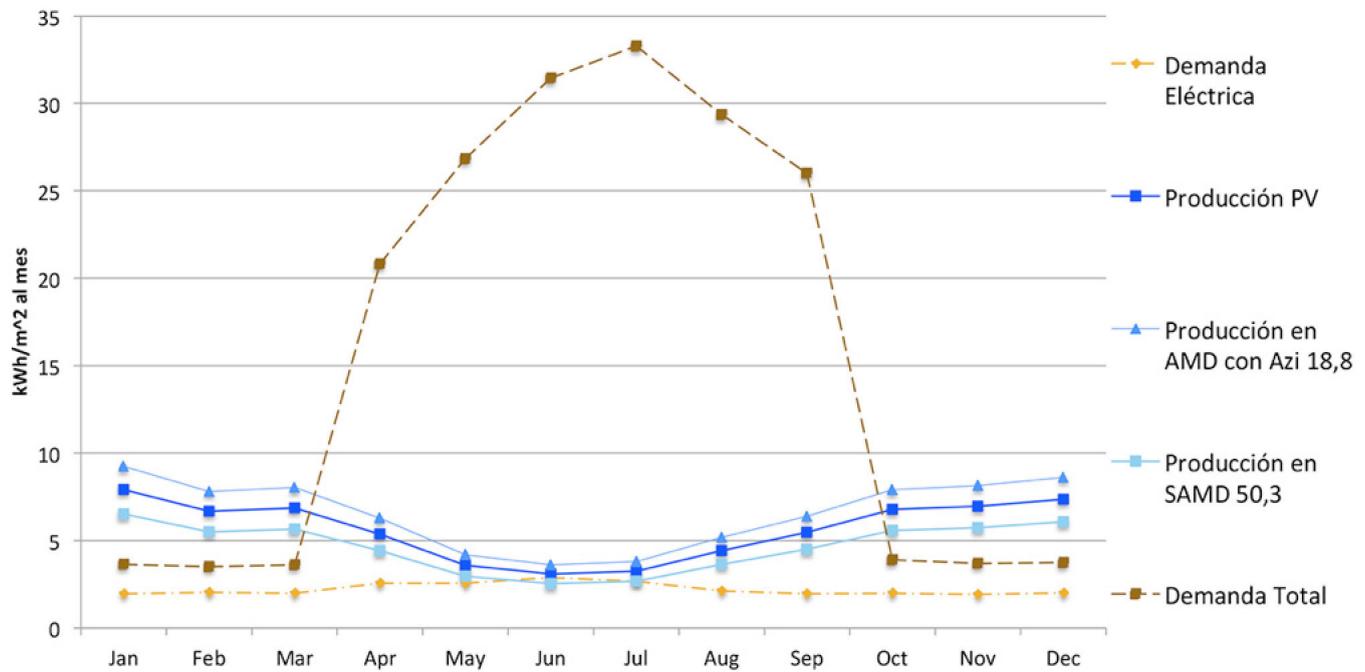


Figura 5. Curvas Promedio de demanda eléctrica y energética global frente a producción promedio por m2 de superficie construida.
 Fuente: Elaboración propia.

COMPARACIÓN ENTRE POSIBLE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA SOLAR FRENTE A DEMANDA ELÉCTRICA RESIDENCIAL Y ALTERNATIVA HÍBRIDA TÉRMICA-FOTOVOLTAICA.

La producción eléctrica estimada temporalmente es comparada con la demanda determinada estadísticamente para Concepción (CDT 2010) en la Figura 5. La principal limitación para un abastecimiento total es la característica alta demanda invernal frente a la baja producción por la mínima irradiación existente en tal temporada. De forma complementaria, se observan posibilidades extremas acordes a tipología de casa, al analizar el caso con mayor proporción AMD por superficie habitable y orientado prácticamente al norte (18,83° de desviación), frente a caso con utilización SAMD encarando noreste y noroeste con alta desviación (50,25°). Los resultados muestran que en época estival se supera el autoabastecimiento para la demanda eléctrica con amplio superávit; pero en el caso extremo desfavorable no se alcanza (aunque por un escaso margen) a suplir la demanda de la época invernal. En todos los casos, durante el verano existe alto margen de energía exportable para abastecer otras demandas en la ciudad (Lund, 2012). En cuanto a la demanda residencial total, se aprecia un marcado desbalance en los meses fríos, por calefacción; los estudios sugieren reducir la demanda de energía térmica a través de medidas de eficiencia energética pasiva, en primera instancia, luego, la captación

de energía térmica solar de forma activa es una opción que puede contribuir efectivamente a disminuir el desbalance (Charron y Athienitis, 2006; Hastings y Wall, 2007).

La gráfica de la Figura 5 expone la relación de los casos extremos, aquel con mayor proporción AMD/superficie construida y aquel modelo con inferior potencial y orientación, en términos de producción–demanda mensual. En suma, se estipula un índice de producción máxima de 78,9 kWh al año, frente a 55,3 kWh al año como mínimo expresado en indicadores por m² de vivienda habitable.

La alta demanda térmica impulsa a explorar alternativas como una posible captación térmica con Colectores híbridos Fotovoltaicos/Térmicos con fluido aire (BIPVT/a). Esta tecnología ya comercializada en Canadá es una alternativa con oportunidades interesantes ya que optimiza la superficie de captación, al tiempo que evita el riesgo por sobreproducción estival y mejora la producción eléctrica (Solarwall, 2015; Chow, 2010; Kumar y Rosen, 2011). Del total de irradiación absorbida por los paneles, aproximadamente el 85% se disipa en forma de calor, temperatura adicional que provoca baja de producción eléctrica. En ese sentido, se esperan pérdidas de 0,4% en eficiencia por °C de incremento de temperatura (Astea, Del Peroa y Leonforte, 2012; Hachem 2012). La tecnología híbrida con aire supone paneles fotovoltaicos sobrepuestos a una cámara de circulación de aire para refrigerar las células, de manera que el calor recuperado puede utilizarse de ser requerido, conduciéndolo al interior. Hachem (2012) relaciona la producción de electricidad y calor útil generados en techumbres PVTa con inclinación

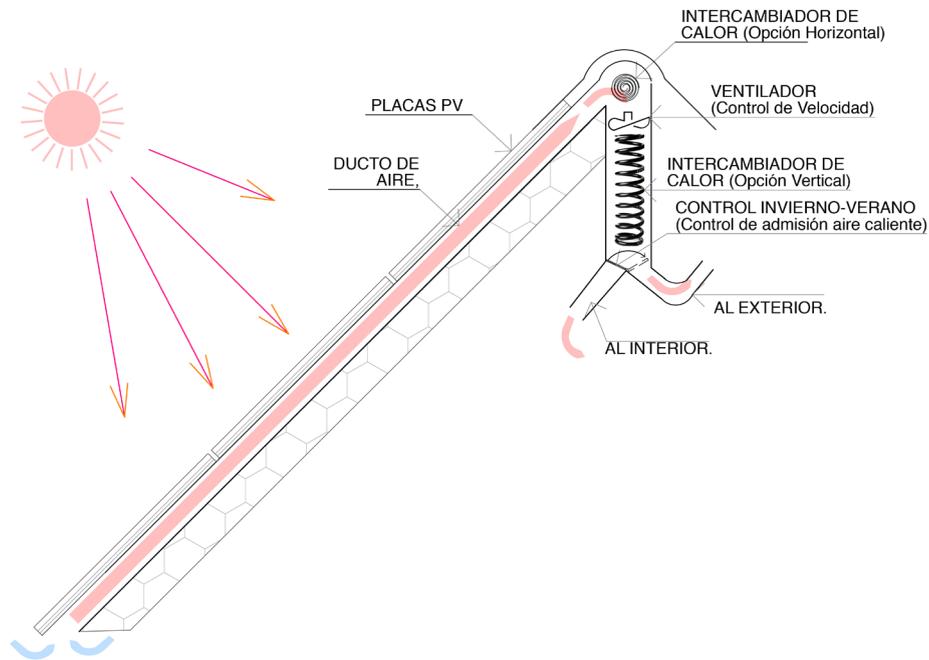


Figura 6: Esquema de detalle de funcionamiento de tecnología BIPVTa. Fuente: Hachem, 2012; Solarwall, 2015.

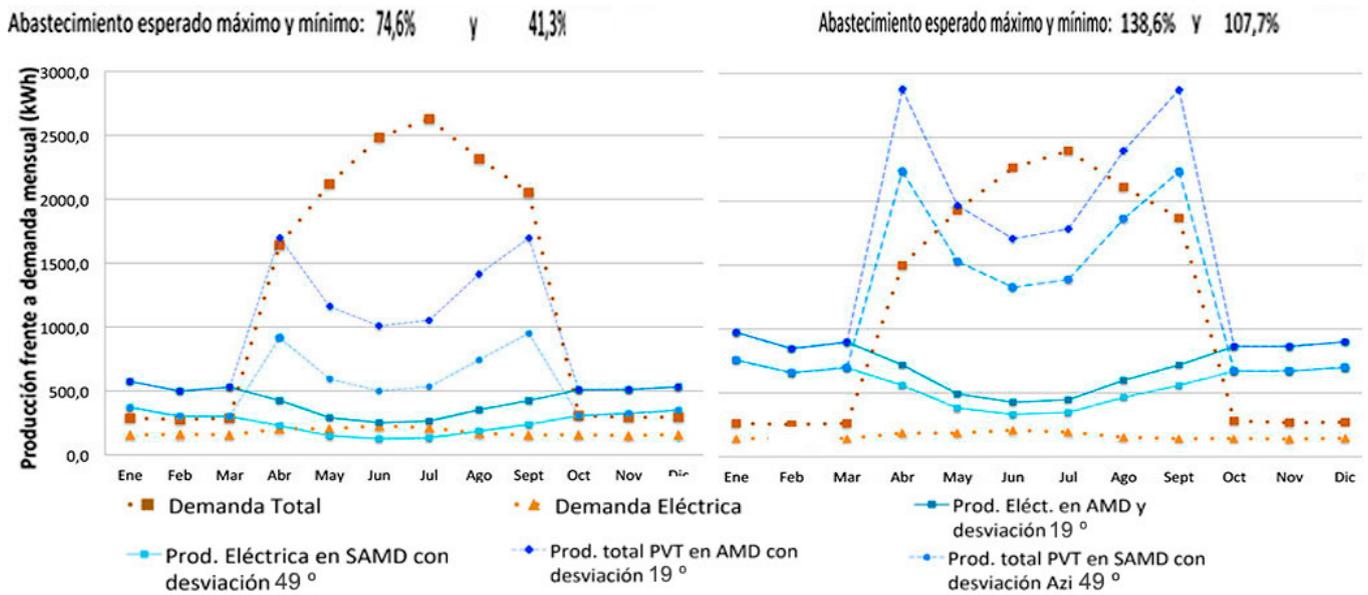


Figura 7. Producción-Demanda mensual en viviendas con SAMD y AMD extremos. Fuente: Elaboración propia

entre 30° y 60°, tomando como condición principal una inclinación de 45°. Siendo Q_e la energía eléctrica generada y Q_u el total de energía térmica, los estudios recién citados muestran una relación $Q_u/Q_e = 3,0$ a $3,5$ con condiciones adecuadas de velocidad de aire; y finalmente adoptan la condición $3Q_u=Q_e$. Se trata de un útil modelo simplificado para sistemas híbridos con aire para estimación. Cada instalación bajo condiciones de producción y demanda precisas tiene que ser revisada. La energía térmica desechada es trasladada en aire precalentado al interior de la vivienda cuando se requiere, lo cual da como resultado una disminución en la demanda de calefacción. Para la época estival se considera que el aire refrigerante es evacuado al ambiente o utilizado para el calentamiento de agua de uso sanitario a través de un intercambiador de calor aire-agua (Figura 6).

Con los márgenes mencionados, la tecnología híbrida puede aportar significativamente en los meses próximos al equinoccio (marzo-mayo y agosto-octubre) y contribuir marginalmente en invierno. El índice de producción promedio de todos los casos se estima en 142,6 kWh por m² de energía útil al año (incluyendo electricidad exportable). Respecto a la demanda promedio de 189,9 kWh / m², el margen de autoabastecimiento es de 75% en el caso promedio de vivienda (93,3 m²), en superficie captadora entre 36,8 y 28,4 de AMD y SAMD.

En casos extremos (Figura 1) -el modelo con mayor relación AMD por superficie construida y baja desviación (19°), frente a modelo con inferior potencial utilizando SAMD con alta desviación (49°)-, la producción del modelo superior abastecería alrededor del 92% de la demanda total, aunque el gráfico denota que parte de la producción está sobre la curva de demandas en abril. Por lo tanto, en tal caso puede esperarse un margen de entre 85% a 90% de la demanda total. El modelo con inferior condición abastece solamente el 41,3% de ella. Para cubrir la demanda eléctrica únicamente, se prevé, para el modelo superior, un autoabastecimiento de 317,1% anual frente al modelo inferior que se abastecería en 148,7% (Figura 7).

CONCLUSIONES.

Este trabajo entrega un método para pre-dimensionar, a escala urbana y en viviendas de emprendimientos masivos, la producción eléctrica fotovoltaica y térmica mediante indicadores de rendimiento estadísticos e indicadores de conjuntos de casas tipológicamente seriadas. El procedimiento también trabaja con la disposición y geometría de techumbres recurrentes a partir de supuestos generales de producción fotovoltaica y térmica más fotovoltaica.

Con este método se encuentra el potencial para generación eléctrica de un conjunto de viviendas unifamiliares, al cubrirse de fotocélulas su Ala de Mayor Dimensión (AMD) o su Segunda Ala de Mayor Dimensión (SAMD), según corresponda por orientación. Así, se determina que pueden generarse en total cerca de 19.792,4 MW al año, en una superficie urbana residencial de 906.783,38 m², a razón de 21,82 kW por m². Esto permite abastecer eléctricamente 2,5 veces el consumo total de las viviendas. En relación a la producción térmica más eléctrica, con colectores híbridos, se calcula un posible abastecimiento del 75,1% del total de energía doméstica, térmica y eléctrica conjunta con la actual configuración de techos.

En los casos extremos del conjunto analizado, al comparar demanda-abastecimiento, la vivienda con mayor potencial de captación AMD y desviación mínima (19° respecto al norte), comparado con el ejemplar con captación en SAMD y alta desviación (49°), se alcanza un abastecimiento eléctrico del 317,1% en el más favorable, y 148,7% el menos favorable. Es decir, todo el rango de viviendas puede captar una cantidad mayor que el propio consumo, y utilizarla con distribución local. En cuanto a demanda energética total, se puede cubrir desde el 43% (caso menor potencial) hasta entre 108 a 139% (caso superior potencial) aunque dependiente de adecuados sistema de almacenamiento, a través de recolección PVT híbrida y fluido de aire. No se toma en cuenta la posible utilización del exceso térmico estival, que podría ser aplicado en calentamiento de agua caliente sanitaria a través de intercambiador de calor, que podría incrementar el margen de abastecimiento térmico calculado.

Los datos entregados son generales y referenciales, a partir de demandas promedio esperadas. Las condiciones climáticas locales, más las características constructivas promedio, proporcionan estimados que sugieren un alto potencial, por lo que surge la necesidad de una exploración más detallada. Se requiere, en síntesis, de un análisis exhaustivo que disponga de simulaciones precisas, de sistemas constructivos puntuales, de información sobre la demanda y de tecnología de recolección solar específica, además de la construcción de prototipos que validen los resultados del presente estudio.

AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo es parte de programa de investigación Conicyt CONFIN AKA-ERNC 007, (Chile). Agradecemos también a la Secretaria de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación del Ecuador, SENESCYT y a la Universidad de Cuenca.

REFERENCIAS.

- ASTEA, Niccolò; DEL PEROA, Claudio y LEONFORTEA, Fabrizio. Optimization of solar thermal fraction in PVT systems. *Energy Procedia* [en línea], 2012, vol. 30, pp. 8–18. [Consultado 15 mayo 2016]. DOI 10.1016/j.egypro.2012.11.003.
- CÁMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCIÓN (CCHC). *Balance de la Vivienda en Chile* [en línea]. Santiago de Chile, 2014. [Consultado 9 mayo 2016]. Disponible en: <http://www.cchc.cl/uploads/archivos/archivos/Balance-de-la-Vivienda-2014.pdf>
- CASEN. *Reportes Estadísticos Comunales* [en línea], 2009. [Consultado 9 mayo 2016]. Disponible en: http://reportescomunales.bcn.cl/2012/index.php/Concepción#Poblaci.C3.B3n_total_2002_y_proyectada_2012_INE
- CORPORACIÓN DE DESARROLLO TECNOLÓGICO (CDT). *Sistemas Solares Térmicos* [en línea], CDT, 2007. [Consultado 15 mayo 2016]. Disponible en: <http://informatica.cdt.cl/documentos/publicaciones/index.php?opcion=publicaciones>
- CORPORACIÓN DE DESARROLLO TECNOLÓGICO (CDT). *Estudio de Usos Finales y Curva de Oferta de Conservación de la Energía en el Sector Residencial de Chile*. Santiago de Chile, 2010.
- CELIS, Flavio; GARCÍA, Rodrigo; TREBILCOCK, Maureen; ESCORCIA, Olavo y DÍAZ, Muriel. Análisis energético de las viviendas del centro-sur de Chile. *Arquiteturarevista*, 2012, vol. 8, pp. 62–75.
- CHARRON, Rémi y ATHIENITIS, Andreas. Design and Optimization of Net Zero Energy Solar Homes (AE). *ASHRAE Transaction*, 2006, vol. 112, pp. 285–296.
- CHOW, Tin Tai. A review on photovoltaic / thermal hybrid solar technology. *Applied Energy* [en línea], 2010, vol. 87, n° 2, pp. 365–379. [Consultado 20 mayo 2016]. DOI 10.1016/j.apenergy.2009.06.037.
- DIRECCIÓN DE OBRAS MUNICIPALES DE CONCEPCIÓN. Sistema de Catastro Municipal Electrónico [en línea], 2015. [Consultado 24 octubre 2015]. Disponible en: http://200.68.12.118/SigDom_comps/SigDom.phtml
- GAJBERT, Helena. *Solar thermal energy systems for building integration* [en línea]. Lund University, 2008. Disponible en: http://www.ebd.lth.se/fileadmin/energi_byggnadsdesign/images/Publikationer/Lic_avhandling_HG_G5_web.pdf
- HACHEM, Caroline, *Investigation of Design Parameters for Increased Solar Potential of Dwellings and Neighborhoods*. Concordia University, 2012.
- HASTINGS, S. Robert y WALL, Maria. *Sustainable Solar Housing: Volume 2 - Exemplary Buildings and Technologies*. London & Sterling VA: Earthscan, 2007.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), *Cities, Towns & Renewable Energy Cities, Towns* [en línea]. París: IEA/OECD, 2009. [Consultado 11 abril 2016]. Disponible en: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cities2009.pdf>

IEA SHC TASK 41, 2012, *Solar Energy in Architecture. Integration criteria and guidelines* [online]. Available from: <http://leso2.epfl.ch/solar/pdf/SolThePh.pdf>

IZQUIERDO, Salvador; RODRIGUES, Marcos y FUEYO, Norberto. A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar Energy*, 2008. vol. 82, n° 10, pp. 929–939.

KALOGIROU, Soteris. Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, vol. 30, pp. 231–295.

KUMAR, Rakesh y ROSEN, Marca. A critical review of photovoltaic-thermal solar collectors for air heating. *Applied Energy* [en línea], 2011, vol. 88, n° 11, pp. 3603–3614. [Consultado 15 mayo 2016]. DOI 10.1016/j.apenergy.2011.04.044.

LUKAČ, Niko y ŽALIK, Borut. GPU-based roofs' solar potential estimation using LiDAR data. *Computers and Geosciences*, 2013, vol. 52, pp. 34–41.

LUND, Peter. Large-scale urban renewable electricity schemes - Integration and interfacing aspects. *Energy Conversion and Management* [en línea], 2012, vol. 63, pp. 162–172. [Consultado 4 mayo 2016]. DOI 10.1016/j.enconman.2012.01.037.

MINENERGIA. *Norma Técnica que determina algoritmo para la verificación de la contribución solar mínima de los Sistemas Solares Térmicos acogidos a la franquicia tributaria de la Ley N° 20.365* [en línea]. 2009. Disponible en: http://antiguo.minenergia.cl/minwww/export/sites/default/02_Noticias/descargas_noticias/Norma_Tecnica_Actualizada.pdf

MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO (MINVU), *Proyectos de Tipo de Viviendas* [en línea]. 2012. Available from: http://www.minvu.cl/opensite_20111121172350.aspx

MUNARI, Cristina. *Architectural Integration and Design of Solar Thermal Systems*. ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, Switzerland, 2009. [Consultado 9 junio 2016]. Disponible en: <http://www.bisolnet.ch/Munari%20Probst-final.pdf>

OBSERVATORIO HABITACIONAL MINVU. *Estadísticas/Variación anual de unidades y superficie de viviendas* [en línea]. 2014. [Consultado 15 mayo 2016]. Disponible en: http://www.observatoriahabitacional.cl/opensite_20080122171157.aspx

OBSERVATORIO HABITACIONAL MINVU. *Viviendas unidades y superficie según mes y comuna 2002-2013-3* [en línea]. 2015. [Consultado 4 mayo 2016]. Disponible en: http://www.observatoriahabitacional.cl/opensite_20080122171157.aspx

PELLAND, Sophie y POISSANT, Yves. An Evaluation of the Potential of Building Integrated Photovoltaics in Canada. *Renewable Energy* [en línea], 2006, p. 8. [Consultado 6 marzo 2016]. Disponible en: http://canmetenergy-canmetenergie.nrcan-nrcan.gc.ca/fichier.php/codectec/En/2006-047/2006-047_OP-J_411-SOLRES_BIPV_new.pdf

SOLARWALL. *PV/Thermal; Hybrid Solar Heating + Electricity* [en línea]. 2015. [Consultado 3 marzo 2015]. Disponible en: <http://solarwall.com/en/products/pvthermal.phpSolarWall®>

WALL, Maria; MUNARI PROBST, Maria Cristina; ROECKER, Christian; DUBOIS, Marie Claude; HORVAT, Miljana; JØRGENSEN, Olaf Bruun y KAPPEL, Karin. Achieving solar energy in architecture - IEA SHC Task 41. *Energy Procedia* [en línea], 2012, vol. 30, pp. 1250–1260. [Consultado 3 marzo 2015]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610212016542>



MODELO SIMPLIFICADO PARA EL CÁLCULO DE ILUMINANCIA POR LUZ NATURAL ÚTIL (UDI) EN ESPACIOS INDIVIDUALES PERIMETRALES DE CIELOS CLAROS. CASO DE ESTUDIO: MENDOZA, ARGENTINA.

Artículo
Recibido 30-03-2016
Aceptado 01-05-2016

A SIMPLIFIED MODEL FOR CALCULATING THE USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE (UDI) IN INDIVIDUAL PERIMETER ROOMS UNDER CLEAR SKIES: A CASE STUDY IN MENDOZA, ARGENTINA.

JUAN MANUEL MONTEOLIVA
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) - Centro Científico Tecnológico Mendoza (CONICET)
Mendoza, Argentina
jmonteoliva@mendoza-conicet.gob.ar

ANDRÉS ACEÑA
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Cuyo - CONICET
Mendoza, Argentina
acena.andres@gmail.com

AYELÉN VILLALBA
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) - Centro Científico Tecnológico Mendoza (CONICET)
Mendoza, Argentina
avillalba@mendoza-conicet.gob.ar

ANDREA PATTINI
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) - Centro Científico Tecnológico Mendoza (CONICET)
Mendoza, Argentina
apattini@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

Una de las maneras más eficientes de reducir el consumo eléctrico por iluminación artificial, es a través del adecuado uso de la luz natural para la iluminación de espacios interiores. Sin embargo, las normativas vigentes que regulan el uso de la iluminación natural en espacios interiores se encuentran desactualizadas y en algunos casos no son sencillas de aplicar. Esto conduce a que los proyectistas no sean estimulados a buscar soluciones energéticamente eficientes que potencien el uso de la luz natural para iluminar espacios interiores durante las horas diurnas. El presente trabajo propone un modelo simplificado para el cálculo predictivo de la iluminancia por luz natural útil (UDI), para locales perimetrales individuales de cielos claros. Este modelo busca incorporar la precisión y validez de las simulaciones dinámicas en el estudio del comportamiento de la luz natural, a una herramienta de predicción sencilla y aplicable por profesionales en entornos reales.

Palabras clave

iluminación natural, diseño arquitectónico, legislación habitacional, ventanas, edificios de oficinas.

ABSTRACT

One of the most efficient ways to reduce the energy consumption of artificial lighting is through the proper use of daylight in indoor spaces. However, current regulations governing the use of daylight in indoor spaces are outdated and in some cases are not easy to apply. Thus, designers are not encouraged to seek energy efficient solutions that enhance the use of daylight to illuminate interior spaces during daytime hours. This paper proposes a simplified model for calculating the useful daylight illuminance (UDI) for individual perimeter rooms under clear skies. This model seeks to combine the precision and validity of dynamic simulations in the study of daylight, in a simple and appropriate prediction tool for professionals in real environments.

Keywords

daylighting, architectural design, housing legislation, windows, office buildings.

INTRODUCCIÓN.

A pesar de los avances alcanzados en el campo de la iluminación artificial, aún es difícil reducir el consumo de energía en los grandes edificios (Boubekri, 2006). Entre un 20% y un 30% del consumo eléctrico de los edificios no residenciales se destina a la iluminación artificial (Krarti, Erickson y Hillman, 2005). En Argentina, son efectivamente los sistemas de iluminación artificial los que generan el mayor consumo de energía en estas construcciones -no residenciales-. Le siguen los sistemas de refrigeración y, finalmente, los equipamientos de oficina -edificios comerciales y públicos- (Fundación Vida Silvestre Argentina, 2006). En este contexto, al cual se suman las crisis energéticas internacionales y nacionales, pasadas y actuales, se vuelve fundamental reflexionar nuevamente sobre esta problemática.

Una de las formas más eficientes de reducir el consumo eléctrico por iluminación artificial, es a través del adecuado uso de la luz natural para la iluminación de espacios interiores (Bodart *et al.*, 2008). En ciudades donde predomina el cielo claro (Mendoza, Argentina; Kharga, Egipto; Tennant Creek, Australia; Phoenix, Yuma y Tucson, Estados Unidos; entre muchas otras¹) y cuyo promedio anual es superior a las 2800 horas de sol, la radiación solar es un recurso sumamente útil en términos de eficacia luminosa²(Littlefair, 1985). En estas regiones la iluminación natural hace posible revertir parcialmente el consumo de energía eléctrica de los sistemas de iluminación artificial, y hasta, en algunos casos, prescindir de los mismos (Bodart y De Herde, 2002). Ello genera la necesidad de conocer con mayor precisión la cantidad de luz que ingresa a un edificio (Li *et al.*, 2004) con el objetivo de diseñar estrategias de iluminación natural eficientes adaptadas a la región (Monteoliva, Villalba y Pattini, 2015).

La última década ha sido testigo de grandes avances producidos en la forma de evaluar y analizar el comportamiento de la iluminación natural en el interior de los espacios. Esta nueva perspectiva denominada paradigma dinámico (Ochoa, Aries y Hensen, 2012), incorpora el uso de métricas dinámicas (Reinhart, Mardaljevic y Rogers, 2006) y la caracterización de cielos a partir del uso de archivos climáticos y modelos de distribución de luminancia de cielo (Perez, Seals y Michalsky, 1993); dejando de lado indicadores y métodos basados en el paradigma estático o *point-in-time* (Ochoa, Aries y Hensen, 2012). Sin embargo, estos avances y el cambio producido en el sector de la construcción a través del uso de técnicas de diseño sustentable, no están reflejados en los marcos normativos

vigentes. Esto conduce a que arquitectos, ingenieros y diseñadores de sistemas de iluminación híbridos -naturales y artificiales-, no sean estimulados a buscar soluciones eficientes (energéticamente) que potencien el uso de la luz natural para iluminar espacios interiores durante las horas diurnas (Monteoliva, 2014).

Existen dos aspectos que dificultan la aplicación de normas respecto al factor iluminación natural en códigos de eficiencia energética. En primer lugar, la iluminación natural es aún un recurso natural muy sub-explotado (Mardaljevic, 2006), por lo tanto, no es uno de los aspectos prioritarios en el diseño de edificios (Reinhart, 2002; Cantin y Dubois, 2011). En segundo lugar, toda evaluación, tanto pos-ocupacional como predictiva, requiere de una normativa o lineamiento de aplicación. No obstante, la compleja naturaleza de la fuente natural (sol) y su incidencia en el interior de los espacios dificultan alcanzar este objetivo.

Como consecuencia de la falta de regulaciones y en respuesta a las tendencias arquitectónicas, en la actualidad los edificios en altura tienden a presentar fachadas vidriadas en su totalidad. Esta situación resulta particularmente crítica en aquellas regiones con cielos claros (CIE, 2001), donde la gran cantidad de radiación solar incidente requiere un control por demás intensivo. Diversas investigaciones sostienen que un elemento clave en el diseño de edificios no residenciales de bajo consumo energético, es la selección del *área vidriada*. Esto genera que dicha *área* sea una de las variables principales a considerar en la regulación de los códigos de eficiencia energética, la cual deberá mantener un equilibrio entre lo suficiente y lo no excesivo; de manera que se permita la visión al exterior, se evite el exceso de ganancia radiativa (solar y visible) y, como consecuencia, se gane en confort térmico y visual (Dubois, Blomsterberg y Flodberg, 2011).

La ausencia de normativas o lineamientos de aplicación genera en los organismos de normalización desafíos basados en la búsqueda e incorporación de nuevos indicadores de evaluación dinámica del factor iluminación natural, aplicables de acuerdo a las características climáticas de cada región (Monteoliva y Pattini, 2013). Asimismo, estudios recientes muestran muchas carencias en el modelado y los procesos de simulación que hacen cuestionable por completo los procesos de diseño (Ibarra y Reinhart, 2009). Algunas de las principales insuficiencias limitaciones son: (i) interfaces gráficas

[1] Para mayor información visitar el sitio web Current results. Weather and sciences facts. (<https://www.currentresults.com/Weather-Extremes/sunniest-places-countries-world.php>)

[2] Eficacia luminosa es el cociente entre la iluminancia e irradiancia, y sus valores dependerán de la altitud del sol, de la nubosidad y de la concentración de aerosoles y vapor de agua en la atmósfera.

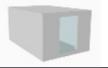
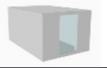
WWR (%)	15	17.5	20	22.5	25	27.5	30	32.5	35
tamaño (m ²)	1.8	2.1	2.4	2.7	3	3.3	3.6	3.9	4.2
horizontal (H)									
ancho (m)	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6	2.8
alto(m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
vertical (V)									
ancho (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
alto(m)	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6	2.8
escalar (E)									
ancho (m)	1.34	1.44	1.54	1.64	1.73	1.82	1.89	1.97	2.05
alto(m)	1.34	1.44	1.54	1.64	1.73	1.82	1.89	1.97	2.05

Tabla 1. Descripción geométrica de las áreas vidriadas estudiadas. Fuente: Elaboración del autor.

no pensadas en el usuario ni en los tiempos requeridos de aprendizaje, (ii) tiempos de cálculos extremadamente extensos, sobre todo en técnicas avanzadas, como el trazado de rayos o *raytracing*, y (iii) procesos de simulación muy complejos. En este escenario, surge la necesidad de disponer de indicadores que preferentemente no requieran de entornos de simulación para su predicción, y a la vez sean representativos del comportamiento dinámico de la luz natural. Esta nueva visión deberá contar necesariamente con la incorporación y compromiso de la ciencia y sus investigaciones.

En el marco de la problemática abordada, se propone aquí un modelo simplificado³ para el cálculo predictivo de la iluminancia por luz natural útil (UDI_{100-2000lx}) (Nabil y Mardaljevic, 2005 y 2006), para locales perimetrales individuales bajo condiciones de cielo claro (Mendoza, Argentina), a partir del conocimiento del área vidriada, la disposición y la orientación de las ventanas. De este modo, se busca aportar al corpus teórico con nuevas herramientas de evaluación dinámica de espacios iluminados por luz natural, sin la necesidad de recurrir a entornos de simulación.

MÉTODO.

DISEÑO EXPERIMENTAL.

A partir de un modelo virtual emplazado en la ciudad de Mendoza (Argentina) (32°53'00" S; 68°49'00" O), se calcula la iluminancia por luz natural útil (UDI_{100-2000lx}) para 324 condiciones; resultado de la combinatoria de las siguientes variables: (i) disposición de la ventana: horizontal (H), vertical (V) y escalar (E); (ii) área vidriada: 1.8m² (15% WWR⁴), 2.1m² (17.5% WWR), 2.4m² (20% WWR), 2.7m² (22.5% WWR), 3m² (25% WWR), 3.3m² (27.5% WWR), 3.6m² (30% WWR), 3.9m² (32.5% WWR) y 4.2m² (35% WWR) (Tabla 1); (iii) orientaciones: S 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, N 180°, 210°, 240°, 270°, 300°, 330°, definidas en grados de acuerdo al azimut de la ventana.

[3] Este trabajo forma parte de un proyecto para el desarrollo de guías de diseño de edificios energéticamente eficientes en la ciudad de Mendoza, Argentina, a cargo de integrantes del Grupo de Iluminación Natural del Instituto Nacional de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) – Centro Científico Tecnológico Mendoza (CCT Mendoza).

[4] El rango de window to wall ratio (WWR) seleccionado se basa en diversos trabajos científicos y normas que recomiendan que el área vidriada de un espacio debe mantenerse en un rango de 15 a 40% (Peter Lyons & Associates, 2008; U. S. Department of Energy, 2014; Dubois y Flodberg, 2013) para que los consumos de energía no se eleven, debido a la excesiva ganancia solar. En los climas soleados, especialmente, se recomiendan valores cercanos al 15%. Por supuesto que los valores recomendados varían de acuerdo a la orientación.

	<i>Transmitancia solar</i>	<i>Reflectancia solar</i>	<i>Transmitancia visible</i>	<i>Reflectancia visible</i>
<i>vidrio simple claro</i>	0.83	0.07	0.89	0.08

Tabla 2. Propiedades ópticas del vidrio seleccionado.
 Fuente: Elaboración del autor.

MÉTRICA DINÁMICA DE ILUMINACIÓN NATURAL ANALIZADA.

La métricadinámicamétrica dinámica de iluminación natural considerada en este trabajo es la iluminancia por luz natural útil o *useful daylight illuminance* (UDI), métrica que surge de la modificación del indicador de luz natural autónoma o *daylight autonomy* (DA), concebida por Nabil y Mardaljevic (2005). La selección de este indicador permite identificar el porcentaje de ocurrencia de iluminancias dentro de un determinado rango. El UDI consta de tres rangos de iluminancias: <100 [lx], 100-2000 [lx] y >2000 [lx], proporcionando créditos a los valores entre 100-2000 [lx], denominado "rango útil"; lo que sugiere que valores de iluminancia fuera de este rango "no son útiles". Para su medición se dispuso sobre el modelo virtual una grilla de 12 sensores a la altura del plano de trabajo ($h = 0.80$ m), con una distribución de 3 por 4 nodos.

SIMULACIONES DE ILUMINACIÓN NATURAL.

Modelo virtual. El espacio modelado corresponde a una oficina típica (6x4m; $h = 3$ m) con ventana unilateral centrada respecto del muro (0,0). La ventana inicial cuenta con una superficie vidriada de 1.8m², la cual va aumentando de acuerdo a las tres disposiciones (H, V y E) en intervalos de 0.3m², alcanzando un área máxima de 4.2m². La caracterización fotométrica de los materiales del espacio interior de las salas, se realizó de acuerdo a los valores típicos de reflectancia difusa: pared 60%, techo 80%, piso 30%. En la Tabla 2 se muestran los datos ópticos del vidrio seleccionado.

Parámetros de simulación. Las simulaciones de iluminación natural fueron desarrolladas en entorno RADIANCE (Ward y Shakespeare, 1998), integrado en la herramienta DIVA para Rhinoceros 3D (McNeel and Associates, 2010). DIVA es una herramienta de análisis predictivo dinámico del factor de iluminación natural y consumo energético (Jakubiec y Reinhart, 2012). Los parámetros de simulación empleados corresponden a una escena simple con elementos traslúcidos, transparentes y opacos; y sin elementos complejos de iluminación natural (Mardaljevic, 2000): (ab) 5; (ad) 1000; (as) 100; (aa) 0.1; (ar) 300; (dt) 0; (ds) 0.

Archivo de ocupación del espacio. Se generó un archivo de ocupación del espacio (*.occ) de acuerdo al horario de uso más frecuente de las oficinas ubicadas en edificios no residenciales de la ciudad de Mendoza: lunes a viernes de 9:00 a 17:00.



Figura 1. Imagen hemisférica del cielo de Mendoza, Argentina. Fuente: Fotografía del autor.



Figura 2. Estación de medición de iluminación natural del Instituto Nacional de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE), ubicado en el Centro Científico y Tecnológico Mendoza (CCT Mendoza). Fuente: Fotografía del autor.

Archivos climáticos. Como se ha indicado, la ubicación seleccionada para el caso de estudio fue la ciudad de Mendoza (Argentina) (32°53'00"S; 68°49'00"O). Esta ciudad se encuentra ubicada al oeste de la República Argentina en una región semi-árida, donde predomina el cielo claro (Figura 1). Esta condición de cielo ofrece el 83% del año días despejados o parcialmente despejados (Servicio Meteorológico Nacional Argentino para el período 1981-1990). Desde el punto de vista de la iluminación, Mendoza, como otras ciudades en el mundo, presenta valores de iluminancia global máximos medios de 90.000 lx en verano y de 30.000 lx invierno (Córca, 2009; Pattini 2009). El archivo de datos climáticos utilizado (ARG_MendozaCCT) corresponde a la ciudad de Mendoza (Argentina). Éste fue generado a partir de la información brindada por la estación de medición de Iluminación Natural del Instituto Nacional de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE), ubicado en el Centro Científico y Tecnológico Mendoza (CCT Mendoza) (32°53'S y 68°51'O) (Figura 2) (Monteoliva y Pattini, 2013; Monteoliva, Villalba y Pattini, 2014).

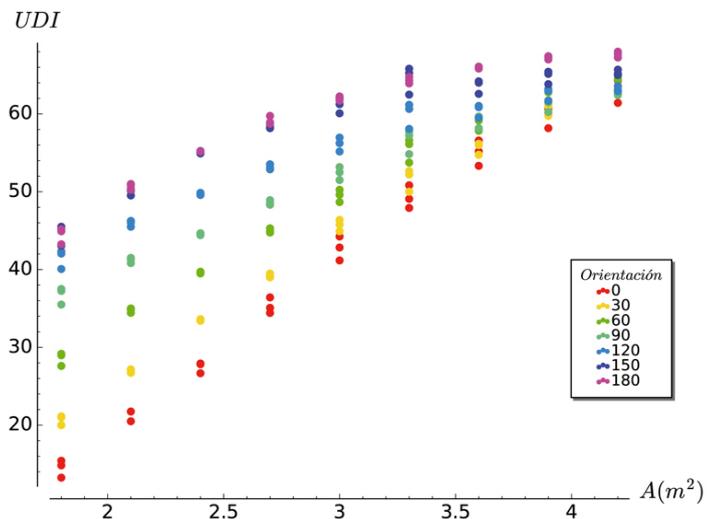


Figura 3. Gráfica de dispersión de los valores de UDI100-2000lx de acuerdo al área vidriada. Fuente: Elaboración del autor.

ANÁLISIS MATEMÁTICO.

El procesamiento de los datos fue desarrollado en el entorno de SAGE Math (<http://www.sagemath.org/>). Éste es un software matemático de código abierto con licencia GPL producido desde la base de diferentes paquetes existentes: NumPy, SciPy, matplotlib y sympy, entre otros. Luego del análisis de los datos, fue posible generar ecuaciones cuadráticas de ajuste de los distintos valores obtenidos del indicador ($UDI_{100-2000lx}$), con respecto al área vidriada en las diferentes orientaciones. Se calcularon, entonces, los errores asociados al ajuste, en particular, las desviaciones máximas entre el UDI simulado y el UDI ajustado. A partir de esos ajustes, y con la intención de completar el modelo, se llevó a cabo un ajuste de los coeficientes de las funciones cuadráticas como función de la orientación de la ventana. Dada la naturaleza angular de la orientación, se utilizó una aproximación de Fourier. Nuevamente, se analizaron los errores originados al utilizar la aproximación y, por último, se obtuvo una función predictiva del indicador UDI, gracias al conocimiento de la orientación y del área vidriada.

RESULTADOS.

En primera instancia, se analiza la dispersión de los valores de UDI, de acuerdo a las distintas disposiciones de la ventana, áreas y orientaciones (Figura 3). Como resultado de esta etapa, no se observan diferencias significativas entre las diversas disposiciones de la ventana (H, V y E) y los valores de $UDI_{100-2000lx}$, para una misma área vidriada y orientación de ventana. Debido a ello, se descarta del análisis la variable "disposición de la ventana". Asimismo, los valores obtenidos para las orientaciones este y oeste coinciden si el ángulo formado con el sur es el mismo, por lo tanto, el análisis se realiza en el rango de 0° a 180°.

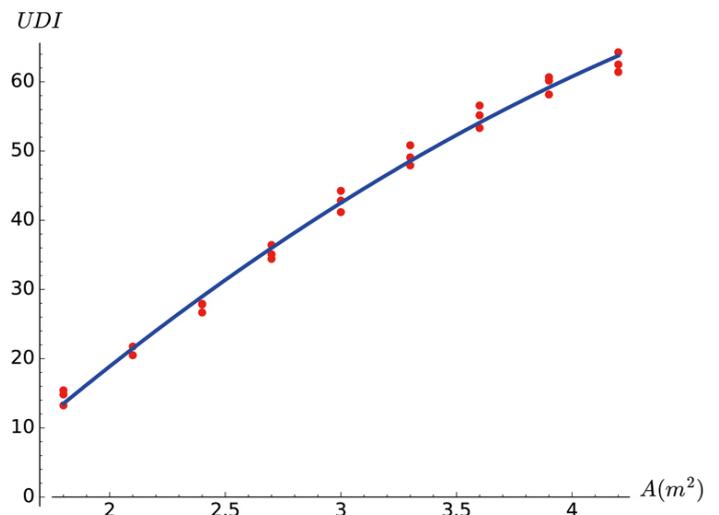


Figura 4. Datos y ajuste cuadrático para la orientación sur. Fuente: Elaboración del autor.

En principio, los datos por orientación están separados para analizar la dependencia entre el indicador UDI y el área vidriada. Se observa que en todos los casos el UDI aumenta al aumentar también el área vidriada (A), pero se trata de un incremento cada vez menor a medida que aumenta dicha área. Se concluye que un ajuste cuadrático resulta suficiente en todos los casos. Por consiguiente, una vez fijada la orientación, la expresión para el UDI queda definida de la siguiente forma:

$$UDI(A) = aA^2 + bA + c \quad (1)$$

Donde a , b y c son los coeficientes del ajuste cuadrático. En la Figura 4 se observan los datos y el ajuste cuadrático para la orientación sur. Los ajustes para las otras orientaciones son análogos.

Orientación	a	b	c	e
S 0°	-2.69	37.07	44.51	(e= ± 2.4)
30°-330°	-2.53	33.39	31.71	(e= ± 1.8)
60°-300°	-2.32	29.28	16.79	(e= ± 2)
E-O 90°-270°	-1.97	22.99*	- 1.41	(e= ± 2)
120°-240°	-2.84	26.21	3.36	(e= ± 2.2)
50°-210°	-4.60	35.93	5.06	(e= ± 2.4)
N 180°	-4.15	34.33	3.47	(e= ± 1.6)

Tabla 3. Valores de a, b y c para las distintas orientaciones.
 Fuente: Elaboración del autor.

En la Tabla 3 se observan los coeficientes de los ajustes cuadráticos generados para los diferentes valores de $UDI_{100-2000lx}$ obtenidos para cada una de las orientaciones definidas 0°, 30°-330°, 60°-300°, E-O 90°-270°, 120°-240°, 150°-210°, 180°. Asimismo, se calculan los errores (e) cometidos con el ajuste, siendo estos las desviaciones máximas y mínimas entre los valores de UDI simulados y ajustados. Las curvas de los ajustes se presentan en la Figura 5. Como resultado de este procedimiento, es posible predecir el valor del indicador (UDI) de acuerdo al área vidriada para cada una de las orientaciones. Por ejemplo, tomando el caso de la orientación N 180° y un área vidriada de 2m², el valor de UDI estimado es del 49% (línea naranja). Sin embargo, si la misma ventana estuviera orientada al sur 0°, para alcanzar un valor similar de UDI, el área vidriada debería ser de 3.3m² (línea azul) (Figura 5).

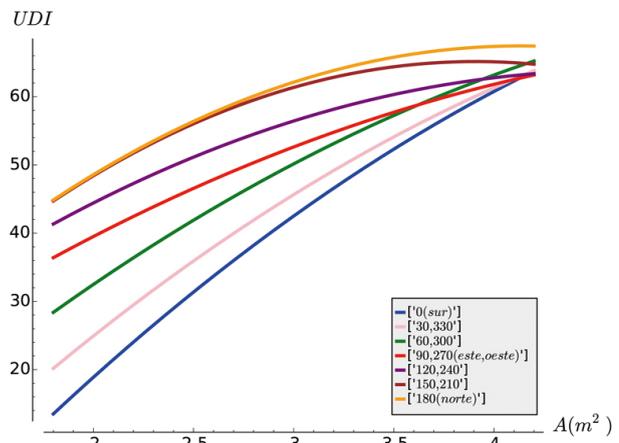


Figura 5. Curvas de ajustes obtenidos de $UDI_{100-2000lx}$ de acuerdo al área vidriada y la orientación. Fuente: Elaboración del autor.

Si bien los ajustes encontrados representan un avance en el desarrollo del modelo matemático, todavía no se ha incorporado la dependencia angular del UDI en el mismo. Para esto, y dado que el ajuste cuadrático resulta satisfactorio para la dependencia con respecto al área, se busca ajustar los coeficientes a, b y c. En el siguiente paso se va a considerar que los coeficientes a, b y c son funciones de la orientación (θ), de modo que la fórmula a emplear es la siguiente:

$$UDI(A,\theta)=a(\theta) A^2+b(\theta)A+c(\theta) \quad (2)$$

Dada la naturaleza angular de la orientación, para realizar el ajuste de los coeficientes se utilizan funciones trigonométricas. De esta manera, se consideran los primeros términos, en lo que sería la expansión de Fourier de los coeficientes. Cabe señalar que también se tiene conocimiento de que la función es par con respecto a la orientación sur, por lo que sólo es necesario considerar los términos que contienen cosenos. Así, los coeficientes quedan expresados de la siguiente forma:

$$a(\theta)=a_0+a_1\cos(\theta)+a_2\cos(2\theta)+a_3\cos(3\theta), \quad (3)$$

$$b(\theta)=b_0+b_1\cos(\theta)+b_2\cos(2\theta)+b_3\cos(3\theta), \quad (4)$$

$$c(\theta)=c_0+c_1\cos(\theta)+c_2\cos(2\theta)+c_3\cos(3\theta). \quad (5)$$

En la Tabla 4 se detallan los valores encontrados para el ajuste y en las Figuras 6, 7 y 8 se muestran dichos ajustes. Con esto se completa el modelo. Al realizar el cálculo de errores para tal modelo, se obtienen errores máximos de ±3. Se analiza, asimismo, la respuesta al utilizar ajustes con distinto número de términos para los coeficientes a, b y c. Si se emplea un término más en la expansión de Fourier (5 términos), se obtienen errores de ±2.5, que constituye el rango de errores en los ajustes sin la orientación. Con 3 términos, los errores son de ±4, y con 2 términos, de ±5. Finalmente, se resuelve usar el modelo con 4 términos, ya que permite un adecuado ajuste sin extender demasiado la cantidad de coeficientes empleados.

	0	1	2	3
<i>a</i>	-2.91	0.87	-0.74	0.02
<i>b</i>	30.42	0.57	6.22	-0.22
<i>c</i>	-12.08	-18.39	-12.24	-0.63

Tabla 4. Valores encontrados para el ajuste de los coeficientes *a*, *b* y *c*.
 Fuente: Elaboración del autor.

3.1. *Resumen del Modelo.* A partir de los resultados obtenidos para conocer el UDI correspondiente a una cierta área vidriada (*A*) y cierta orientación (θ), primero se utilizan las ecuaciones 3, 4 y 5 para calcular los coeficientes *a*, *b* y *c* correspondientes a la orientación θ , utilizando los coeficientes dados en la Tabla 4. Luego, se emplea la fórmula 2 para obtener el UDI de acuerdo al área vidriada. A continuación, se expone un ejemplo para el cálculo del UDI de un espacio orientado a 160° con un área vidriada (*A*) de 3.2m².

$$a(160^\circ) = -2.91 + 0.87\cos(160^\circ) - 0.74\cos(2 \times 160^\circ) + 0.02\cos(3 \times 160^\circ) = -4.30$$

$$b(160^\circ) = 30.42 + 0.57\cos(160^\circ) + 6.22\cos(2 \times 160^\circ) - 0.22\cos(3 \times 160^\circ) = 34.76$$

$$c(160^\circ) = -12.08 - 18.39\cos(160^\circ) - 12.24\cos(2 \times 160^\circ) - 0.63\cos(3 \times 160^\circ) = -3.86$$

$$UDI(3.2, 160^\circ) = -4.30 \times 3.2^2 + 34.76 \times 3.2 - 3.86 = 63$$

DISCUSIÓN

La naturaleza dinámica de la luz natural genera espacios lumínicamente dinámicos que no pueden ser caracterizados por un valor absoluto o instantáneo en el tiempo. El dinamismo propio de la luz natural, en términos de intensidad y temperatura de color (Monteoliva, Villalba y Pattini, 2014), dificulta su predicción y, con ello, su prescripción cuantitativa y cualitativa. Esto vuelve compleja la generación de un marco regulatorio para el factor 'iluminación natural' en espacios interiores. Si bien, como fue mencionado, esta problemática ha sido resuelta desde el campo de la simulación en entornos virtuales -paradigma dinámico-, aún no existen propuestas de indicadores para normativas regionales que no requieran de procesos de simulación y, de esa forma, faciliten el trabajo de profesionales proyectistas en campo.

El modelo generado es válido para espacios reducidos -no es aplicable en plantas abiertas- y en niveles superiores de los edificios o en bajas densidades urbanas. En escenarios de alta densidad urbana, las condiciones de iluminación se deben diferenciar en los niveles inferiores y superiores de los edificios (Córica, 2009; Villalba, 2014), en particular, en la

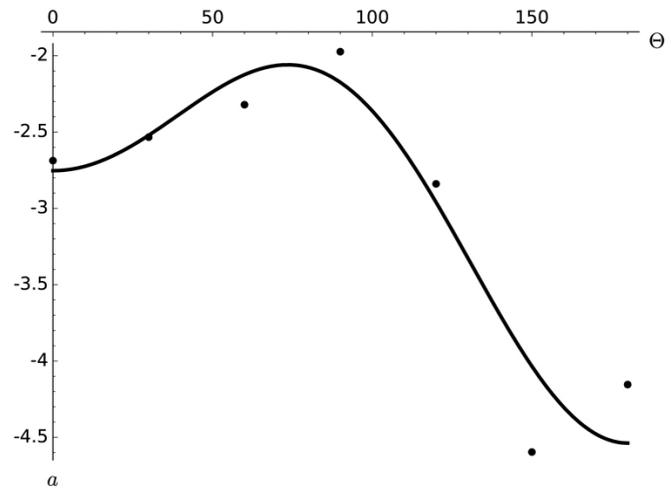


Figura 6. Curva de ajuste obtenida de los valores *a* para las distintas orientaciones. Fuente: Elaboración del autor.

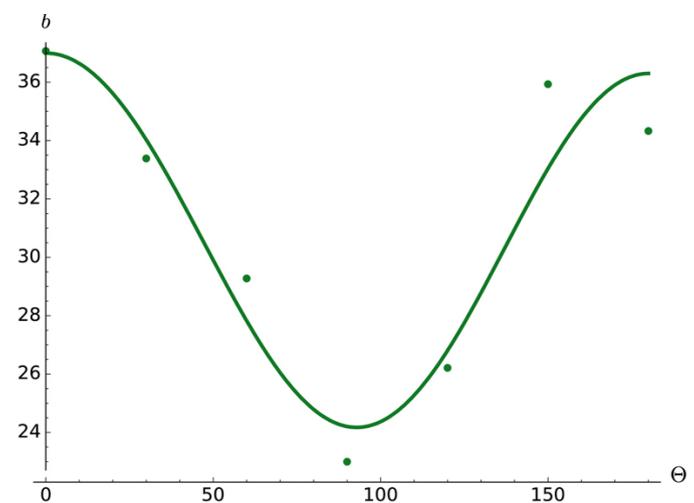


Figura 7. Curva de ajuste obtenida de los valores *b* para las distintas orientaciones. Fuente: Elaboración del autor.

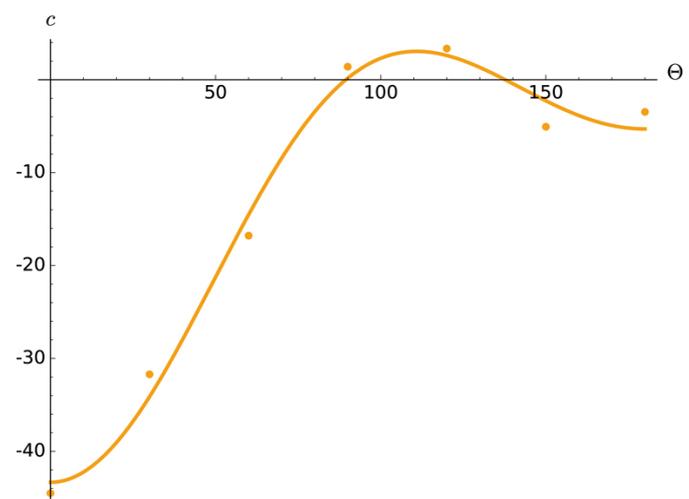


Figura 8. Curva de ajuste obtenida de los valores *c* para las distintas orientaciones. Fuente: Elaboración del autor.

ciudades “oasis” (ciudad de Mendoza, Argentina, Figuras 9 y 10). En ellas, el *árbol* es el elemento de mitigación y de control ambiental estacional y el efecto de sombra es proyectado por estos túneles naturales consolidados por el bosque-urbano (Córica, 2009). Esto provoca que, durante el periodo estival, las fachadas norte, que se ubican por debajo de la copa de los forestales, no reciban radiación solar visible directa; mientras que las ubicadas por encima de la copa, sufran exposición solar directa. Asimismo, en periodos invernales, por la característica perenne de los forestales típicos de la región estudiada, la fachada norte se ve expuesta a sectores de luz difusa y a otros de luz directa, según el perfil de la fachada enfrentada y la altitud solar. Por otro lado, la fachada sur muestra niveles de iluminancia por debajo de los recomendados para ambas estaciones, ya que permanece en condición de sombra y no hay incidencia de radiación solar directa en los periodos de uso estudiados (Córica, 2009). Estas particularidades destacan la importancia de emplear un modelo sensible a las orientaciones y de diferenciar las recomendaciones de acuerdo al entorno urbano y a la disponibilidad de radiación solar de cada región. De igual modo, es importante considerar aspectos que tienen que ver con la conformación de los espacios interiores, tales como las oficinas de plantas abiertas y las reflectancias de las superficies interiores. A partir de las limitaciones mencionadas, se originan nuevos desafíos basados en la incorporación al modelo de nuevos indicadores y variables de análisis.

CONCLUSIÓN

El presente trabajo propone un modelo simplificado para el cálculo predictivo de la iluminancia por luz natural útil ($UDI_{100-2000lx}$), a partir del conocimiento del área y la orientación de la ventana, en locales perimetrales individuales de cielos claros, cuyos errores absolutos obtenidos son menores al $\pm 3\%$. Este modelo busca integrar la precisión y validez de las simulaciones dinámicas en el estudio del comportamiento de la luz natural, a una herramienta de predicción sencilla y aplicable por profesionales en entornos reales. Es decir, se persigue ayudar a profesionales proyectistas sin dejar de lado la rigurosidad metodológica y potencial predictivo de los simuladores dinámicos.

Si bien resulta de interés incorporar nuevos parámetros al modelo propuesto, los resultados obtenidos son claramente alentadores hacia el objetivo de la sustentabilidad ambiental. Como es de conocimiento general, la relación existente entre la disponibilidad de la luz natural y el ahorro en los consumos energéticos es estrecha. Por este motivo, se aspira a contribuir a nuevas normativas regionales que promuevan el uso de la fuente natural para la iluminación de espacios interiores. De lograr este objetivo, se estará ayudando a concientizar sobre la aplicación y beneficios de espacios energéticamente eficientes, a través del adecuado uso de la iluminación natural.



Figura 9. Ciudad “oasis” de Mendoza. Fuente: Fotografía del autor.
 Fuente: Figura realizada por el autor



Figura 10. Diferentes condiciones de acceso a la luz natural por encima y por debajo de la copa de los forestales. Fuente: Fotografía del autor.
 Fuente: Figura realizada por el autor

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

BODART, Magali y DE HERDE, André. Global energy savings in office buildings by use of daylighting. *Energy and Buildings*, 2002, vol. 34, n° 5, pp. 421-429.

BODART, Magali; DE PEÑARANDA, Rodrigue; DENEYER, Arnaud y FLAMANT, Gilles. Photometry and colorimetry characterisation of materials in daylighting evaluation tools. *Building and Environment*, 2008, vol. 43, n° 12, pp. 2046-2058.

BOUBEKRI, Mohamed: An Overview of the Current State of Daylight Legislation. *Human and Environment Systems*, 2006, vol. 7, n° 2, pp. 57-63.

CANTIN, François y DUBOIS, Marie-Claude. Daylighting metrics based on illuminance, distribution, glare and directivity. *Lighting Research and Technology*, 2011, vol. 43, pp. 291-307.

CIE DS 011.1/E-2001. Spatial distribution of daylight - CIE standard general sky, Draft standard, CIE Central Bureau Vienna, 2001.

CÓRICA, Lorena. *Comportamiento de la Luz Natural en Entornos Urbanos Representativos del Modelo Oasis en Regiones Áridas. Caso de estudio: Ciudad de Mendoza*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Tucumán, 2009.

DUBOIS, Marie-Claude; BLOMSTERBERG, Ake y FLODBERG, Kajsa. Towards zero energy office buildings in Northern Europe: Preliminary results of daylighting simulations. En: *SB11 Helsinki World Sustainable Building Conference*. Helsinki, Finland, 2011, pp. 18-21.

DUBOIS, Marie-Claude y FLODBERG, Kajsa. Daylight utilization in perimeter office rooms at high latitudes: Investigation by computer simulation. *Lighting Research and Technology*, 2013, vol. 45, issue 1, pp. 52-75.

Fundación Vida Silvestre Argentina (FVSA). *Reducir emisiones ahorrando energía: escenarios energéticos para la Argentina (2006-2020) con políticas de eficiencia*. Buenos Aires: Fundación Vida Silvestre Argentina, 2006.

IBARRA, Diego y REINHART, Christoph. Daylight factor simulations ¿How close do simulation beginners really get? En: *Proceeding of the Eleventh International IBPSA Conference*. Glasgow, Scotland, 2009, pp. 196-203.

JAKUBIEC, Alstan y REINHART, Christoph. The 'adaptive zone'. A concept for assessing glare throughout daylight spaces. *Lighting Research and Technology*, 2012, vol. 44, pp. 149-170.

KRARTI, Moncef; ERICKSON, Paul y HILLMAN, Timothy. A simplified method to estimate energy savings of artificial lighting use from daylighting. *Building and Environment*, 2005, vol. 40, n° 6, pp. 747-754.

LI, Danny; LAM, Joseph; LAU, Chris y HUAN T.W. Lighting and energy performance of solar film coating in air-conditioned cellular offices. *Renewable Energy*, 2004, vol. 29, n° 6, pp. 921-937.

LITTLEFAIR, Paul. The luminous efficacy of daylight: a review. *Lighting Research and Technology*, 1985, vol. 17, n° 4, pp. 162-182.

LYONS, Peter & Associates. *Building Energy Consultants Report to Australian Building Codes Board on Optimum Window Size for Energy Efficiency: BCA Volume One*. Australia, 2008.

MARDALJEVIC, John. *Daylight simulation: validation, sky models and daylight coefficients*. Tesis Doctoral, Montfort University, 2000.

MARDALJEVIC, John. Examples of climate-based daylight modelling. En: *Proceedings of CIBSE National Conference 2006: Engineering the Future*. London: Oval Cricket Ground, 2006, pp. 1-11.

MCNEEL, Robert and Associates. *Rhinoceros Version 4.0*. Service Release, 2010.

MONTEOLIVA, Juan. *La dinámica de luz natural en cielos claros y su incidencia en el rendimiento atencional de los alumnos. Iluminación en aulas*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Tucumán, 2014.

MONTEOLIVA, Juan y PATTINI, Andrea. Iluminación natural en aulas. Análisis predictivo dinámico del rendimiento lumínico-energético en clima soleados. *Ambiente construido* 2013, vol. 13, n° 4, pp. 235-248.

MONTEOLIVA, Juan; VILLALBA, Ayelén y PATTINI, Andrea. Uso de dispositivo de control solar en aulas: impacto en la simulación dinámica de la iluminación natural. *Ambiente Construido*, 2014, vol. 14, n° 3, pp. 43-58.

MONTEOLIVA, Juan; VILLALBA, Ayelén y PATTINI, Andrea. Estudio dinámico regional de la iluminación natural en espacios interiores. *AREA*, 2015, n° 21, pp. 9-19.

NABIL, Azza y MARDALJEVIC, John. Useful daylight illuminance: A new paradigm to access daylight in buildings. *Lighting Research and Technology*, 2005, vol. 37, pp. 41-59.

NABIL, Azza y MARDALJEVIC, John. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings*, 2006, vol. 38, pp. 905-913.

OCHOA, Carlos; ARIES, Myriam y HENSEN, Jan. State of the art in lighting simulation for building science: A literature review. *Journal of Building Performance Simulation*, 2012, vol. 5, n° 4, pp. 209-233.

PATTINI, Andrea. *La luz natural en las escuelas: aprovechamiento y control de la luz solar en aulas*. Buenos Aires: Dunken, 2009.

PEREZ, Richard; SEALS, Robert y MICHALSKY, Joseph. All-weather model for sky luminance distribution- preliminary configuration and validation. *Solar Energy*, 1993, vol. 50, n° 3, pp. 235-245.

REINHART, Christoph. Effects of interior design on the daylight availability in open plan offices. En: *Proceedings of the ACEEE Summer Study on Energy Efficient Buildings*. Pacific Grove, CA, US, 2002, pp. 1-12.

REINHART, Christoph; MARDALJEVIC, John y ROGERS, Zack. Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. *LEUKOS*, 2006, vol. 3, n° 1, pp. 7-31.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Advanced Energy Design Guides: Office Buildings*. US, 2014.

VILLALBA, Ayelén. *Control de luz solar directa en la envolvente edilicia en climas soleados. Su impacto en el consumo diario de energía eléctrica para iluminación en edificios no residenciales de ciudad oasis*. Tesis Doctoral: Universidad Nacional de Tucumán, 2014.

WARD, Greg y SHAKESPEARE, Rob. *Rendering with Radiance: the art and science of lighting visualization*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1998.



QUALIDADE DO AR INTERNO (QAI) EM UMA ESTAÇÃO CIENTÍFICA NA ANTÁRTICA: IDENTIFICAÇÃO DE FONTES DE POLUIÇÃO E ESTRATÉGIAS DE CONTROLE.

Artículo
Recibido 18-03-2016
Aceptado 01-05-2016

INDOOR AIR QUALITY (IAQ) IN A RESEARCH STATION IN ANTARCTICA: IDENTIFICATION OF POLLUTION SOURCES AND CONTROL STRATEGIES.

ÉRICA COELHO PAGEL

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil
erica.pagel@gmail.com

CRISTINA ENGEL DE ALVAREZ

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil
cristina.alvarez@ufes.br

NEYVAL COSTA REIS JÚNIOR

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil
neyval@inf.ufes.br

RESUMEN

As estações científicas na Antártica configuram situações reais de funcionamento de um edifício, o que as torna um potencial objeto na investigação da Qualidade do Ar Interno (QAI). Neste contexto, o presente trabalho diagnosticou as principais fontes de contaminação aérea, baseado em dados previamente coletados na Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) e determinou estratégias de controle da QAI para edificações brasileiras antárticas. Essas estratégias foram incorporadas ao projeto de reconstrução da EACF, necessário após o incêndio em fevereiro de 2012 que destruiu o corpo principal da Estação. Dentre os pontos positivos propostos pelo novo projeto, em relação à qualidade do ar interno, tem-se a implantação por blocos, um sistema de renovação de ar eficiente e a preocupação na especificação de materiais com baixa emissão de compostos orgânicos voláteis (COV). A setorização dos blocos possibilitou o parcelamento das funções, o que evitou o cruzamento de fontes de poluição aérea nos ambientes habitáveis. No entanto, em função das características de confinamento de uma estação científica Antártica, a especificação de materiais que incluam colas e resinas, mesmo certificadas, ainda assim é preocupante para a saúde humana.

Palabras clave

Qualidade do Ar Interno, fontes internas, edificações Antárticas.

ABSTRACT

The research stations in Antarctica present real building operation situations, which makes them potential objects for the investigation of Indoor Air Quality (IAQ). In this context, this paper identifies the main air pollution sources based on data previously collected at the Brazilian Comandante Ferraz Antarctic Station (EACF) and determines IAQ control strategies for Brazilian Antarctic buildings.

These strategies were incorporated into the EACF reconstruction project after a fire in February 2012 destroyed the main section of the station. Among the most important points proposed by the new project in relation to indoor air quality were the implementation of blocks, an efficient air exchange system, and the specification of materials with low Volatile Organic Compound (VOC) emissions. The construction of the building in blocks based on function avoided the crossing of air pollution from service areas to habitable environments. However, due to the confined characteristics of an Antarctic research station, the specification of materials containing adhesives and resins, even those that are certified, is still a concern for human health.

Keywords

Indoor Air Quality, indoor sources, Antarctic buildings.

INTRODUÇÃO

A Qualidade do Ar de Interiores tornou-se um tema de grande relevância na literatura científica nos últimos 35 anos, sendo recentemente considerado como um importante parâmetro de conforto ambiental em inúmeros estudos de Qualidade do Espaço Construído (Dérbez et al., 2014). O ar dentro das edificações é contaminado por uma variedade de poluentes que podem chegar a níveis de concentração cinco vezes maiores do que ao ar livre, gerando efeitos adversos à saúde que podem ser mais sérios do que exposições em exteriores de cidades industrializadas (Crook e Burton, 2010).

Atividades humanas, tais como cozinhar, varrer, fumar, usar cosméticos, materiais de limpeza, de higiene pessoal, acender incensos e velas, assim como o funcionamento de sistemas de aquecimento, guarda e trânsito de veículos, a própria presença humana e outras atividades estão diretamente relacionadas com a contribuição de elevados níveis de concentração de poluentes dentro das edificações (Weschler, 2009).

Da mesma forma, os materiais de construção têm-se mostrado como sendo responsáveis pela emissão de até 40% dos poluentes internos do edifício, podendo algumas dessas emissões ter um curto tempo de vida no ambiente e outras se manifestando por longos períodos (Missia et al., 2010). Uma das principais fontes de emissão de poluentes é a utilização de resinas aderentes na composição de produtos de madeira industrializada. Mobiliários, produtos de acabamento, revestimentos e elementos de decoração são fontes de emissão de substâncias químicas, principalmente de compostos orgânicos voláteis, tais como, formaldeído, benzeno e tolueno.

A legislação nacional e internacional em vigor acerca dos níveis permitidos de poluentes internos é deficitária, não apresentando um critério claro de regulamentação. Muitos países ainda não apresentam padrões nacionais e, em sua maioria, as regulamentações se restringem a locais específicos, como ambientes climatizados, industriais ou hospitalares. Além disso, verifica-se uma ampla variação do conjunto de poluentes abordados entre os órgãos regulamentadores. A Organização Mundial da Saúde - OMS, desenvolveu diretrizes para qualidade do ar interno para serem usadas em meios não industriais (WHO, 2010), entretanto, para o conjunto de contaminantes abordados, a OMS estabelece apenas diretrizes e não um padrão obrigatório, cabendo a cada país instituir o seu.

A Estação Antártica Comandante Ferraz - EACF localiza-se na Baía do Almirantado, Ilha Rei George, Antártica. Em 25 de fevereiro de 2012 houve um incêndio de grandes proporções que destruiu as edificações que compunham o corpo principal da Estação fazendo com que o Programa Antártico Brasileiro - PROANTAR, promovesse um concurso internacional para a escolha do projeto e posterior construção das novas edificações da EACF,

visando, entre outros aspectos relacionados ao conceito de sustentabilidade, a preocupação com a qualidade do ar interior (Instituto de Arquitetos do Brasil, 2013). As instalações existentes antes do incêndio permitiam a estadia de um grupo de aproximadamente 65 pessoas entre civis e militares por períodos que variavam de um mês a um ano de permanência. O projeto para as novas edificações prevê a ocupação máxima no inverno de 34 pessoas e, no verão, de 64 usuários entre civis e militares.

É perceptível a pouca importância dada para os aspectos inerentes à QAI na construção de Estações Científicas na Antártica, mesmo considerando o caráter de confinamento da maioria dos ambientes, em virtude das características ambientais de clima extremo no continente. Essa característica acaba por determinar a concepção de arquiteturas enclausuradas, longos períodos de permanência da sua população em seu interior e o desenvolvimento de potenciais fontes de poluição atmosférica oriundas do próprio funcionamento da edificação.

Desta forma, a preocupação com a saúde dos ocupantes fez com que esse parâmetro fosse incluído pela primeira vez como diretriz projetual das novas edificações brasileiras na Antártica. Além disso, o novo projeto também deve minimizar o impacto humano, já que a Antártica é uma área do planeta com seu habitat natural preservado e o crescimento das atividades humanas a partir da implantação de várias estações pode influenciar a composição da atmosfera em escala local (Mishra et al., 2004).

Pagel et al. (2012; 2016) associou a emissão de contaminantes aéreos com prováveis fontes no ambiente interno. Este artigo apresenta o diagnóstico de um dos principais problemas de QAI constatados nas antigas instalações da Estação Antártica Comandante Ferraz através de estudos e medições *in loco* desenvolvidos por Pagel et al. (2012; 2016). Esses resultados formaram a maior parte das diretrizes de controle da qualidade do ar, publicadas no Termo de Referência (TR) da licitação pública internacional – na forma de concurso de projetos – para as novas edificações da EACF (Instituto de Arquitetos do Brasil, 2013). Além disso, esse trabalho apresenta o levantamento dos principais pontos de melhoria alcançados pelo novo projeto de arquitetura da EACF, assim como levanta alguns questionamentos de pontos que ainda podem ser melhorados na nova construção em relação à qualidade do ar.



Figura 1. Vista externa frontal da “antiga” EACF em janeiro de 2012.

CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

A “ANTIGA” ESTAÇÃO ANTÁRTICA COMANDANTE FERRAZ

A Estação Antártica Comandante Ferraz (LAT 62°05'S; LONG 58°24W) foi fundada em 6 de fevereiro de 1984 inicialmente composta por oito contêineres metálicos e uma área total de 150m² podendo abrigar até 12 pessoas. Durante os anos seguintes, devido ao crescimento do número de pesquisas, a Estação sofreu diversas reformas e ampliações, descaracterizando a construção por contêineres (Alvarez *et al.*, 2007). Até fevereiro de 2012, a EACF contava com um corpo principal único com cerca de 2500 m² (**Figura 1**). Internamente a Estação possuía diversos ambientes que atendiam a seus usuários, alguns com calefação e outros não. De forma geral, estes ambientes possuíam um sistema deficiente para a renovação do ar, e quando possível, as janelas eram os elementos mais utilizadas como mecanismo de controle.

COLETA DE DADOS

Os dados para o diagnóstico e identificação das fontes de poluição interna da antiga edificação principal da EACF foram levantados durante a XXX Operação Antártica, operacionalizada pela Marinha do Brasil e pela Força Aérea Brasileira no período denominado como verão antártico – quando ocorre a maior ocupação da Estação –, especificamente entre os dias 13 de janeiro a 04 de fevereiro de 2012. Foram feitos monitoramentos da concentração de material particulado e COV em onze ambientes internos, selecionados de forma a representar os espaços com maior permanência e com possíveis fontes de poluição. Os equipamentos utilizados, procedimentos de coleta, análise e discussão dos resultados desses poluentes foram descritos por Pagel *et al.* (2012; 2016).

Estes ambientes foram agrupados da seguinte forma: 1) locais dotados de calefação, representados por três espaços de uso geral (Sala de estar, Biblioteca e Academia); espaços de uso íntimo (Alojamento do Arsenal, Camarotes 10 e 21); e espaços de serviço (Cozinha). 2) locais sem calefação, compostos por quatro ambientes de serviço (Carpintaria, Incinerador, Garagem e a área de transição entre os setores de operação denominada “Ferrazão”).



Figura 2. Representação gráfica do novo projeto da EACF. Fonte: Estudio41, 2013.

De acordo com o método proposto (The European Standard, 2006) foram registradas as condições de ventilação, os materiais de construção, as últimas reformas, os mobiliários, equipamentos e as condições de cada ambiente. As atividades dos usuários e o horário das suas realizações no ambiente também foram relatadas. Foi contabilizado o número de ocupantes, presença ou não de fumo e registrados os produtos de limpeza, frequência de utilização, cuidado com limpeza e manutenção dos mobiliários e cosméticos manipulados.

O PROJETO DA NOVA ESTAÇÃO

O projeto vencedor do concurso para as novas edificações brasileiras na Antártica foi o da equipe “Estudio41”, com sede em Curitiba, Brasil. A concepção obedeceu rigorosamente ao Termo de Referência (TR), elaborado por uma equipe multidisciplinar e interinstitucional, cujo conteúdo enfatizava a necessidade de soluções tecnologicamente adequadas às exigências ambientais, à segurança e à cultura nacional (Alvarez *et al.*, 2013).

A implantação foi organizada em blocos de até dois pavimentos, resultando em uma área total de 3.952 m² (Figura 2) englobando usos semelhantes e capacidade ampliada em relação ao antigo corpo principal da EACF. Houve um substancial ganho de área principalmente no setor de laboratórios, uma vez que, um dos principais objetivos da existência da Estação é a pesquisa científica.

METODOLOGIA

A análise dos dados e informações coletadas foi dividida em três etapas:

diagnóstico e identificação das principais fontes de emissão de contaminantes aéreos baseado nas medições realizadas na antiga Estação Antártica Comandante Ferraz;

síntese das principais estratégias de controle de QAI;

análise dos aspectos positivos e negativos propostos no novo projeto da Estação brasileira em relação à QAI.

DIAGNÓSTICO

A Figura 3 destaca dentre os ambientes onde foi feito o monitoramento da concentração de poluentes aéreos (Pagel *et al.*, 2012;2016); aqueles em que foram localizadas as principais fontes de contaminação do ar interno na edificação principal da antiga EACF. A maior parte dos problemas encontrados foi associada aos materiais construtivos e à falta de setorização física entre as atividades de trabalho e áreas de convivência da Estação.

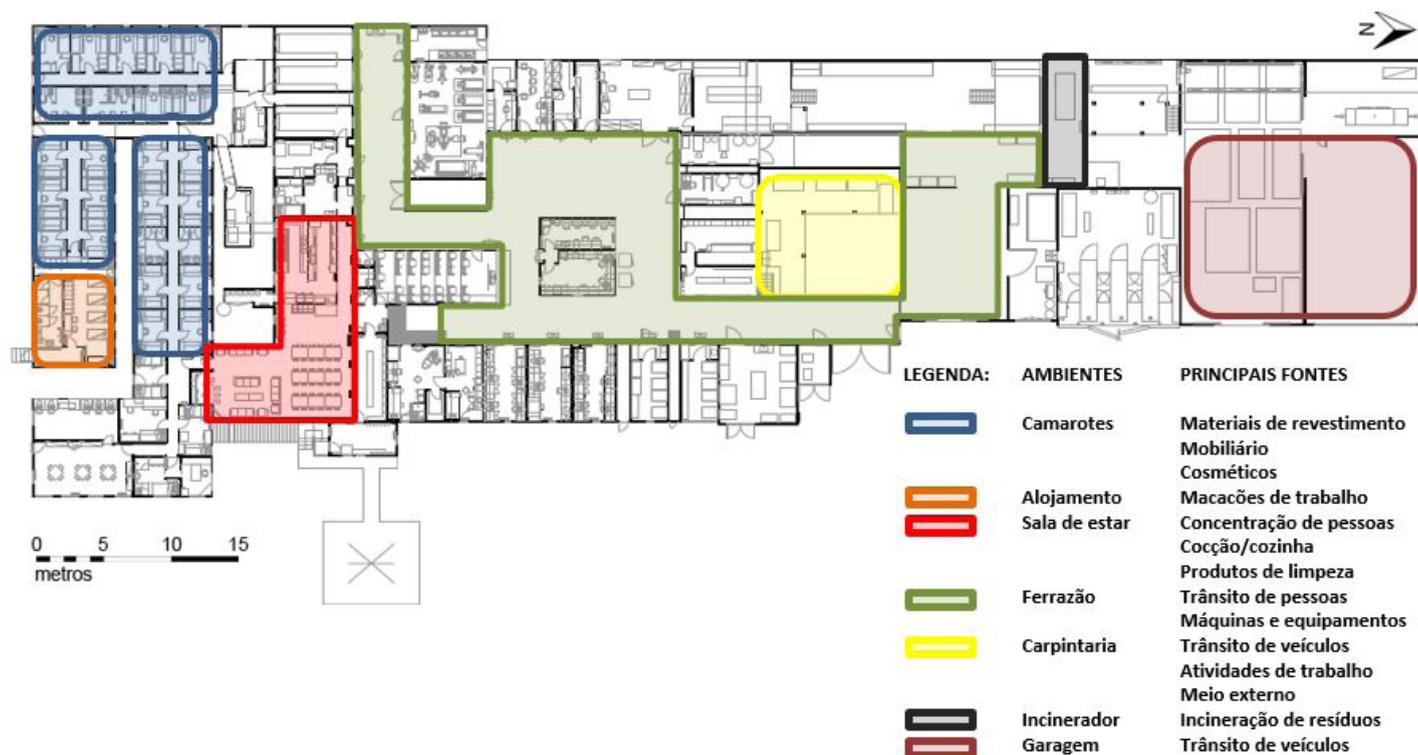


Figura 3. Planta baixa da "antiga" EACF com destaque para suas respectivas fontes de contaminação do ar.

Os Camarotes caracterizam-se por serem ambientes pequenos e de permanência prolongada, principalmente, no horário noturno, justificando a maior preocupação em relação à qualidade do ar interior. As principais fontes nesses ambientes provêm da presença de materiais de revestimento e acabamento com alta emissividade de COV, sendo o mais perigoso deles o formaldeído, tais como pisos laminados e mobiliários em MDF (Missia *et al.*, 2010). Observou-se que a ausência de banheiros privativos faz com que a utilização de produtos de uso pessoal neste pequeno espaço seja uma fonte potencial de poluição, principalmente quando associada a um sistema de renovação de ar deficiente. Conforme Weschler (2009), esses produtos têm evoluído o seu número de fragrâncias incluindo uma complexa quantidade de compostos orgânicos voláteis, embora ainda tenham notavelmente uma menor atenção como contaminantes internos. Por se tratarem de espaços muito pequenos e que permanecem a maior parte do tempo com suas portas e janelas fechadas, permitem que a infiltração de poluentes provindos de outras partes da Estação fique por mais tempo retidos no ar do ambiente, considerando a baixa taxa de renovação do ar.

No Alojamento do Arsenal - caracterizado por ser um dormitório de até 16 pessoas em um único espaço -, a presença da sala de secagem dos macacões de trabalho integrada com a ala de dormitório mostrou-se como uma fonte de contaminação de COV absolutamente indesejável

para um ambiente de permanência prolongada. A Sala de Estar por ser o ambiente de maior utilização da Estação, por si só já apresenta uma maior concentração de pessoas como potencial fonte de contaminação do ambiente. A presença humana e suas respectivas atividades ocupacionais são um dos maiores contribuintes para a poluição do ar em ambientes fechados, não apenas pela liberação de dióxido de carbono através da respiração ou de substâncias químicas pela transpiração, mas também pelo transporte de microorganismos, tais como bactérias, fungos, vírus e ácaros (Brickus e Aquino Neto, 1999), bem como, a ressuspensão da poeira do chão devido a movimentação de pessoas.

A integração deste espaço com o ambiente da cozinha, associado também ao fato de um sistema de renovação de ar deficiente, indicaram uma potencial contaminação de COV e material particulado principalmente provinda da atividade de cocção. Outro ponto peculiar desse ambiente é a limpeza rotineira após cada refeição – minimamente, três vezes ao dia -, que faz com que contaminantes provindos destes produtos químicos sejam uma preocupante fonte de poluição do ar (Weschler, 2009).

No ambiente denominado "Ferrazão", localizavam-se as câmaras de refrigeração e estocagem de mantimentos, ocasionado um trânsito esporádico de veículos, principalmente em dias de carga e descarga. É importante citar que os veículos utilizados em Ferraz são movidos a gasolina comum e a óleo diesel, o que os tornam potenciais

CONTAMINANTES	PRINCIPAIS FONTES DE EMISSÃO	PADRÃO QAI BRASIL (ANVISA, 2003)	PADRÃO QAI PORTUGAL (SCE, 2009)	DIRETRIZ QAI OMS (WHO, 2010)
Formaldeído	Mobiliário e revestimento, cosméticos produtos de limpeza	-	100 µg/m ³	100 µg/m ³
Material Particulado Total	Movimentação de pessoas e veículos, cocção, incineração de resíduos, produtos com sprays	80 µg/m ³	-	-

Quadro 1. Contaminantes e principais fontes de emissão de poluentes aéreos na EACF, limites máximos admissíveis pelo Padrão da QAI no Brasil, em Portugal e pelas diretrizes da OMS.

fontes de contaminantes perigosos à saúde humana. Nessa área havia também máquinas e equipamentos a óleo diesel o que provavelmente contribuiu na concentração de poluentes aéreos detectados nesse local.

A Carpintaria caracteriza-se por ser uma área de trabalho principalmente pelo Arsenal de Marinha e pelo Grupo Base de militares, com atividades de soldagem, pintura, marcenaria e outras, características de manutenção e de obras civis da Estação. Essas atividades específicas do setor foram detectadas como potenciais fontes de emissão de poluentes, principalmente de material particulado.

A presença do Incinerador de lixo dentro do corpo principal da Estação, contíguo às áreas de permanência, mostrou que, contaminantes específicos, presentes em partículas fugitivas emitidas por essa atividade, contribuem na elevação da concentração de poluentes em outros ambientes da Estação. Da mesma forma, contaminantes característicos da combustão veicular foram detectados na área da Garagem.

Já a Biblioteca e a Academia não apresentaram concentrações significativas de COV e material particulado, que pudessem ser passíveis de correção, provavelmente por não possuírem fontes internas de poluição do ar, associado ao fato de serem locais mais isolados e de ocupação esporádica pelos usuários.

O **Quadro 1** mostra os contaminantes, suas principais fontes de emissão e os limites máximos de concentração para esses poluentes estabelecidos, por exemplo, por países como Brasil e Portugal, além dos limites de exposição recomendados pela OMS, uma vez que o continente Antártico não possui Padrões específicos de qualidade do ar de interiores.

ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DA QUALIDADE DO AR

O **Quadro 2** mostra uma síntese das principais estratégias de controle da QAI (Instituto de Arquitetos do Brasil, 2013) direcionadas a reconstrução das novas edificações brasileiras na Antártica e que devem ser adotados nas fases de projeto, construção e operação da edificação. Destaca-se que a maior parte desses métodos, em função especificamente dos resultados desse estudo, fizeram parte da seção de critérios e diretrizes relacionados à qualidade do ar interior descritas no TR da licitação do concurso de projetos da nova EACF.

As Estações Científicas na Antártica são construções que podem ser comparadas ao funcionamento de uma cidade de pequeno porte e suas respectivas fontes de contaminação do ar. Possuem aspectos inerentes ao funcionamento de edificações residenciais, no que se diz respeito às áreas de habitação, alimentação e recreação; assim como aspectos de edificações de trabalho, com áreas administrativas e laboratórios, e até mesmo, aspectos de edificações industriais, com áreas, por exemplo, de tratamento de esgoto, resíduos, fornecimento de água e geração de energia. Adicionalmente não se pode esquecer o fato da presença veicular, mesmo que mínima, mas necessária ao desenvolvimento das atividades das Estações.

Em se tratando de um conjunto de métodos de controle da QAI que atenda a um edifício tão multifuncional quanto o da Estação, levando ainda em conta o clima extremo do local, algumas das estratégias utilizadas comumente em outros meios – como, por exemplo, a ventilação natural direta – deve ser descartada, mas um sistema eficiente de renovação de ar deve ser priorizado. A eliminação ou redução de potenciais fontes pode ser alcançada por uma setorização dos espaços assim como pela utilização de materiais e equipamentos com baixa ou zero emissividade.

ETAPA	MÉTODOS DE CONTROLE
Projeto	<ol style="list-style-type: none"> 1. Setorização dos ambientes de acordo com sua função, principalmente na separação física entre os locais de habitação, trabalho e industriais. 2. O layout construtivo deve ser desenvolvido de maneira a minimizar o tráfego de veículos no interior da Estação. 3. Seleção de materiais com baixa ou zero emissividade, principalmente de cloro, bromo, compostos orgânicos voláteis (COV), fibras, material particulado e demais gases comprovadamente nocivos à saúde humana. Preferencialmente, especificar os materiais que possuam essa classificação por testes de emissões e programas de avaliação de certificação. 4. Evitar ou minimizar a especificação de revestimentos – piso, parede e teto –, e mobiliários que possuam colas, adesivos ou resinas para sua fixação e que possam emitir COV no ambiente ao longo da sua vida útil. 5. Minimizar a especificação de produtos derivados de materiais como PVC e outros plásticos, borrachas e outros materiais flexíveis por serem produtos petroquímicos de difícil degradação (Keeler e Burke, 2010). 6. Evitar especificar produtos com retardantes de chamas brominados e halogenados, principalmente o cloro e determinados halogênios bromados usados em fios de tecido de estofamento (Keeler e Burke, 2010). 7. Evitar especificar materiais fibrosos ou que possam emitir pequenas partículas nocivas ou não a saúde humana tais como lãs de vidro, lãs de rocha, amiantos e fibras minerais. 8. Evitar tintas a óleo e esmaltes sintéticos, assim como, tintas e vernizes que contém metais, priorizando utilizar tintas, solventes, laqueados e vernizes, à base de água ou ecológicos que possuem um menor nível de emissão de poluentes no ar, principalmente de COV. 9. Privilegiar a especificação de materiais com boa durabilidade e menor exigência de limpeza. 10. Especificar materiais que minimizem o crescimento de fungos, bactérias e acúmulo de umidade, assim como, evitar materiais muito porosos tais como veludos e carpetes para revestimento e estofamentos de mobiliário. 11. Prever sistema de ventilação e renovação de ar eficiente de forma a garantir a taxa de renovação mínima recomendada pela ANVISA RE N°9/2003 para ambientes climatizados e pela ASHRAE Standard 62/2001, que estabelece a taxa de ventilação aceitável para QAI, incluindo um sistema de climatização que garanta a filtragem e limpeza do ar ambiente, caso necessário. 12. Os sistemas de ventilação para a cozinha devem seguir a NBR 14518. Deverão ser instaladas sobre a área de cocção, coifas metálicas com geometria apropriada ou sistema semelhante. 13. Adotar um sistema de cortina de ar nas aberturas externas das áreas de serviço, e que possam ficar a maior parte do tempo abertas, de forma a evitar a entrada da poeira do solo externo.
Construção	<ol style="list-style-type: none"> 1. Considerar a construção como sequência do projeto, respeitando a instalação de materiais certificados com baixa emissão de poluentes e evitar uso de adesivos, colas e selantes tóxicos, minimizando o acúmulo de contaminantes durante a obra. 2. Vedar externamente a edificação visando dar estanqueidade ou minimizar a entrada de ar e infiltração de água no seu interior.
Operação	<ol style="list-style-type: none"> 1. Estabelecer um plano de manutenção e limpeza periódica dos filtros e sistemas de climatização. 2. Adotar métodos limpos de cocção tais como assar e grelhar em lugar de frituras com óleo. 3. Adotar materiais de limpeza não tóxicos e com baixa emissividade comprovada. 4. Recomendar aos habitantes o uso de produtos de higiene pessoal e cosméticos livres de aerodisperssóis, além da recomendação da utilização desses produtos em local de permanência não prolongada, tais como banheiros e vestiários. 5. Proibir a atividade de fumo internamente ao edifício. 6. Minimizar o uso de motores de combustão interna em veículos, máquinas e equipamentos nas proximidades da Estação substituindo, sempre que possível, por tecnologias mais limpas com fontes de energia renovável. Se necessária a utilização do diesel, adotar produto com baixo teor de enxofre. 7. Estabelecer um plano de monitoramento contínuo da QAI.

Quadro 2. Síntese das principais estratégias de controle da QAI.

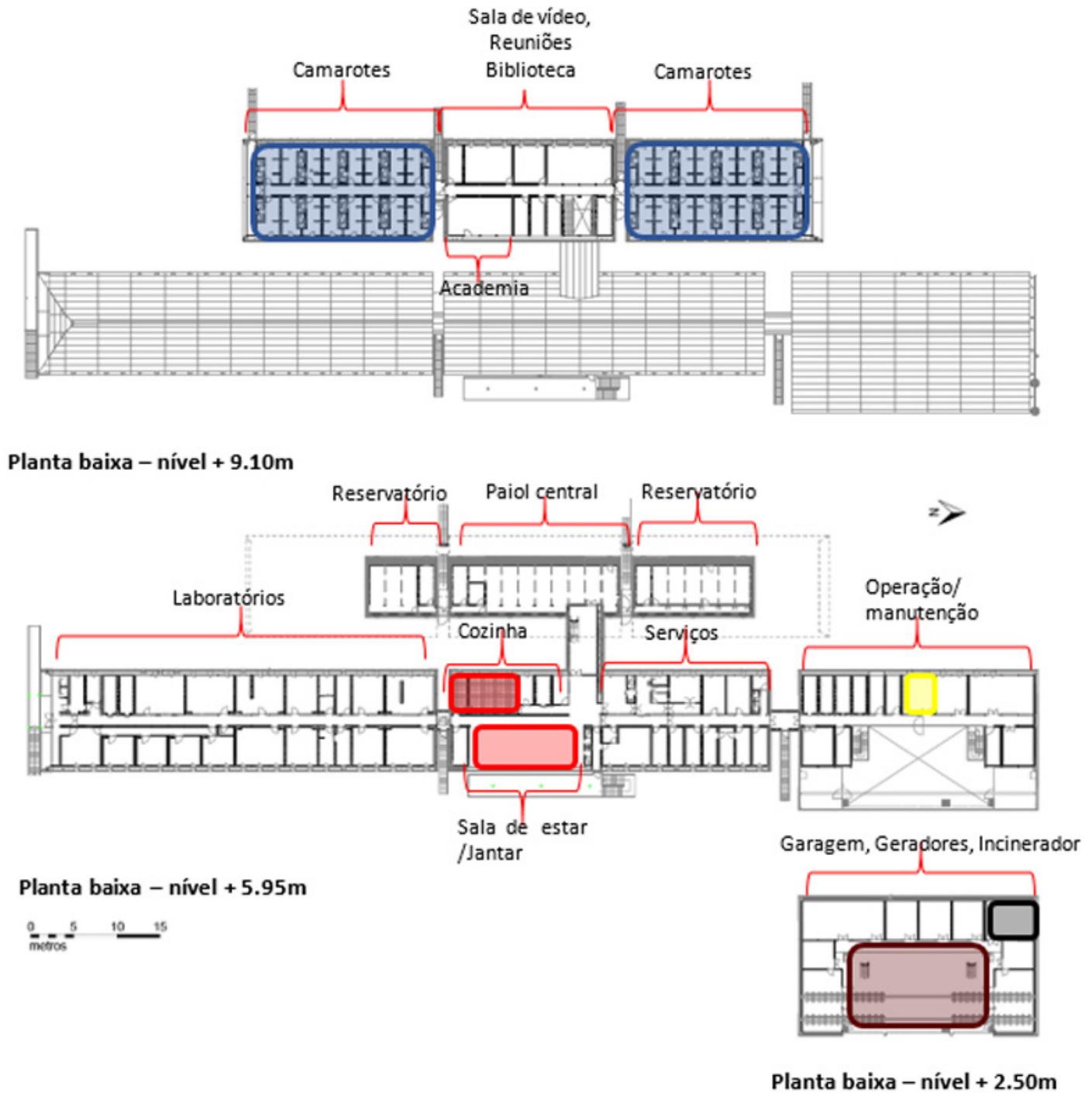


Figura 4. Plantas baixas do projeto da nova EACF destacando a nova setorização dos ambientes considerados com potenciais fontes de poluição aérea na antiga Estação.

ANÁLISE DO NOVO PROJETO PARA A EACF

Dentre os pontos positivos alcançados pelo projeto vencedor, no que se diz respeito à melhoria da qualidade do ar de interior têm-se a implantação das novas edificações da EACF organizada em blocos funcionais que distribuem os usos. O bloco superior é destinado às atividades privativas e sociais – tais como Camarotes, Sala de vídeo, Reuniões, Biblioteca e Academia – enquanto o bloco inferior concentra as zonas de Laboratórios (ala Sul), o setor de Operação/Manutenção (ala Norte) e ao centro localiza-se os setores de Serviço, a Cozinha e a Sala de Estar/Jantar. No setor de Operações/Manutenção, foi destinada uma área para as Garagens, Geradores e área de Incineração, conforme se mostra na Figura 4.

Salienta-se que foi extinto o ambiente do Alojamento do Arsenal e a sala de secagem de macacões de trabalho – considerando que as novas edificações serão mais eficientes e com menor necessidade de manutenção –, sendo propostos, em sua maioria, apenas Camarotes com banheiros privativos, o que pode minimizar o impacto da utilização dos produtos de higiene e cosméticos nesse pequeno espaço de permanência prolongada. As salas de secagem se restringiram a duas localizações comuns: próxima à entrada externa da Sala de Estar e próxima à entrada externa dos Laboratórios. Devido a nova setorização por blocos funcionais também se eliminou o espaço de transição de pessoas e veículos conhecido como “Ferrazão”.

A Cozinha, embora próxima a Sala de estar, devido à funcionalidade conjunta de ambas, não é mais integrada a este espaço, o que favorece uma menor contaminação do ar interno através das atividades de cocção juntamente com um sistema de exaustão de coifa eficiente. Outro ponto positivo no novo *layout* é a não existência de áreas de trânsito interno de veículos, sendo os acessos principais às garagens e paióis feitos diretamente pelo exterior. Observa-se, ainda, a solução dada à área de Garagens, Geradores e Incineração, caracterizados pela presença de potenciais fontes poluidoras, que ficou localizada abaixo do bloco de operações, com acesso independente e mais afastada do corpo principal social da Estação.

Deve ser destacada em relação à melhoria da QAI, a proposta de um sistema de renovação de ar eficiente. Normalmente, concomitante à necessária renovação do ar visando à garantia de sua qualidade está associado um aumento no consumo energético com aquecimento. A solução adotada em projeto foi reduzir o impacto do ar externo na temperatura interior através de seu preaquecimento, uso de materiais como forros e revestimentos que diminuem o número de partículas em suspensão, e utilização de sensor de concentração de CO₂, para que haja a possibilidade de reduzir a taxa de renovação conforme a concentração de CO₂ no ambiente (Antunes, 2013).

Para garantir a temperatura e a umidade do ar adequada com baixo consumo energético, foram previamente definidos perfis de temperaturas para cada ambiente, agrupando o programa de necessidades na planta e seguindo três fatores fundamentais: temperatura necessária, ocupação ao longo do dia e sazonalidade de ocupação dos espaços, considerando que no verão, a Estação é muito mais ocupada do que no restante do ano. O continente antártico não possui indicadores de aceitabilidade dos parâmetros de conforto ambiental. Na legislação brasileira, a Resolução nº9 (ANVISA, 2003) determina que a faixa recomendável de temperatura, nas condições internas, deverá variar de 23 a 26°C e de 20 a 22°C para o verão e inverno brasileiro respectivamente. Em relação à faixa recomendável de operação da umidade relativa do ar, a legislação determina que a faixa seja variável de 40% a 65% e de 35% a 65%, para o verão e inverno brasileiro respectivamente; e o valor máximo recomendável de operação da velocidade do ar, na região de influência da distribuição do ar deve ser menor que 0,25 m/s.

Ambientes como laboratórios e parte dos camarotes, quando não ocupados, por exemplo, podem ser mantidos durante o inverno em uma temperatura por volta de 5°C, ou o suficiente para prevenir o congelamento de tubulações e danos aos materiais construtivos. Áreas técnicas sem ocupação também não necessitam manter temperaturas adequadas ao conforto humano, sendo previsto o aquecimento somente para o adequado funcionamento dos equipamentos (Antunes, 2013).

Em relação à especificação dos materiais construtivos, é de realçar que houve preocupação na especificação de materiais com zero emissão ou baixa emissão de substâncias químicas, certificadamente comprovada através de selos ecológicos (**Quadro 3**). Embora vários fatores acerca dessas certificações dos materiais sejam ainda questionáveis, por exemplo, por haver uma grande diferença entre as emissões de um material monitorado individualmente em câmaras de teste laboratoriais e sob as condições reais de operação de um edifício (Keeler e Burke, 2010), a seleção de materiais de baixa emissividade é hoje um importante avanço no que se refere à qualidade do ar interno. Embora seja indiscutível o importante avanço para a QAI das novas edificações em relação ao existente anteriormente, um aspecto a ser considerado é o grande quantitativo de revestimentos e mobiliários compostos ou previstos de serem fixados com resinas, colas ou adesivos, principalmente, os laminados melamínicos. Mesmo considerando o grande avanço na qualidade dessas resinas pelas indústrias, esses adesivos ainda são uma das principais fontes aéreas de substâncias químicas perigosas a saúde humana (Missia *et al.*, 2010).

O diesel continua sendo o combustível base nos veículos e no funcionamento da nova EACF, principalmente na geração de energia, devido ao seu baixo ponto de congelamento, prevendo-se a instalação dos sistemas alternativos de forma gradual (Alvarez *et al.*, 2013).

LOCAL	REVESTIMENTOS	AMBIENTES
Piso	Carpete em fibras de Nylon (100%), livre de PVC, fixadas sobre base vinílica com adesivo de baixo odor e zero emissão de COV	Camarotes, Sala de vídeo, Reuniões, Biblioteca, Circulações
	Pisos emborrachados em manta de 2mm/3mm colados sobre contrapiso, com certificação ecológica de baixa emissão de substâncias químicas	Ambientes em geral: Sala de Estar, Academia, Banheiros, Laboratórios, Setor de Serviços, Operações/Manutenção, Paióis, Incinerador
	Cerâmica 30x30cm extrudada antiderapante	Cozinha
	Piso intertravado de concreto	Garagem, Praça de máquinas, Geradores
Parede	Parede em gesso com aditivo de fibras incombustível revestida com pintura acrílica acetinada	Camarotes, Sala de vídeo, Reuniões, Biblioteca, Academia, Setor de Serviços, Operações/ Manutenção, Incinerador, Paióis
	Laminados melamínicos fixados sobre as chapas de gesso com cola de aplicação	Banheiros, Laboratórios, Cozinha
	Painel de madeira tipo Cumaru, acabamento em verniz marítimo à base de resina alquídica	Biblioteca, Circulação da Sala de Estar
Forro	Forro em gesso revestido com pintura acrílica	A maior parte dos ambientes exceto áreas técnicas, câmaras frigoríficas, Praça de Máquinas
Mobiliário	Compensado naval revestidos com laminado melamínico	Laboratórios
	Mobiliário de MDF com pintura poliuretânica Selo E-1 (baixa emissão de formaldeído)	Camarotes

Quadro 3. Síntese dos principais revestimentos internos e especificação de mobiliário no projeto das novas edificações da EACF. Elaborado a partir do Memorial Descritivo de Arquitetura. Fonte: Estudio41, 2013.

CONCLUSÕES

O resultado pioneiro de se estudar a qualidade do ar interno de uma Estação Antártica e propor diretrizes para as novas edificações brasileiras no continente, fez com que o novo projeto da EACF, decorrente da necessidade de reconstrução após o incêndio de fevereiro de 2012, alcançasse pontos positivos importantes na nova proposta projetual em relação à saúde dos seus ocupantes.

Dentre as estratégias mais eficientes de melhoria da QAI das novas edificações da EACF tem-se a implantação por blocos funcionais, separando os setores privados e sociais dos de trabalho, serviço, operação e manutenção. Nesse sentido, o monitoramento realizado nas antigas instalações da EACF, com identificação das potenciais fontes de poluição do ar e hábitos dos usuários, foi de fundamental importância para as recomendações constantes no TR e nas decisões projetuais dos ganhadores do processo licitatório. A não existência do trânsito veicular no corpo principal do edifício e um sistema de renovação de ar eficiente configuram-se, dentre as diretrizes projetuais propostas, como as principais para o alcance da melhor qualidade do ar interior.

Em relação aos materiais construtivos da nova EACF houve a preocupação na especificação certificadamente comprovada de componentes com zero ou baixa emissão de substâncias químicas. Entretanto, sabe-se que a melhor estratégia de controle da qualidade do ar, é a eliminação das fontes poluidoras, especialmente tratando-se de uma edificação antártica onde a característica do enclausuramento é peculiar na maior parte dos ambientes. Desta forma, materiais inertes ou de fixação sem colas, contribuiriam para um ainda melhor desempenho da QAI na EACF.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Antártica de Pesquisas Ambientais - INCT-APA; ao Programa Antártico Brasileiro – PROANTAR; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq; e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo suporte financeiro. À Marinha do Brasil e a Força Aérea Brasileira - FAB pelo apoio logístico e aos colegas de Estação em especial aqueles que contribuíram diretamente para a conclusão dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, Cristina Engel de; CASAGRANDE, Braz; SOARES, Glyvani Rubim. Resultados alcançados com a implementação do plano diretor da Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF). In: *IV Encontro Nacional e II Encontro Latino Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis*, Campo Grande: ANTAC, 2007.
- ALVAREZ, Cristina Engel de; VARGAS, Paulo Sérgio de Paula.; VIDIGAL, Emerson José. As novas edificações brasileiras na Antártica: do concurso de projeto ao estágio atual. In: *XXIV Reunión de Administradores de Programas Antárticos Latinoamericanos*, Chile: 2013.
- ANTUNES, Bianca. *Jovens arquitetos do Estúdio41 vencem o concurso para a Estação Antártica brasileira com um projeto que une conforto térmico com baixo consumo energético e produção de energia com sistemas limpos*. AU 213. Acesso em julho de 2014. Disponível em: < <http://au.pini.com.br/>>.
- ANVISA AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. *Resolução - RE nº 9*, de 16 de janeiro de 2003. Brasil: Diário Oficial da União, 2003.
- BRICKUS, Leila de Souza da Rocha e AQUINO NETO, Francisco Radler de. A qualidade do ar de interiores e a química. *Química nova*, 1999, nº 22, pp. 65-74.
- CROOK, Brian e BURTON Nancy C. Indoor moulds, sick building syndrome and building related illness. *Fungal Biology Reviews*, 2010, nº24, pp.106-113.
- DERBEZ, Mickaël; BERTHINEAU, Bruno; COCHET, Valérie; LETHROSNE, Murielle; PIGNON, Cécile; RIBERON, Jacques; KIRCHNER, Severine. Indoor air quality and comfort in seven newly built, energy-efficient houses in France. *Building and Environment*, 2014, nº72, pp.173-187.
- ESTUDIO41. *Estação Antártica Comandante Ferraz*. 2013. Acesso em julho 2014. Disponível em: < <http://www.escudio41.com.br/>>.
- INSTITUTO DOS ARQUITETOS DO BRASIL. Termo de Referência: ANEXO 1 do concurso da EACF. Brasil: 2013.
- KEELER, Marian e BURKE, Bill. *Fundamentos de projeto de edificações sustentáveis*. Porto Alegre: Ed. Bookman, 2010.
- MISHRA, Vinit Kumar; KIM, Ki-Hyun; HONG, Sungmin; LEE Khangyun. 2004. Aerosol composition and its sources at the King Sejong Station, Antarctic peninsula. *Atmospheric Environment* 38: 4069-4084.
- MISSIA, Dafni; DEMETRIOU, Eleni; MICHAEL, N.; TOLIS, Evangelos; BARTZIS, John G. Indoor exposure from building materials: a field study. *Atmospheric Environment*, 2010, nº 44, pp. 4388-4395.
- PAGEL, Érica Coelho; BEGHI, Sandra Paule; ALVAREZ, Cristina Engel de; REIS JÚNIOR, Neyval Costa; ANTUNES, Paulo Wagner Pereira; CASSINI, Sérgio Túlio; SANTOS, Jane Méri. Analysis of Indoor Aldehydes in the Comandante Ferraz Antarctic Station. *INCT-APA Annual Activity Report*, 2012, p. 178-183. DOI: 10.4322/apa.2014.085
- PAGEL, Érica Coelho; REIS JÚNIOR, Neyval Costa; ALVAREZ, Cristina Engel de; SANTOS, Jane Méri; CONTI, Melina Moreira; BOLDRINI, Ricardo Salvador; KERR, Américo Sansigolo. Characterization of the indoor particles and their sources in an Antarctic research station. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016a, nº188:167, p. 1-16. DOI: 10.1007/s10661-016-5172-z
- SCE - SISTEMA NACIONAL DE CERTIFICAÇÃO ENERGÉTICA DA QUALIDADE DO AR INTERIOR NOS EDIFÍCIOS. *Nota Técnica NT-SCE-02 Metodologia para auditorias periódicas de Qualidade do Ar Interior em edifícios de serviços existentes no âmbito do RSECE*. Portugal. 2009
- THE EUROPEAN STANDARD. *EN ISO 16000-1: indoor air – general aspects of sampling strategy*. Bruxelas. 2006.
- WESCHLER, Charles Joseph. Changes in indoor pollutants since the 1950s. *Atmospheric Environment*, 2009, nº 43, p.153-169.
- WHO REGIONAL OFFICE FOR EUROPE. WHO guidelines for indoor air quality. *Nutrition journal*, v. 9, p. 454, 2010.



AHORROS EN LOS CONSUMOS PARA ENFRIAMIENTO DE ESPACIOS INTERIORES MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN SOLAR EN EDIFICIOS RESIDENCIALES EN ALTURA. EL CASO DE LA "CIUDAD-OASIS" DE MENDOZA, ARGENTINA.

Artículo
Recibido 04-04-2016
Aceptado 15-05-2016

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.

JULIETA BALTER

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE). Centro Científico Tecnológico Mendoza. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).
Mendoza, Argentina
jbalter@mendoza-conicet.gob.ar

CARLOS DISCOLI

Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC), Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), Universidad Nacional de La Plata (UNLP)/Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Buenos Aires, Argentina
discoli@rocketmail.com

CAROLINA GANEM

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE). Centro Científico Tecnológico Mendoza. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).
Mendoza, Argentina
cganem@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

El presente trabajo estudia el comportamiento térmico y energético de edificios residenciales en altura, en el contexto particular de una "ciudad-oasis". Se plantea como objetivo la definición de sistemas de control solar adecuados en la envolvente para cada tipología material de edificio -másica y liviana- y para cada estrato en altura de las viviendas: debajo y sobre de la copa de los árboles. El monitoreo de viviendas en uso permite validar modelos geométricos (software Energy Plus) y simular propuestas de aplicación de elementos de protección solar. Se analizan los ahorros en los consumos para enfriamiento en departamentos en niveles bajos, medios y altos. Los resultados muestran que en el edificio másico, en las viviendas ubicadas debajo de la copa de los árboles, es posible anular las cargas energéticas para enfriamiento mediante el uso de elementos exteriores de protección solar. Mientras que en las viviendas sobre la copa de los árboles, los ahorros energéticos se encuentran entre el 32% y 42%. En el edificio liviano, la aplicación de sistemas de control en departamentos bajo la copa de los árboles alcanza ahorros del orden del 53% y en las viviendas sobre la copa, las reducciones energéticas se encuentran entre el 46% y 54%. Las dimensiones adecuadas de tales elementos pueden generar propuestas posibles de ser transferidas a las normativas locales de edificación.

Palabras clave

arquitectura ambiental, ahorro, protección, edificios en altura

ABSTRACT

This article analyzes the thermal and energy performance of high-rise residential buildings in the specific context of an oasis city. The aim of the study is to define adequate solar control systems in the envelope for each building material typology –heavyweight and lightweight– for two different housing height levels: above and below the tree canopy. By monitoring occupied dwellings, dynamic models were validated with Energy Plus software and proposed alternatives for solar protection were simulated. Energy savings for cooling were analyzed in apartments at low, middle and high levels. Results show that in the heavyweight building, the dwellings below the tree canopy do not require HVAC energy consumption to reach thermal comfort zones when exterior shading devices are used. While in units above the tree canopy, energy savings range from 32% to 42%. In the case of the lightweight building, apartments below the tree canopy present energy savings of approximately 53% and in those above the tree canopy savings are between 46% and 54%. The suitable dimensions of such elements constitute possible proposals for inclusion in local building regulations.

Keywords

environmental architecture, savings, protection, high-rise buildings

INTRODUCCIÓN.

En la actualidad, muchos de los países en vías de desarrollo se caracterizan por la renovación de sus centros urbanos mediante la construcción de edificios en altura en las áreas consolidadas de las ciudades. Los nuevos edificios orientan su rol principalmente a la imagen, empobreciéndose en sus otras características relacionadas con el logro del confort interior y la eficiencia energética. Esta tendencia se manifiesta en el debilitamiento y simplificación de la envolvente a través del incremento del uso del vidrio (Oldfield, Trabucco y Wood, 2009), lo cual conduce a una mayor complejidad y dependencia de los sistemas de control ambiental. En la provincia de Mendoza, Argentina, los usuarios residenciales fueron los responsables de la variación de casi dos terceras partes (63%) de la variación total de la demanda de energía eléctrica en todo el 2013. Estos usuarios incrementaron su participación hasta el 28,3% de la demanda total anual, teniendo en cuenta que históricamente su participación promedió el 20%. Una de las causas de estos incrementos podría ser las temperaturas extremas registradas durante el año 2013, calificadas como las más altas de los últimos 50 años (EPRE Mendoza, 2013). En tal contexto, distintos autores a nivel nacional han evaluado los consumos energéticos, el comportamiento térmico y las condiciones de confort en el ámbito edilicio. En 2006, se expuso un modelo de ahorro de energía en refrigeración desarrollado para edificios de habitación humana, junto a indicadores de eficiencia y sus valores admisibles aplicables a tres tipos de edificios de vivienda (Czajkowski y Corredera, 2006). En cuanto al confort de los usuarios, se analizó mediante medición y simulación un edificio de oficinas con doble fachada vidriada. Los resultados muestran un importante sobrecalentamiento en verano, para lo cual se proponen como soluciones fachadas verdes, ventilación natural y el uso del aire proveniente de los subsuelos para enfriamiento de la masa térmica del edificio (Flores Larsen, 2010). Por otra parte, mediante la evaluación del comportamiento térmico de verano de 4 viviendas másicas y compactas ubicadas en zonas urbanas de baja densidad, se obtienen estrategias de mejoramiento con las que se permitiría optimizar las condiciones de confort con ahorro de energía (Filippín y Flores Larsen, 2010).

Asimismo, los edificios residenciales presentan requisitos térmicos con un mayor grado de adaptación y flexibilidad que otro tipo de edificios, debido a la variabilidad de uso y costumbres de sus habitantes (Juodis, Jaraminiene y Dudkiewicz, 2009). La energía requerida para refrigeración es el rubro de mayor importancia en la demanda energética de viviendas en verano. En consecuencia, los ocupantes tienen importantes implicancias en las temperaturas interiores y en los requerimientos de energía (Toftum, Andersen y Jensen, 2009). Por tal motivo, es necesaria una consciencia activa instalada frente a estrategias de acondicionamiento pasivas. En este sentido, el uso apropiado de sistemas de control solar puede no sólo mejorar el confort interior, sino también reducir los consumos para enfriamiento.

Diversos trabajos a nivel internacional han evaluado la aplicación de sistemas de control solar en la envolvente edilicia. En particular, el de Cho, Yoo y Kim (2014) logra, mediante simulación energética, ahorros potenciales para enfriamiento del orden del 20%. La reducción de la ganancia solar directa con dos elementos de protección en el exterior podría disminuir la demanda energética un 19.7%, con elementos horizontales (voladizos) y un 17.3% con paneles verticales. Asimismo, análisis bajo diferentes condiciones climáticas muestran cómo la integración de dispositivos de persianas puede mejorar las condiciones ambientales interiores y obtener reducciones energéticas significativas respecto a un edificio sin protecciones (Palmero-Marrero y Oliveira, 2010). Otro estudio, enfocado en la localización, dimensiones y colores óptimos de los elementos de control, obtiene ahorros para enfriamiento del orden del 14% durante un día de verano con alta radiación (Gratia y De Herde, 2007). Sin embargo, las investigaciones sobre el tema se enfocan fundamentalmente en edificios de oficinas, de modo que existen escasas investigaciones orientadas a sistemas de control aplicados a edificios residenciales en altura.

Por otro lado, las medidas a tomar en relación a tales elementos de control tienen dependencia directa con la ubicación geográfica y las condiciones climáticas del contexto. Al respecto, las "ciudades-oasis" insertas en climas áridos, cuentan con beneficios ambientales provocados por la forestación urbana y definen dos estratos: por un lado, la situación bajo la copa de los árboles beneficia a las edificaciones de baja altura (3 - 4 niveles), en verano, ya que la radiación incidente es moderada e incluso puede ser bloqueada, dependiendo de la densidad del follaje (Cantón *et al.*, 2003). Por otro lado, fuera del estrato acondicionado, las edificaciones están expuestas directamente al clima de la región: la condición sobre la copa de los árboles consiente un acceso pleno a la radiación, tanto en invierno (energía incidente deseada) como en verano (energía incidente no deseada), y una exposición al intercambio convectivo y radiativo de energías en ambas estaciones. Es así que este modelo de ciudad presenta un micro-clima que beneficia a las edificaciones de baja altura, atenuado la condicionante climática árida propia de la región. A pesar de tal diferenciación en el micro-clima, los edificios en altura tienden a lograr una imagen continua en toda su fachada, sin tener en cuenta los factores ambientales del entorno.

La ciudad en estudio, Mendoza (32° 40' LS, 68° 51' LO), se ubica en una zona semi-desértica y árida y cuenta con un clima templado continental. Se concibe como una "ciudad-oasis" a partir de la coordinación de diferentes factores: la estructura urbana en damero (trama ortogonal de manzanas), la edificación, la forestación (trama de árboles que acompaña el trazado urbano) y un sistema de riego (acequias) que bordea el perímetro de las manzanas. Estos factores resultan en un estrato acondicionado o sector de la atmósfera beneficiado ambientalmente por los efectos de la arboleda y el agua. Es así que este modelo de ciudad ha atenuado la condicionante climática árida propia de la región (Bórmida, 1984).

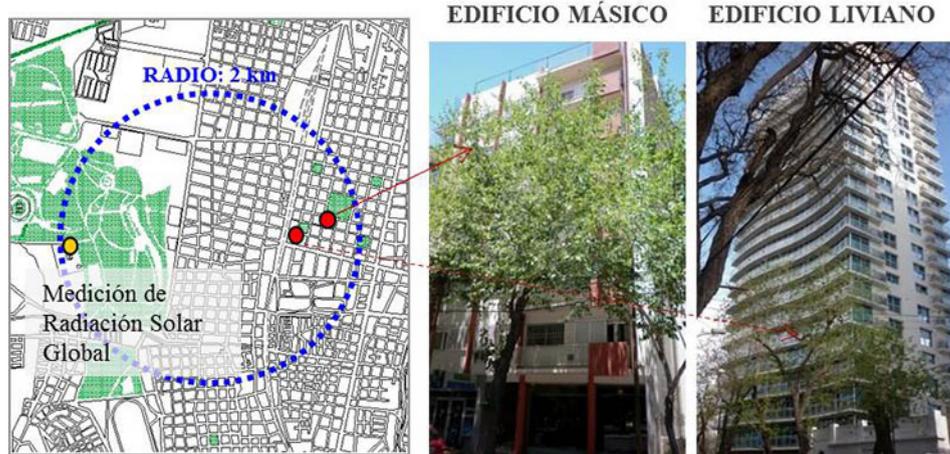


Figura 1. Ubicación y fotografías de los edificios en estudio. Fuente: Elaboración de los autores).

Mediante el análisis del comportamiento energético y su relación con el confort térmico interior en edificios en altura residenciales en la ciudad de Mendoza, se comprobó la necesidad de atender la situación expuesta en la envolvente de las construcciones que superan el estrato forestal. Resulta substancial que los edificios en altura aprovechen los beneficios de la forestación en la ciudad, diferenciando la envolvente de los niveles inferiores (basamento) y superiores (torre) (Balter, 2015). Por consiguiente, el presente trabajo se enfoca en la evaluación de los ahorros energéticos para enfriamiento mediante la utilización de sistemas de control solar, en edificios en altura con diferente materialidad de envolvente: másica y liviana. Con tal fin, se evalúan unidades de vivienda en niveles bajos (debajo de la copa de los árboles), niveles medios y altos (sobre la copa de los árboles). Se plantea como objetivo la definición de sistemas de control solar adecuados para cada tipología material de edificio y para cada estrato de altura. Las dimensiones adecuadas de dichos elementos pueden generar propuestas posibles de ser transferidas a las normativas locales de edificación.

CASOS DE ESTUDIO.

CLASIFICACIÓN Y SELECCIÓN.

Para la labor propuesta, se seleccionan dos edificios residenciales de uso permanente, a partir de la siguiente clasificación de dos tipologías de materialidad edilicia:

Edificios másicos: construcciones con un mínimo del 70% de materiales opacos en el total de la envolvente expuesta y más del 50% de materiales con densidad (ρ) por metro cúbico mayor o igual a 1200kg/m^3 , y peso por metro cuadrado mayor o igual a 100kg/m^2 .

Edificios livianos: construcciones con un mínimo del 50% de materiales transparentes en el total de la envolvente expuesta y más del 50% de materiales con densidad (ρ) por metro cúbico menor a 1200kg/m^3 , y peso por metro cuadrado menor a 100kg/m^2 .

En cuanto al área de estudio, se abarcó la zona de mayor densidad edilicia en altura, mayormente residencial, con una densidad poblacional alta, estimándose más de 800 hab/ha. Asimismo, con el propósito de estimar la condición más favorable desde el punto de vista bioclimático (en el Hemisferio Sur), se evaluaron casos cuya fachada principal se encontrara orientada al Norte. Ambos edificios (Figura 1) se ubican frente a dos de las plazas principales de la ciudad, sobre canales viales de 20m de ancho, forestados, con moreras adultas. En cada edificio se auditaron dos departamentos frontales (4 casos en total), localizados uno debajo y otro sobre la copa de los árboles.

DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS.

El edificio másico cuenta con un 73% de materiales opacos en su envolvente y la resistencia térmica media de envolvente total es de $0,49\text{m}^2\text{C/W}$. La materialidad del edificio es de ladrillos cerámicos huecos de 0,30m de espesor, con revoque y pintura al exterior, sin aislación ($U=1,36\text{W/m}^2\text{C}$), y las divisiones interiores son del mismo material de 0,10m de espesor ($U=1,97\text{W/m}^2\text{C}$). Las cubiertas son de losa nervada con ladrillo hueco y aislación ($U=0,24\text{W/m}^2\text{C}$). Los vidrios son simples de 4mm de espesor ($U= 5,8\text{W/m}^2\text{C}$, factor solar =0,87). En cuanto a elementos de protección solar, cuenta con balcones de 1,20m de profundidad y persianas corredizas con celosías de madera color blanco.



Figura 2. Plantas de los departamentos en estudio. Fuente: Elaboración de los autores.

El edificio liviano responde a la concepción de edificio de estructura de hormigón y piel de vidrio, y si bien la estructura resulta significativa debido al carácter sísmico de la región, predomina una estética transparente. El 48% de la envolvente exterior es opaca de muros de hormigón armado con revoque texturado con base de polímero. Sin embargo, el 22% de ese porcentaje está recubierto en vidrio (por motivos estéticos) lo cual varía mínimamente el coeficiente de transmitancia térmica (con vidrio $U=2.55W/m^2 \text{ } ^\circ C$ y sin vidrio $U=2.54W/m^2$). El total de materiales transparentes en la envolvente es del 76% y la resistencia térmica media de envolvente total es de $0,26m^2 \text{ } ^\circ C/W$. En el interior las divisiones son livianas, de tabiques de cartón y yeso tipo Durlock, de 10 cm de espesor ($U= 5,70W/m^2 \text{ } ^\circ C$). Las losas son de $H^\circ A^\circ$ ($U=2,40W/m^2 \text{ } ^\circ C$) y los vidrios son vidrios laminados de 6 mm (3+3) ($U= 5,7W/m^2 \text{ } ^\circ C$ factor solar=0,07), con láminas de polivinil butiral (PVB) de 0,38 con tramos incoloros, *artic-blue* y espejados. El edificio dispone de balcones de 1m de profundidad y ningún tipo de elementos de protección solar en la envolvente.

En la Figura 2 se presentan las unidades de vivienda monitoreadas. En el edificio másico cuentan con una superficie cubierta de $122.5m^2$ y semi-cubierta (balcón) de $5,50m^2$ y se ubican en el primer y quinto nivel. En el edificio liviano las viviendas tienen una superficie cubierta de $98m^2$ y semi-cubierta (balcón) de $17m^2$ y se ubican en los niveles tercero y dieciséis. El análisis de forma de las dos viviendas en estudio se define a partir de dos factores: Factor de Forma: FF (Olgyay, 1998) y Factor de Área de Envolvente de Piso: FAEP (Esteves y Gelardi, 2003). Los resultados muestran que ambas cuentan con similares factores: en las viviendas másicas, $FF=1$ y $FAEP=0.60$ y en las viviendas livianas, $FF=1.20$ y $FAEP=0.50$, lo cual indica equivalentes grados de compacidad.

METODOLOGÍA.

MONITOREO Y VALIDACIÓN DE MODELOS GEOMÉTRICOS.

La metodología utilizada para el monitoreo de las viviendas y la validación de los modelos geométricos (Balter, Ganem y Discoli, 2016) se ha llevado a cabo mediante los siguientes procesos:

a) Auditorías térmicas de cuatro unidades de vivienda: dos departamentos equivalentes en su diseño por cada edificio seleccionado (másico y liviano) ubicados en distintas alturas (bajo y sobre la copa de los árboles). En todos los casos, los departamentos auditados presentan las mismas características de colindancia con otros edificios y son unidades rodeadas, a su vez, por otras unidades tanto por arriba como por abajo. Se excluyen de los casos de estudio los departamentos cuya cubierta se encuentra expuesta al exterior. Por este motivo, las unidades de vivienda estudiadas sólo presentan relación directa con el microclima interior en las fachadas. Las auditorías *in situ* se realizaron simultáneamente en las cuatro viviendas y en las cuatro estaciones del año, durante períodos entre veinte y treinta días. Se instalaron en cada caso 3 micro-adquisidores de datos HOBO U12 de temperatura del aire y humedad relativa, ubicados en diferentes ambientes: dos en el interior (estar y habitación) y uno en el exterior (balcón). Este último, protegido de la posible incidencia de la radiación solar. Se fijaron intervalos de registro cada 15 minutos sincrónicos en todos los instrumentos, de acuerdo con el protocolo establecido por Longobardi y Hancock (2000). Las mediciones de radiación solar global se realizaron dentro de un radio de 2km con un solarímetro CM 5 KIPP & ZONEN en los mismos períodos y con la misma frecuencia de toma de datos establecida para las mediciones de temperatura de aire y humedad.

b) Entrevistas abiertas a los habitantes de los departamentos en estudio. El objetivo de esta técnica fue conocer el uso y ocupación de los espacios: horarios, gestión de la envolvente, uso de medios mecánicos de climatización, etc.

c) Validación de modelos geométricos de simulación dinámica: los edificios, en su totalidad, fueron definidos mediante el programa Open Studio Plug-in para Google Sketch Up Versión 8, a partir del cual se ingresaron los datos en el software Energy Plus (2013). Las viviendas en estudio se graficaron en la altura real en la que se encuentran, y en las condiciones reales de colindancia entre edificios y entre unidades descriptas en el punto a.

Con la medición de las variables climáticas, se conformaron dos archivos (climáticos): uno, para la condición dada sobre la copa de los árboles, que contiene las mediciones realizadas de temperaturas y radiación solar global; y otro, en el cual se modifica la radiación incidente bajo la arboleda urbana. Para ello, se tienen en cuenta los estudios realizados sobre el grado de permeabilidad de árboles en ciudades del centro oeste de Argentina (Cantón *et al.*, 2003). Dicha permeabilidad a la radiación global al mediodía solar correspondiente a la arboleda urbana existente en el caso de estudio (*Morus Alba*), es del 31,4% en verano y del 66,4% en invierno. Estos datos se corroboraron mediante la auditoría de la radiación solar en los espacios exteriores de los departamentos en estudio con un sensor Lutron SPM-116SD, en días y horarios seleccionados durante todo el período de medición. Los datos necesarios para el archivo de clima requerido para la simulación fueron: radiación global sobre superficie horizontal; radiación difusa sobre superficie horizontal; radiación directa normal al haz; temperatura de bulbo seco exterior; humedad relativa exterior; velocidad y dirección de vientos.

Una vez ajustadas las temperaturas medidas y simuladas, se aislaron las incidencias de los usuarios, considerando las viviendas desocupadas y sin ganancias internas por personas.

d) Categorización de edificios. Respecto a las variables morfológicas, los edificios en altura en Mendoza se pueden clasificar en tres tipologías de acuerdo al código de edificación (Municipalidad de Mendoza, 2000). El edificio másico responde a la tipología de "Torre sin retiros", es decir, construcciones de hasta 10 niveles de altura, desarrolladas sobre los límites del terreno. Mientras que el edificio liviano corresponde a "Torre retirada de las líneas divisorias de edificación", tipología referida a construcciones con retiros de los límites del terreno en todo su perímetro. Para trabajar con tipologías morfológicas equivalentes se unificaron los edificios en estudio en la tercera tipología existente de "Basamento y Torre": el Basamento es una construcción que puede desarrollarse hasta los límites del terreno (sin retiros) con una altura máxima de 10m. Por sobre el mismo se permite la construcción de la torre

con retiros mínimos obligatorios. Esta tipología aprovecha los beneficios micro-climáticos que aporta la copa de los árboles en los primeros niveles (hasta los 10m de altura). Asimismo, en el basamento, las envolventes laterales -Este y Oeste- se encuentran protegidas de la exposición al clima exterior por las edificaciones colindantes existentes de más de dos niveles de altura. Por esto se modificaron las condiciones de dichas envolventes, considerándolas superficies adiabáticas.

e) En cuanto a las variables de materialidad, con el objetivo de mejorar el comportamiento térmico y energético de las viviendas estudiadas se evaluaron diferentes alternativas, modificando los componentes de la envolvente vertical de los edificios en estudio. Esto se realiza en función de identificar las combinaciones de los elementos opacos y transparentes con mejores resultados. En el caso másico, la materialidad opaca seleccionada es ladrillo macizo de 0.30m con aislación exterior de 0.05m de poliuretano expandido ($U=0.63W/m^2$). En el edificio liviano se mantuvo la envolvente opaca de hormigón armado (estructura). Respecto a la envolvente transparente, en ambos edificios se trabajó con DVH 6+12+6 ($K=1.80 W/m^2C$, $FS=0.35$).

APLICACIÓN DE ELEMENTOS DE CONTROL SOLAR.

Con el fin de clasificar las protecciones se toman dos de las categorías planteadas por Baker y Fanchiotti (1993) en relación a los elementos rígidos y flexibles. Se distinguen elementos horizontales, verticales o una combinación de ambos.

Los elementos rígidos, tales como balcones, parasoles y celosías, se refieren a dispositivos opacos horizontales y/o verticales que redirigen y/u obstruyen la radiación solar directa. Normalmente, son estructuras fijas que no pueden ser reguladas. En aras de comprender los intervalos de protección o sombreado y determinar las longitudes apropiadas, se analizó la inclinación de los rayos solares normales a la fachada para la ciudad de Mendoza, en las horas críticas diurnas (de 12pm a 3pm), y en relación a la variabilidad de dimensiones de los balcones y parasoles. En la Figura 3 se presentan los esquemas de la incidencia solar con protecciones horizontales: balcones de 1m de profundidad (casos existentes) y de 2,50m de profundidad (longitud óptima determinada).

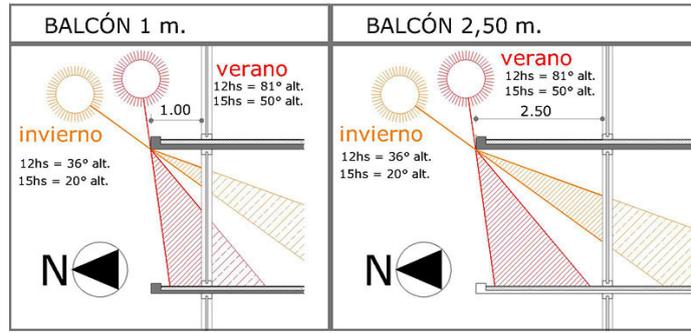


Figura 3. Incidencia solar en fachadas para la ciudad de Mendoza. Fuente: Elaboración de los autores.

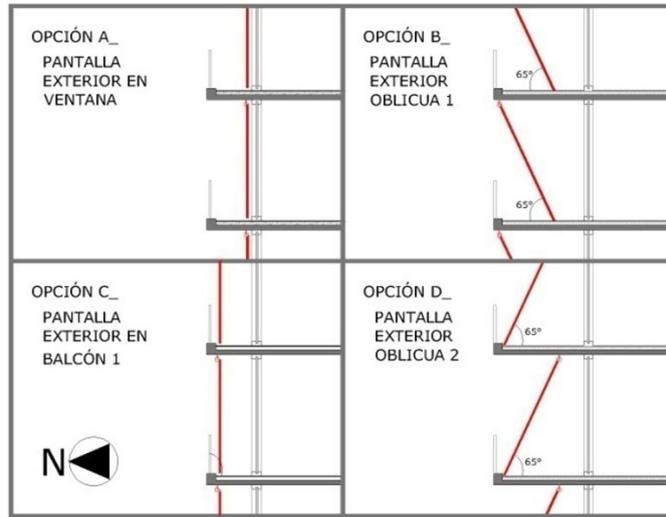


Figura 4. Opciones de posiciones de pantallas flexibles analizadas Fuente: Elaboración de los autores.

	EDIFICIOS MÁSICOS	EDIFICIOS LIVIANOS
ELEMENTOS HORIZONTALES RÍGIDOS	BALCONES (2.5m) 	BALCONES (2.5m)
	PARASOLES (1m) 	CELOSÍAS
ELEMENTOS VERTICALES O/Y HORIZONTALES RÍGIDOS		
	PANTALLAS 	PANTALLAS

Figura 5. Elementos de protección solar compatibles con la expresión arquitectónica. Fuente: Elaboración de los autores.

		Bajo la copa °C	Sobre la copa °C	
		Niveles bajos (2° nivel)	Niveles medios (5° nivel)	Niveles altos (16° nivel)
Temperatura Media	Exterior	28	27.8	
	Edificio másico	24.2	26.6	29
	Edificio liviano	27.1	28.7	31
ΔT diario (diferencia diurna-nocturna)	Exterior	8.2	10.5	
	Edificio másico	0.9	1.2	1.4
	Edificio liviano	1.3	1.7	3.3

Tabla 1. Temperaturas medias y ΔT diarios exteriores e interiores en verano.
Fuente: Elaboración de los autores.

Los elementos flexibles, como pantallas, se refieren a dispositivos que obstruyen parcial o totalmente la luz solar directa y difusa. Pueden abrirse o cerrarse permitiendo ventilación natural y también controlar las vistas. Con el fin de determinar la mejor opción en relación al grado de protección solar, se simulan diferentes alternativas de ubicación y posición de las pantallas flexibles aplicadas en edificios en altura. En la Figura 4 se presentan los esquemas de las distintas alternativas: A) pantalla exterior en ventana; B) pantalla exterior oblicua 1; C) pantalla exterior en balcón; y D) pantalla exterior oblicua 2. Los resultados indican un mejor comportamiento térmico con el caso C, con diferencias menores: de 0,1°C respecto a los otros casos.

En la Figura 5 se muestran imágenes de los elementos a evaluar: protecciones compatibles con la tipología arquitectónica. Los elementos verticales rígidos se diferencian según la materialidad del edificio: para los edificios másicos se incorporan parasoles de 1m de profundidad y para los livianos, celosías de 1.5m de altura separadas 30cm de la fachada, con cierto grado de transparencia dada la compatibilidad en la expresión arquitectónica (los parasoles le quitarían a este tipo de edificios la imagen liviana y transparente deseada).

Una vez determinadas los elementos de control para cada caso, se aplican en ambos edificios. Se simulan los consumos energéticos en verano, teniendo en cuenta una temperatura constante de 25°C mediante la aplicación de elementos rígidos y flexibles materializados con los dispositivos de sombra (*Building Shading*) del programa *Energy Plus*. Los elementos flexibles se consideran en las horas diurnas de mayor incidencia de radiación directa (de 11am a 18pm). Asimismo, se calculan las reducciones energéticas en términos porcentuales diferenciando el basamento y los niveles en altura en la torre. Se analizan los resultados en departamentos ubicados en los siguientes

niveles:

Debajo de la copa de los árboles –Basamento: 2° nivel (nivel bajo).

Sobre la copa de los árboles –Torre: 5° nivel (nivel medio) y nivel 16° (nivel alto).

RESULTADOS.

COMPORTAMIENTO TÉRMICO-ENERGÉTICO SIN LA INCIDENCIA DE LOS USUARIOS.

Se presentan los resultados de verano (Tabla 1) de las temperaturas medias y las diferencias térmicas (ΔT) diurnas-nocturnas diarias promedio, considerando las temperaturas exteriores medidas y las interiores simuladas sin la incidencia de los usuarios.

Se analizan las temperaturas interiores simuladas resultantes del promedio de los espacios orientados al Norte en ambos edificios (estar y habitaciones 1 y 2).

En el edificio másico, el departamento debajo de la copa de los árboles cuenta con las temperaturas más bajas, dentro del rango de confort, entre 23.8°C y 24.7°C. Sobre la copa de los árboles, en el 5° nivel, las temperaturas se encuentran entre 26°C y 27.2°C; y en el nivel 16 las temperaturas sobrepasan el rango de confort, entre 28.3°C y 29.7°C.

En el edificio liviano las temperaturas más bajas también corresponden al departamento debajo de la copa de los árboles, encontrándose dentro del rango de confort¹, entre 26.5°C y 27.8°C. Sobre la copa de los árboles, las temperaturas interiores sobrepasan el confort: en el 5° nivel se encuentran entre 27.9°C y 29.9°C y en el nivel 16, entre 30.2°C y 33.5°C.

[1] Givoni (1992) sugiere rangos de temperatura, en condiciones de aire calmo, entre 20°C-27°C para el 80% de personas en confort. Para países en vías de desarrollo, el autor sugiere la flexibilización de 2°C de las temperaturas límite debido a que el habitante se encuentra adaptado a su clima. El presente trabajo adopta un rango de confort entre 18°C y 28°C, teniendo en cuenta las estaciones de verano e invierno.

		Bajo de la copa	Sobre la copa	
		Niveles bajos (2° nivel)	Niveles medio (5° nivel)	Niveles altos (16° nivel)
		kWh/m ²		
Edificio másico	Sin protección	0.1	1.2	2.2
	Balcones	0	0.9	1.9
	Parasoles	0	0.8	1.8
	Balcones y pantallas flexibles	0	0.8	1.8
	Parasoles y pantallas flexibles	0	0.7	1.5
Edificio liviano	Sin protección	1.4	4.1	3.5
	Balcones	0.7	2.8	2.6
	Celosías	1.2	3.5	3
	Balcones y pantallas flexibles	0.65	1.9	1.9

Tabla 2. Consumos mensuales por metro cuadrado (kWh/m²) para enfriamiento en verano. Fuente: Elaboración de los autores"

Los resultados simulados de verano demuestran que en ambos edificios las viviendas del basamento cuentan con temperaturas menores y más cercanas a los rangos de confort. Esto se debe, por un lado, al mayor porcentaje de envolvente expuesta en las viviendas superiores y, por otro, a la influencia micro-climática del estrato acondicionado propio de la "ciudad-oasis", el cual beneficia a las viviendas ubicadas bajo su protección moderando la radiación incidente y, por ende, las temperaturas interiores.

Asimismo, el edificio másico cuenta con mejores condiciones térmicas, con diferencias de 2°C a 3°C, gracias a la opacidad de la envolvente y a los elementos de protección que controlan la incidencia de radiación solar y a su inercia térmica entre el ciclo nocturno y diurno. En cuanto al caso liviano, la envolvente del edificio (columnas de hormigón armado recubiertas en vidrio laminado de 6mm), con un 72% de superficie transparente, y la carencia de dispositivos de control ofrecen muy pocas posibilidades de amortiguamiento a las condiciones extremas exteriores.

APLICACIÓN DE ELEMENTOS DE CONTROL: CONSUMOS ENERGÉTICOS PARA ENFRIAMIENTO.

En la Tabla 2 se presentan los resultados simulados de los requerimientos energéticos para enfriamiento. Se analizan los casos sin ningún tipo de protección solar en relación a los casos en los que se aplican elementos rígidos y su combinación con elementos flexibles.

En el caso másico, la unidad de vivienda debajo de la copa de los árboles con elementos de control solar no requiere de energía auxiliar para encontrarse dentro de rangos de confort (25°C). Esto demuestra los beneficios en los consumos energéticos para enfriamiento proporcionados por la moderación de la radiación incidente, dada por la arboleda urbana, junto a adecuados elementos de protección solar en la envolvente. Mientras que en los departamentos sobre la copa de los árboles, los requerimientos energéticos son mayores en el nivel

superior. La combinación de elementos rígidos y flexibles presentan los siguientes ahorros para enfriamiento: con balcones y pantallas flexibles, del orden del 33% (0.8kWh/m²) en el 5° nivel, y en el nivel 16, del 18% (1.8kWh/m²). Mientras que con parasoles y pantallas flexibles, los ahorros en el 5° nivel son del orden del 42% (0.7kWh/m²) y en el nivel 16, del 32% (1.5kWh/m²).

En el edificio liviano, a diferencia del caso másico, el departamento debajo de la copa de los árboles con elementos de control sí requiere energía auxiliar para ubicarse dentro de rangos de confort. Los ahorros energéticos con celosías resultan similares en todos los niveles estudiados: debajo de la copa de los árboles, son del orden del 14% (1.2kWh/m²); y sobre la copa, en el 5° nivel, del 15% (3.5kWh/m²) y en el nivel 16, del 14% (3kWh/m²). La combinación de balcones y pantallas flexibles muestran las mayores reducciones energéticas: debajo de la copa, del 53% (0.65kWh/m²); mientras que sobre la copa, el ahorro es del 54% (1.9kWh/m²) en el 5° nivel, y en el nivel 16, del 46% (1.9kWh/m²).

Se puede observar que en el edificio másico, en todos los casos analizados (con y sin protecciones), los mayores consumos están dados en el nivel más alto y disminuyen a medida que se desciende de nivel. Mientras que en el edificio liviano los consumos de los casos sin protección y con balcones y celosías son mayores en el nivel medio. Esto se debe a que con la altitud, en la simulación por *Energy Plus*, se consideran modificaciones en los parámetros de temperatura, velocidad de vientos y coeficientes convectivos, generando una mayor disipación térmica de las envolventes livianas con estas características. Sin embargo, se puede advertir que mediante la aplicación de balcones y pantallas flexibles las diferencias entre los niveles medio y alto se equiparan.

CONCLUSIONES Y PAUTAS.

A partir de los resultados térmicos y energéticos obtenidos, podemos resaltar dos aspectos significativos: por un lado, resulta importante priorizar la tipología de "Basamento y Torre" en los edificios en altura, en la ciudad de Mendoza. El basamento edilicio resulta una estrategia contundente desde el punto de vista ambiental, dado que las unidades de vivienda aprovechan la protección a la radiación incidente y cuentan con temperaturas más bajas en verano. En consecuencia, la necesidad de contar con medios mecánicos de climatización disminuye.

Por otro lado, en relación a la comparación de los dos edificios sin elementos de protección, se observa que, si bien el edificio liviano requiere mayor energía auxiliar para enfriamiento en todos los niveles, las diferencias en los consumos disminuyen a medida que aumenta la altura de las viviendas. Las diferencias en los departamentos debajo de la copa de los árboles son del orden del 92%, mientras que sobre la copa, en el 5° nivel, resultan del 71%, y en el nivel 16 del 37%. Esta situación evidencia la importancia de la materialidad de la envolvente en la torre debido al rol de ésta como moderadora de las temperaturas interiores. Resultan imprescindibles materialidades que prevean aislaciones en las superficies verticales, así como tecnologías transparentes eficientes. Si la envolvente es adecuada en sus aspectos constructivos y tecnológicos, las posibilidades de manejo por parte de los usuarios pueden potenciar su calidad.

En cuanto a los sistemas de control solar, en el edificio másico, en las viviendas ubicadas debajo de la copa de los árboles, es posible anular las cargas energéticas para enfriamiento mediante el uso de elementos exteriores de protección solar. Asimismo, la mayor eficiencia energética se presenta mediante el uso de elementos rígidos verticales y horizontales (parasoles de 1m) combinados con pantallas verticales flexibles. Mientras que en el edificio liviano, los menores consumos se dan con elementos rígidos horizontales (balcones de 2.5m) combinados con pantallas flexibles. De acuerdo a estos resultados, se sugieren las siguientes recomendaciones como estrategias de control:

En edificios másicos, los elementos de control debieran diferenciarse en sus dimensiones en el basamento (debajo de la copa de los árboles) y la torre (sobre la copa de los árboles). En el basamento, los elementos rígidos en la envolvente, como por ejemplo aleros o balcones, pueden presentar una profundidad del orden de 1m (considerando una altura estándar). Asimismo, si no se contara con elementos de control en la envolvente, la protección solar

que brinda la copa de los árboles (moreras de 12m de alto) puede resultar suficiente para controlar las temperaturas interiores y alcanzar rangos de confort (hasta 28°C), sin la necesidad del uso de medios mecánicos de climatización, siempre y cuando el edificio disponga de las condiciones físicas mínimas de materialidad acordes al contexto. En la torre, resulta importante moderar la radiación incidente mediante el uso de protecciones horizontales, que en este caso deberían tener una profundidad de entre 2m y 2,50m. En edificios livianos, en función de respetar la imagen transparente deseada, se sugieren protecciones solares translúcidas o semi-opacas como es el caso de lamas serigrafiadas o celosías. Para edificios con baja inercia térmica en su envolvente y más del 50% de superficie transparente en la fachada, resulta esencial que el proyecto incluya protecciones rígidas y flexibles en cada uno de sus aventanamientos. Los elementos horizontales debieran tener una profundidad mínima de 2.5m tanto en el basamento como en la torre.

Se considera que uno de los aportes principales de la presente investigación se encuentra en la posibilidad de transferencia a las normativas edilicias. Si bien el Código de Edificación de Mendoza carece de algún apartado sobre eficiencia energética, las normas argentinas IRAM establecen condiciones de acondicionamiento térmico exigibles en la construcción de los edificios. Específicamente, la norma IRAM 11605 (IRAM, 1996) otorga tres niveles de transmitancia que corresponden a distintos niveles de calidad térmica en los paramentos verticales y cubiertas. No obstante, dichas normas son de aplicación electiva en Mendoza y los edificios en altura en la ciudad difícilmente cumplen con el nivel mínimo dado (de los edificios en estudio, el liviano sobrepasa los valores máximos de transmitancia de los muros, mientras que el caso másico cumple tan sólo con el nivel mínimo). Por tal motivo, como primera medida, se propone incentivar la aplicación de las normativas optativas y, a la vez, contribuir con la diferenciación de basamento y torre, tanto en las exigencias relativas a la calidad térmica de las envolventes como en lo que respecta a las protecciones solares, aspectos que aún no son considerados por las normativas. En la Figura 6 se presenta un modelo esquemático para edificios másicos en el contexto ambiental de Mendoza, del cual podrían obtenerse planillas para cada tipología de materialidad de envolvente edilicia.

En base a la metodología empleada, en trabajos futuros se pretende continuar el estudio profundizando en otros aspectos, tales como nuevos sistemas, tecnologías de envolvente y elementos de control, no implementados aún en el contexto local.

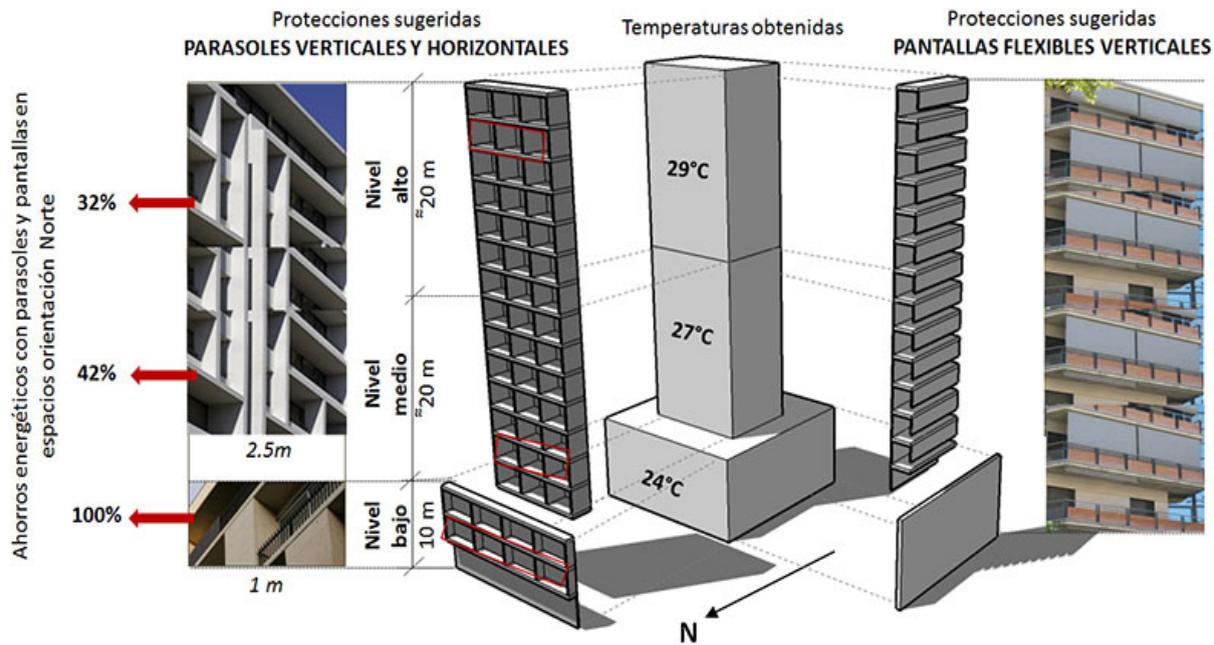


Figura 6. Modelo esquemático de protecciones sugeridas para edificios máscicos según diferentes niveles de altura.
 Fuente: Elaboración de los autores.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen a los propietarios de los departamentos evaluados por permitir ser entrevistados y la instalación de equipos de monitoreo. Agradecemos también al CONICET (Consejo Nacional de Investigación Científica y Tecnológica) y la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCYT – PICT 2013-2036) por el soporte financiero.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

BALTER, Julieta. *Sustentabilidad de edificios en altura en ciudades-oasis. Características arquitectónicas y ambientales para el caso de la ciudad de Mendoza*. Tesis doctoral. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Argentina, 2015.

BALTER, Julieta, GANEM, Carolina y DISCOLI, Carlos. On high-rise residential buildings in an oasis-city: Thermal and energy assessment of different envelope materiality above and below tree canopy. *Energy and Buildings*, 2016, nº 113, pp. 61-73.

BAKER, Nick y FANCHIOTTI, Aldo. *Daylighting in Architecture: A European Reference Book*. Commission of the European Communities. London, UK: James & James Ltd., 1993.

BÓRMIDA, Eliana. *Mendoza, una ciudad oasis*. Mendoza: Universidad de Mendoza, 1984.

CANTÓN, Alicia; MESA, Alejandro; CORTEGOSO, José Luis y DE ROSA, Carlos. Assessing the solar resource in forested urban environments: results from the use of a photographic-computational method. *Architectural Science Review*, 2003, nº 46, pp. 115-123.

CHO, Jinkyun; YOO, Changwoo y KIM, Yundeok. Viability of exterior shading devices for high-rise residential buildings: Case study for cooling energy saving and economic feasibility analysis. *Energy and Buildings*, 2014, nº 82, pp. 771-785.

CZAJKOWSKI, Jorge y CORREDERA, Cecilia. Ahorro de energía en refrigeración de edificios para viviendas y propuesta de indicadores de eficiencia y valores admisibles. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2006, nº 10, pp. 9-16.

ENERGY PLUS. *The official building simulation program of the United States Department of Energy* [en línea]. [Consultado 16 junio 2013]. Disponible en: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>

EPRE MENDOZA. *Informe demanda Mendoza y Cuyo: 2013* [en línea]. [Consultado 9 febrero 2016]. Disponible en: http://www.epremendoza.gov.ar/_a_adjuntos/Inf_Demanda_Cuyo_ANUAL_2013.pdf

ESTEVEZ, Alfredo y GELARDI, Daniel. Docencia en Arquitectura Sustentable: Programa de Optimización de Proyectos de Arquitectura basado en el balance térmico. *Avances en Energías Renovables y Medioambiente*, 2003, n° 7, pp. 31-34.

FLORES LARSEN, Silvana. Simulación térmica de un edificio de oficinas con doble fachada vidriada en la Ciudad de Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2010, n° 14, pp. 73-80.

FILIPPÍN, Celina y FLORES LARSEN, Silvana. Comportamiento térmico de verano de viviendas unifamiliares compactas en condiciones reales de uso en clima templado en Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2010, n° 14, p. 1-8, 2010.

GIVONI, Baruch. Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Building*, 1992, vol. 18, n° 1, pp 11-23.

GRATIA, Elisabeth y DE HERDE, André. The most efficient position of shading devices in a double skin façade. *Energy and Buildings*, 2007, vol. 39, n° 3, pp. 364-373.

JUODIS, E.; JARAMINIENE, E. y DUDKIEWICZ, E. Inherent variability of heat consumption in residential buildings. *Energy and Buildings*, 2009, vol. 41, pp. 1188-1194.

LONGOBARDI, M. y HANCOCK, M. *Field Trip Strategies*. TIA 2000 Conference Proceedings. Oxford: Oxford Brookes University, 2000.

MUNICIPALIDAD DE MENDOZA. Código de Edificación, 2000, Ordenanza N°3296/14975/1996.

IRAM (Instituto Argentino de Normalización). *Norma IRAM 11605. Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos admisibles de transmitancia térmica en cerramientos opacos*, 1996.

OLDFIELD, Philip; TRABUCCO, Dario y WOOD, Antony. Five energy generations of tall buildings: an historical analysis of energy consumption in high-rise buildings. *The Journal of Architecture*, 2009, n° 14, pp. 591-610.

OLGYAY, Víctor. *Arquitectura y clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1998.

PALMERO-MARRERO, Ana y OLIVEIRA, Armando. Effect of louver shading devices on building energy requirements. *Applied Energy*, 2010, vol. 87, n° 6, pp. 2040-2049.

TOFTUM, Jørn; ANDERSEN, Rune y JENSEN, Kasper. Occupant performance and building energy consumption with different philosophies of determining acceptable thermal conditions. *Building Environment*, 2009, vol. 44, pp. 2009-2016.



PAUTAS DE DISEÑO PARA DISMINUIR LAS TEMPERATURAS URBANAS EN REGIONES CON ALTA PRODUCTIVIDAD SOLAR. PARÁMETROS MORFOLÓGICOS Y MATERIALES.

DESIGN GUIDELINES TO REDUCE URBAN TEMPERATURES IN REGIONS WITH HIGH SOLAR PRODUCTIVITY: MORPHOLOGICAL AND MATERIALS PARAMETERS.

NOELIA LILIANA ALCHAPAR
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE). CONICET.
Centro Científico y Tecnológico de Mendoza. CCT-Mendoza.
Mendoza, Argentina
nalchapar@mendoza-conicet.gob.ar

ERICA NORMA CORREA
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE). CONICET.
Centro Científico y Tecnológico de Mendoza. CCT-Mendoza.
Mendoza, Argentina
ecorrea@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

El estudio aquí expuesto examinó el potencial de las características del perfil urbano -morfología y materialidad- para disminuir las temperaturas urbanas. El objetivo consistió en identificar pautas de diseño y rehabilitación urbana, que permitan densificar áreas residenciales de la ciudad de Mendoza, Argentina. Para ello fueron simulados 32 escenarios con el programa ENVI-met 3.1, en los cuales se combinó distintos niveles de reflectancia solar (albedo) de los materiales que conforman las envolventes, diversas morfologías de perfil urbano, y presencia y ausencia de forestación dentro del canal vial, variando su orientación E-O y N-S. A partir de los resultados obtenidos por las simulaciones, se infiere que aquellos canales viales que presentan un comportamiento térmico más eficiente, están vegetados, y, morfológicamente, su perfil urbano es continuo sobre la línea municipal. En cuanto a la materialidad de sus envolventes, presentan niveles de albedo altos (0.7) en techos y pavimentos, y niveles de albedo bajo (0.3) en fachadas.

Palabras clave

diseño urbano, fachadas, materiales, morfología.

ABSTRACT

This study examined the numerical modeling performance of morphological and materials alternatives for reducing urban temperatures. The aim was to identify design and urban regeneration guidelines that enable the densification of residential areas in the city of Mendoza, Argentina. To this end, using ENVI-met 3.1 software 32 scenarios were simulated that combined: different levels of solar reflectance (albedo) of building envelope materials, different urban profile morphologies, the presence or absence of forestation in urban canyons, and E-W/N-S variation in orientation. From the simulation results it can be inferred that there is more efficient thermal performance in the vegetated scenarios that morphologically have a continuous urban profile above the municipal building line. Regarding envelope materiality, there are high albedo levels (0.7) on roofs and pavements, and low albedo levels (0.3) on façades.

Keywords

urban design, façades, materials, morphology.

INTRODUCCIÓN.

En virtud de los desafíos de la creciente urbanización y el cambio climático actual, hay una necesidad urgente de desarrollar estrategias de adaptación/mitigación sostenible en el diseño y planificación de las ciudades. Se pueden citar numerosas razones por las que considerar la capacidad para evaluar y diseñar barrios urbanos adaptados al cambio climático resulta importante.

Uno de los objetivos fundamentales de la planificación urbana y diseño barrial es ofrecer un entorno exterior favorable a los habitantes, minimizando el consumo energético edilicio y manteniendo los rangos de confort térmico interior y la calidad del aire exterior. En muchos aspectos, el comportamiento medioambiental de un barrio urbano establece las condiciones del rendimiento ambiental y energético de los edificios individuales situados dentro de éste (Thorsson *et al.*, 2010).

La habitabilidad de los espacios exteriores está influenciada por el microclima urbano, pero aunque los efectos de los diversos parámetros de diseño -morfología, materialidad, orientación, vegetación, etc.- dentro de un entorno urbano han sido ampliamente evaluados y documentados (Givoni *et al.*, 2003; Santamouris, 2007), continúan siendo limitados aquellos estudios que abordan el rol de cada uno de estos parámetros sobre el clima urbano (Shashua-Bar, Tsiros y Hoffman, 2012).

Los escenarios urbanos presentan una estrecha relación entre su comportamiento térmico y la selección de materiales y morfología urbano/edilicia. Mientras los materiales incrementan la permeabilidad y la capacidad calorífica de las superficies, la morfología edilicia contribuye con la captura de radiación "radiative trapping" en un recinto urbano (Doya, Bozonnet y Allard, 2012; Correa, 2006).

La selección de los materiales de la envolvente constituye un parámetro que debe ser analizado en cada caso particular, pues el incremento de los niveles de reflectancia solar -también denominado albedo- mejora las condiciones térmicas del medio ambiente, especialmente en cañones vegetados (Akbari, Menon y Rosenfeld, 2009; Santamouris, 2014). Ahora bien, Erell *et al.* (2014) informó que si bien el uso extensivo de materiales con alto albedo en cañones urbanos -de regiones de clima cálido- disminuye las temperaturas del aire, puede incrementar notablemente la carga de radiación solar, comprometiendo el confort térmico peatonal. Esto también fue enunciado en estudios desarrollados por Yaghoobian y Kleissl (2012), quienes destacaron que el aumento de los niveles de albedo en pavimentos, desde 0.1 a 0.5, incrementa las cargas de enfriamiento anuales hasta en un 11%, en un edificio de oficinas en Phoenix, Arizona.

En lo referente a la morfología urbana/edilicia, estudios desarrollados por Ali-Toudert y Meyer (2006), y Johansson y Emmanuel (2006) se enfocaron en los efectos de la geometría y la orientación en cañones urbanos en ciudades cálidas y húmedas. Pearlmutter, Berliner y Shaviv (2007) analizaron también la relación entre la densidad urbana y la habitabilidad en espacios exteriores en una región árida de Israel. Estas investigaciones encontraron una correlación directa entre la eficiencia térmica de un recinto urbano y su morfología. Los resultados muestran patrones contrastantes de confort térmico entre calles urbanas profundas y superficiales, así como entre las distintas orientaciones estudiadas.

En este marco, el presente estudio proyecta producir conocimiento en torno a desarrollar lineamientos de diseño para conseguir el máximo nivel de densificación (18 metros, según Código Municipal) de un sector residencial ubicado en la ciudad de Mendoza, Argentina, con el mínimo impacto térmico y ambiental. Para ello, se evaluaron dos tipologías de perfiles urbanos, distintos niveles de reflectancia solar (albedo) de la materialidad de las envolventes urbano-edilicias, el efecto de la forestación en dos situaciones, cañón urbano vegetado y sin vegetar, y orientación E-O y N-S.

Un cañón urbano está definido por dos parámetros principales: la altura máxima de los edificios (H) y el ancho comprendido entre líneas de edificación (W); el cociente de ambos valores determina el aspecto de ratio H/W.

La presente investigación es de carácter inicial, sin embargo, propone dar pautas de diseño urbano-edilicias preliminares para la elaboración de ordenanzas municipales en ciudades con alta disponibilidad de radiación solar. A fin de concretar en el corto y mediano plazo un crecimiento metropolitano más eficiente desde el punto de vista energético y ambiental en ciudades emplazadas en contextos áridos.

METODOLOGÍA.

La presente investigación se llevó a cabo en el área Metropolitana de Mendoza localizada en el centro oeste de Argentina. Según clasificación de Köppen, el clima de la ciudad es desértico, tipo BWk (Kottek *et al.*, 2006). Registra 218 mm de precipitación anual, 56 % de humedad relativa de aire anual, 1022 W/m² de radiación solar diaria máxima promedio en verano, 1.7 m/s de velocidad de viento anual (h=10m) en dirección predominante del sudeste. La temperatura de aire media anual es de 16.50 °C, con máxima media de 24.50 °C y mínima media de 9.60 °C (Observatorio de Mendoza).

ALBEDO BAJO (\hat{a} promedio=0.3)	ALBEDO ALTO (\hat{a} promedio= 0.7)
<p>- Pavimentos peatonales con $\hat{a} \leq 0.30$. Pavimentos peatonales cementicios (P27, P35, P07).</p> <p>- Fachadas con $\hat{a} \leq 0.35$. Revestimientos texturados acrílicos (SIP 40, SIP 21, SIP 15, SIP 12, CW 64); y pinturas para exteriores (PIN 02, PIN 16).</p> <p>- Techos con $\hat{a} \leq 0.40$. Tejas (T13, T12). (Ver Figura 1.a)</p>	<p>- Pavimentos peatonales con $\hat{a} \leq 0.70$. Pavimentos peatonales (P13, P25, P34).</p> <p>- Fachadas con $\hat{a} \leq 0.80$. Revestimientos texturados (SIP 22, SIP 18, SIP 03, SIP 27, SIP 17, SIP 09, SIP 10, SIP 01, SIP 34, SIP 02, SIP 33, SIP 26, SIP 25, CW 53, CW 60, CW 46, CW 67, CW 59, CW 78, CW 75, CW 70, CW 54, CW 62, CW 66, CW 74, CW 43, CW 51, CW 58, CW 73, CW 42, CW 57, CW 50, CW 65, CW 41, CW 49); pinturas exteriores (PIN 08, PIN 01, PIN 11, PIN 12, PIN 09, PIN 10, PIN 03, PIN 06, PIN 04, PIN 07, PIN 14, PIN 05, PIN 15, PIN 13).</p> <p>- Techos con $\hat{a} \leq 0.70$. Tejas (T14, T01, T03, T08).</p> <p>(Ver Figura 1.b)</p>
<p>Nomenclaturas: P: Pavimentos peatonales; SIP: Revestimientos texturados acrílicos, CW: Revestimientos texturados, cementicios; T: Tejas; PIN: Pinturas para exterior.</p>	

Tabla 1. Clasificación de materiales evaluados según rangos de albedo (\hat{a}). Fuente: Elaborada por el autor.

El proceso metodológico incluyó cuatro etapas:

(1) caracterización de las propiedades ópticas y comportamiento térmico de materiales de la envolvente urbana; (2) selección y monitoreo del área a intervenir; (3) modelación numérica con el programa ENVI-met 3.1 del área; (4) simulación de 32 escenarios de rehabilitación, que combinan rangos de albedo de los materiales de la envolvente urbana y perfiles urbanos, según porcentaje de vegetación y orientación.

Resulta importante resaltar que esta metodología puede ser replicada en otras zonas climáticas y contextos socio-económicos, en busca de la regionalización de pautas de diseño urbana.

CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE MATERIALES DE LA ENVOLVENTE URBANA.

Con el fin de obtener indicadores respecto a la habilidad de los materiales para reducir las temperaturas de aire exteriores, se ensayaron materiales de la envolvente urbana de mayor difusión en el mercado local. La muestra está compuesta por 152 materiales: tejas, membranas, revestimientos texturados, pinturas para fachadas y pavimentos peatonales. Para cuantificar la capacidad reflectiva (albedo) y el comportamiento térmico superficial de los materiales, se utilizó un método variante de la norma ASTM E-1918 propuesto por Akbari, Levinson y Stern (2008). Dicho método mide la reflectancia solar de un material sobre 1 m² de superficie, mediante el uso de un piranómetro y un par de máscaras de color blanco y negro. Los resultados han sido publicados en diversos trabajos nacionales e internacionales (Alchapar, Correa y Cantón, 2014; Alchapar y Correa, 2015). En esta investigación se detallan aquellos materiales que registran rangos de albedo extremos, es decir, albedo bajo con nivel de reflectancia solar inferior a 0.3, y albedo alto correspondiente a un nivel de reflectancia solar superior a 0.7; ambos detallados en la Tabla 1 y la Figura 1.

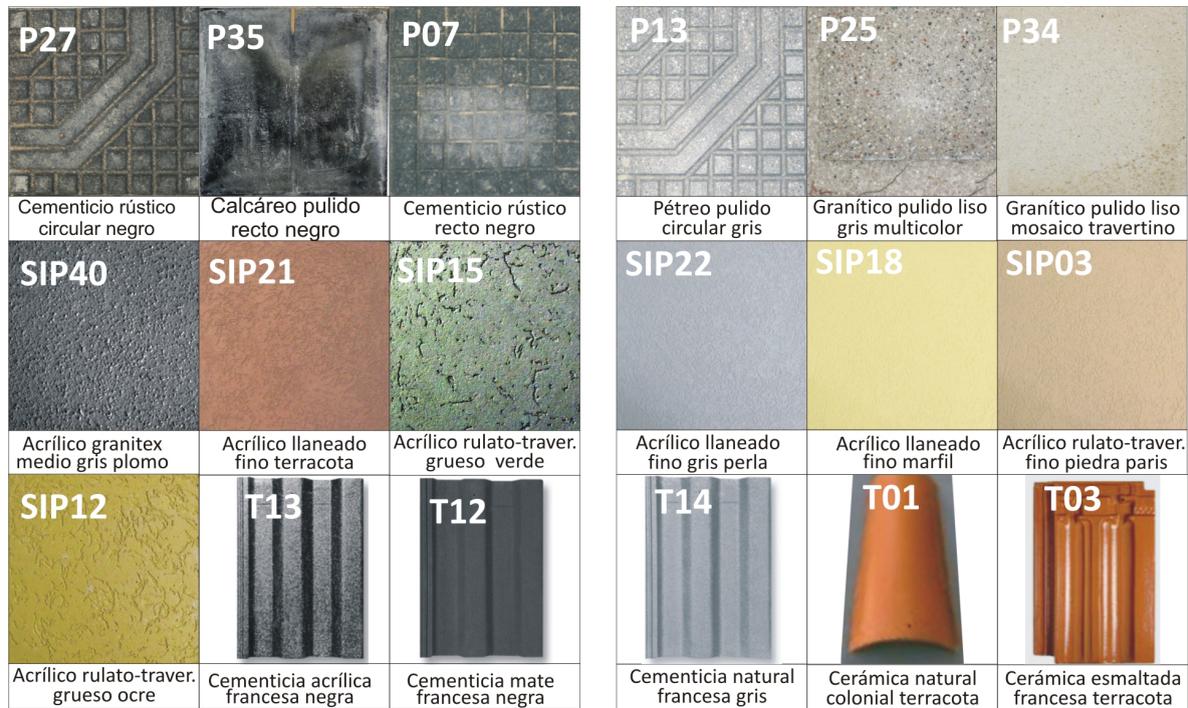


Figura 1. Detalle de materiales evaluados según nivel de albedo. Pavimentos peatonales (P), fachadas (SIP) y techos (T). Se grafican los tres primeros materiales para cada rango. Materiales con albedo bajo =0.3 (izquierda) y materiales con albedo alto=0.7. Fuente: Elaboración del autor.

SELECCIÓN Y MONITOREO DEL CASO DE ESTUDIO.

El sector a intervenir tiene una superficie 210 x 210 m (4.4 hectáreas) y comprende las calles: E-W -Pasteur, Dr. Lemos y Tropero Sosa-; N-S - Roque Sáenz Peña y San Martín- (32°54'47"S, 68°50'46"O). El área tiene una configuración ortogonal, con una altura edilicia entre 1 y 3 niveles, y el aspecto de ratio es igual a H/W=0.3 a 0.4. Presenta un 60 % de forestación urbana, principalmente con "morera blanca" (*Morus alba*), que es una especie arbórea de 15 metros de alto y hoja caduca.

Esta zona ofrece grandes posibilidades para su densificación en altura, debido a una serie de factores, como proximidad al centro de la ciudad, localización en relación a los ejes de circulación y disponibilidad de servicios e infraestructura. De acuerdo al Código de Edificación Municipal, y su capítulo UIII "De las Normas de Zonificación e Impacto Ambiental", el área corresponde a una sub-zona residencial, tipo R6. El destino es de uso predominantemente residencial uni y multifamiliar, con funciones complementarias y compatibles. La densidad neta media es de 250 a 400 habitantes por hectárea. Según indicadores urbanos, el factor de ocupación del suelo del área (FOS) es de 0.70 y el factor de ocupación total (FOT) es de 4.20. La altura máxima de construcción permitida en el sector es de 6 niveles, es decir, 18 metros de altura, de acuerdo a lo establecido en Ordenanza N° 5519/07 y sus correspondientes actualizaciones, las Ordenanzas N°5835-2010 y N°5924/11.

El monitoreo térmico y ambiental se llevó a cabo en la temporada de verano, en días estables sin ocurrencia de precipitaciones. Los datos utilizados para la calibración corresponden al 14 de enero por presentar condiciones estándares al periodo estival de Mendoza. En ese día se registraron las siguientes condiciones: temperatura máxima de 36 °C; temperatura mínima de 21 °C; temperatura promedio de 27 °C; radiación global máxima 1.174 W/m²; y humedad relativa promedio 25 % (Observatorio de Mendoza).

A fin de calibrar los datos simulados con los medidos, fueron recogidas variables de temperatura (T_a) y humedad relativa (HR) del aire por hora. Para ello, se colocó una estación fija tipo HOBO H08-003-02 a 2.5m de altura dentro del canal vial -Pf-. (Figura 2b). Se tomaron registros de velocidad de viento (V_v) desde una estación meteorológica móvil tipo ONSET Weather HOBO H21-001 (Figura 2a). También se recogieron datos de temperatura superficial de suelo (T_{suelo}) en el punto Pf durante un periodo de 12:00 hs con un termómetro infrarrojo tipo FLUKE 66 (Figura 2c).



Figura 2. Vista escala satelital del área de estudio y ubicación de la estación fija (Pf) (arriba). Fuente: Google maps, 2015. Vista peatonal del área de estudio y detalle del instrumental utilizado para la colecta de datos. (a) Estación meteorológica móvil tipo ONSET Weather HOB0 H21-001; (b)

DISEÑO DEL MODELO NUMÉRICO ENVI-MET 3.1.

Para realizar el diseño numérico se utilizó el programa de acceso gratuito ENVI-met 3.1, desarrollado por Michael Bruse en el Instituto de Geografía de la Universidad de Mainz, Alemania. Este modelo computacional tridimensional trabaja a escala de microclima urbano y simula las interacciones entre el aire y la superficie del entorno urbano con una resolución típica de 0.5 a 10 metros en el espacio y cada 10 segundos en tiempo.

ENVI-met 3.1 está basado en las leyes fundamentales de la dinámica de fluidos y la termodinámica. El modelo incluye la simulación de: flujos alrededor y entre edificios; procesos de intercambio de calor y vapor de las superficies de suelo y paredes; turbulencia; parámetros de la vegetación; bioclimatología; y dispersión de contaminantes (Bruse, 2006).

VARIABLES DE INGRESO AL SIMULADOR.

Los datos de ingreso para la modelación numérica del área evaluada se pueden dividir en tres grupos:

- **Diseño del espacio físico:** El modelo fue realizado en una versión 100 x 100 x 30. La resolución del área es de 3 x 3 x 3m y malla de 70 (x); 70 (y), debido a que la superficie de referencia es de 210 x 210 m.

- **Variables climáticas:** El software ENVI-met 3.1 requiere del ingreso de variables no perturbadas que caracterizan las condiciones de borde de la simulación, tales como: (i) velocidad, dirección de viento (m/s) a 10 m de altura y rugosidad de suelo (z_0) al punto de referencia; (ii) temperatura atmosférica inicial (K) y humedad específica (gr. agua/kg. aire) a 2500 m de altura. Los datos se obtuvieron del Aeropuerto Francisco Gabrielli -Estación n° 87418, Observatorio Aero de Mendoza - en colaboración con la Universidad de Wyoming; (iii) humedad relativa (%) a 2m de altura, registrada con sensor ONSET Weather, tipo HOB0 H08-003-02 (punto fijo, para el ajuste).

- **Propiedades térmicas del modelo teórico:** Para la caracterización de los edificios es necesario definir temperatura interior, transmitancia térmica y albedo de paredes, techos y pavimentos. Con el propósito de especificar el comportamiento del suelo, se debe precisar temperatura y humedad para distintas capas de suelo. En la Tabla 2 están listadas las condiciones de simulación y las propiedades usadas en el trabajo.

Tabla 2. Parámetros de ingreso del simulador ENVI-met 3.1

DATOS		
Principales	Velocidad de viento a 10 m [m/s]	3
	Dirección de viento (0:N; 90:E;180:S; 270:W)	150
	Rugosidad (z0) al punto de referencia	0.1*
	Temperatura atmosférica inicial [K]	300
	Humedad específica a 2.500m [g agua/kg aire]	2.8
	Humedad Relativa a 2m [%]	28
Edilicios	Temperatura interior [K]	299
	Transmitancia térmica paredes [W/m²K]	2
	Transmitancia térmica techos [W/m²K]	0.76
De Suelo	Temperatura Inicial de capa superior (0-20 cm) [K]	300
	Temperatura Inicial de capa media (20-50 cm) [K]	305
	Temperatura Inicial de capa profunda (más de 50 cm) [K]	305
	Humedad Relativa de capa superior (0-20 cm) [%]	50*
	Humedad Relativa de capa media (20-50 cm) [%]	60*
	Humedad Relativa de capa profunda (más de 50 cm)	60*

Nota: Los parámetros con "*"son valores por defecto de ENVI-met 3.1.

Tabla2. Parámetros de ingreso del simulador ENVI-met 3.1. Fuente: Elaboración del autor.

CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO ENVI-MET 3.1.

Para ajustar el modelo numérico se contrastó la curva de temperatura del aire del espacio simulado con ENVI-met (Ps), con la curva temperatura del aire obtenida a partir de datos registrados en un punto fijo de referencia (Pf), ubicado dentro del canal vial analizado e indicado en la Figura 2.

La Figura 3 grafica la regresión lineal de distribución de los datos medidos (Pf) con los simulados (Ps). Los estadísticos que caracterizan y comparan los datos muestran una buena predicción del comportamiento térmico del día evaluado, con un error cuadrático medio RMSE=3.13 % y error absoluto medio MBE= 0.06 %.

ESCENARIOS DE DENSIFICACIÓN PROPUESTOS.

Con el fin de evaluar el grado de impacto de parámetros de diseño urbano sobre las temperaturas exteriores, fueron modelados 32 escenarios que modifican:

Rangos de albedo (â): Se simularon 4 configuraciones de albedo de envolventes. La 1° y 2° alternativa corresponden a un albedo homogéneo en todas las superficies de la envolvente urbana (alto y bajo). Las 3° y 4° configuraciones corresponden a un albedo combinado, es decir, a aquellos escenarios que distinguen el nivel de albedo según la posición relativa dentro del cañón urbano -superficies horizontales: techos y pavimentos, -superficies verticales: fachadas-. Los niveles de reflectancia solar se dividen en: albedo bajo ($\hat{\alpha}=0.3$) y albedo alto ($\hat{\alpha}=0.7$) (ver rangos de albedo en sección 2.1 y Figura 4).

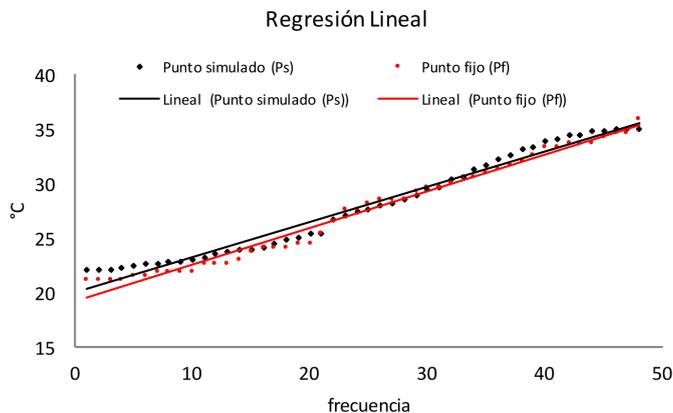


Figura 3. Validación del modelo numérico mediante regresión lineal de los datos medidos en la estación fija (Pf) y simulados (Ps). Fuente: Elaboración del autor.

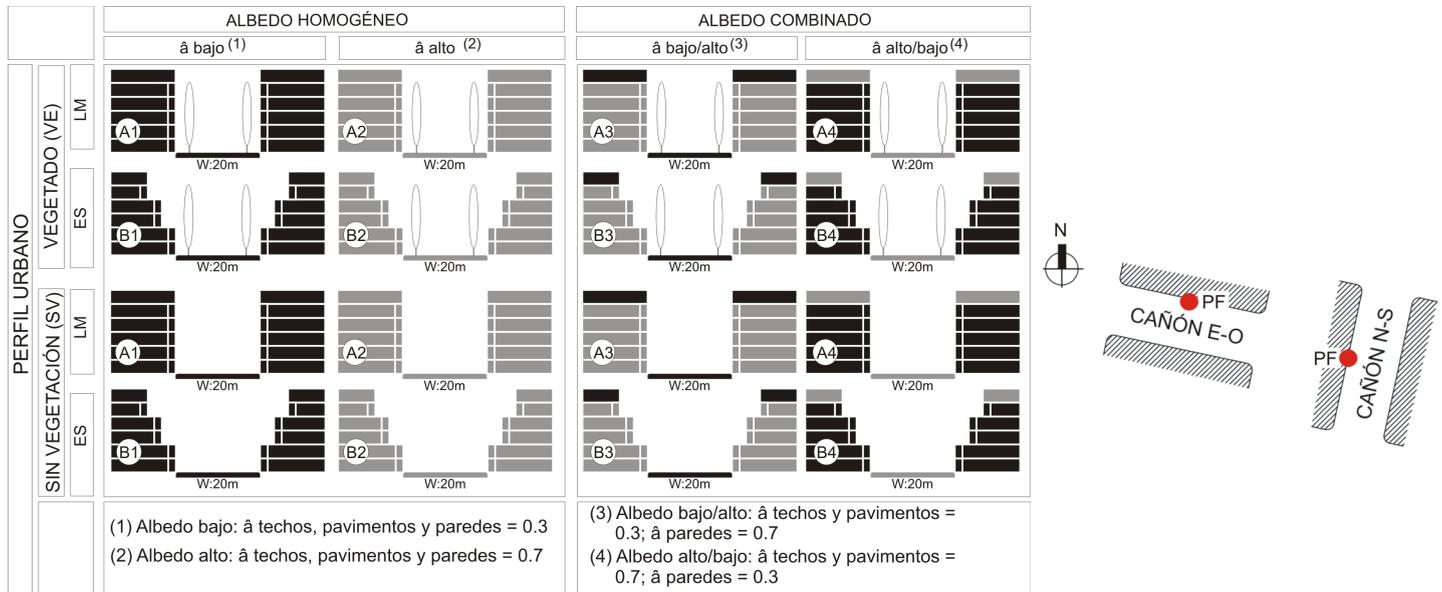


Figura 4. Características de los escenarios propuestos según perfil urbano y nivel de albedo en envoltentes. Fuente: Elaboración del autor. Figura 5. Detalle de alternativas de orientación simuladas. Cañón vial Este- Oeste y cañón vial Norte -Sur. Fuente: Elaboración del autor.

Perfiles urbanos: Bajo un escenario de densificación máxima permitida por código (18 metros de altura), se diseñaron dos posibles configuraciones de perfiles urbanos: sobre línea municipal (A) y escalonado (B). El perfil A se eleva en forma de fachada continua. En cambio, en el perfil B, como su nombre lo indica, cada 6 metros de altura se produce un retiro de 3 metros respecto de la línea de edificación.

Porcentaje de vegetación: La vegetación es un componente determinante en el balance térmico de un recinto urbano, debido a que aporta sombra a las superficies expuestas y humedad al ambiente (Shishegar, 2014). Es por ello que se simularon dos configuraciones dentro del área a intervenir, la primera corresponde a un 60 % de vegetación que coincide con el porcentaje y distribución de forestales del casode estudio (VE). La segunda configuración, sin vegetación (SV), fue estudiada para que el resto de los elementos no se vean enmascarados por el efecto del forestal (Figura 4).

Orientación: La habitabilidad del espacio público se determina en gran medida por la orientación de la sección de la calle, de modo que resulta fundamental considerar esta variable para analizar el nivel de asoleamiento que recibe cada canal vial. Fueron evaluadas dos orientaciones del canal vial:

- Este-Oeste (E-O): Orientación correspondiente al cañón vial donde se ubicó la estación fija de referencia (Pf), dentro del área de estudio. Rotación 12° desde el norte.
- Norte- Sur (N-S): Se rotó el área de estudio 90° desde el norte real, es decir, que en estos escenarios el cañón vial es perpendicular al actual. (Figura 5).

RESULTADOS.

FACTOR DE VISIÓN DE CIELO SEGÚN MORFOLOGÍA EDILICIA/VEGETAL.

La figura 6 grafica el factor de visión de cielo de las siguientes configuraciones: sin vegetación y perfil sobre línea municipal (SV_A); sin vegetación y perfil escalonado (SV_B); con vegetación y perfil sobre línea municipal (VE_A); y, con vegetación y perfil escalonado (VE_B).

En el total de las configuraciones evaluadas se relevó un factor de visión de cielo que oscila entre 0.28 y 0.66. El mayor factor de visión a la bóveda celeste lo alcanzan aquellos escenarios sin vegetación y con perfil urbano escalonado (SV_B), indicados en la Figura 6.

INTENSIDAD DE RADIACIÓN SOLAR SEGÚN MORFOLOGÍA EDILICIA/VEGETAL Y ORIENTACIÓN.

La figura 7 grafica las curvas de radiación solar global (W/m²) de las configuraciones que modifican su perfil urbano y porcentaje de vegetación.

Las curvas de radiación solar evidencian en las alternativas evaluadas que los escenarios vegetados disminuyen la intensidad hasta un 50% durante el mediodía solar.

Al comparar la orientación de los canales viales, se observa que la orientación N-S disminuye las horas en las que se encuentra irradiado un canal vial respecto a los cañones E-O. Además, en los cañones N-S la morfología del perfil

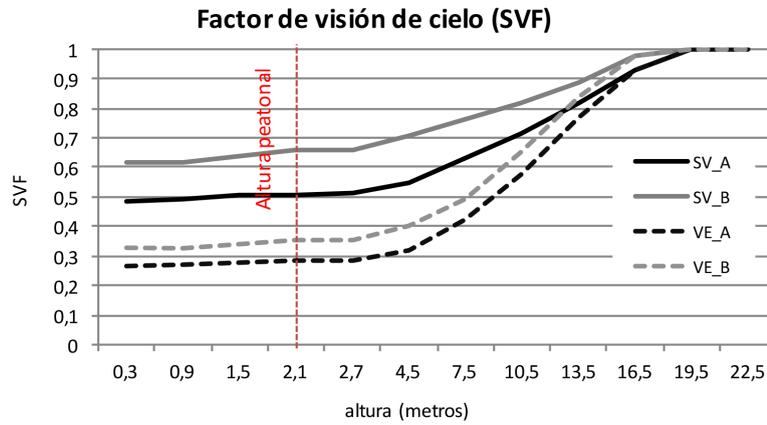


Figura 6. Factor de visión de cielo, según morfología edilicia y vegetal.
 Fuente: Elaboración del autor.

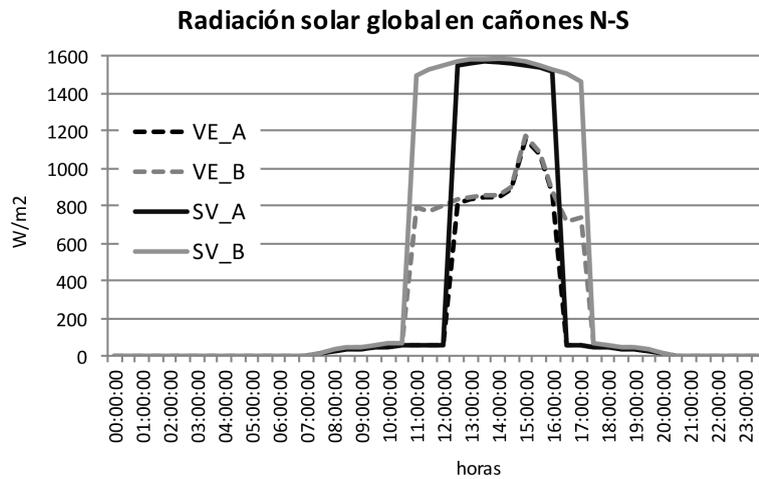
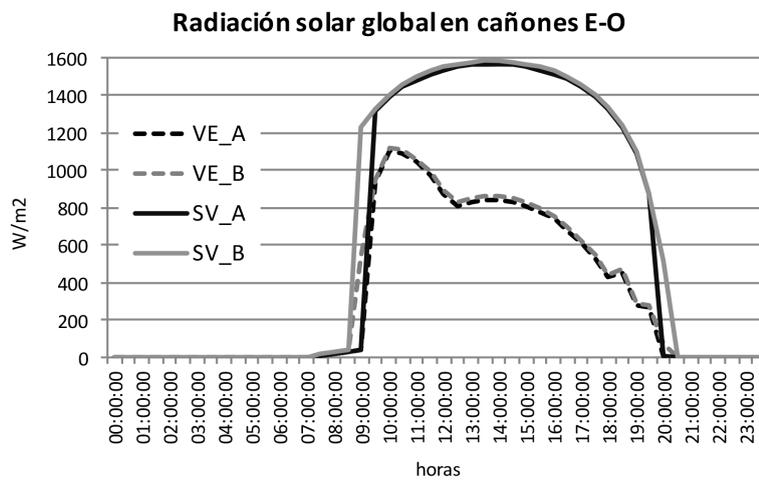


Figura 7. Intensidad de radiación solar global (W/m2) según morfología edilicia/ vegetal en cañones urbanos con orientación E-O (izquierda) y N-S (derecha).
 Fuente: Elaboración del autor.

Temperatura de aire máximas (Ta; K)											
cañón E-O	Albedo homogéneo				Albedo combinado		cañón N-S	Albedo homogéneo		Albedo combinado	
		albedo 1	albedo 2	albedo 3	albedo 4			albedo 1	albedo 2	albedo 3	albedo 4
VE	A	308,31	307,8	309,54	306,71	VE	A	309,0	308,4	310,5	307,0
	B	308,81	308,03	309,69	307,19		B	309,7	308,8	310,9	307,6
SV	A	309,91	309,1	310,86	308,33	SV	A	310,6	309,7	311,8	308,7
	B	310,69	309,69	311,45	309,03		B	311,7	310,4	312,6	309,6

Ta (K)

- 310-312
- 308-310
- 306-308

Ta (K)

- 312,0-314,0
- 310,0-312,0
- 308,0-310,0
- 306,0-308,0

Tabla 3. Temperatura máxima de aire (Ta) según escenarios y orientación del cañón vial, a una altura de 2 metros y en grados Kelvin (K).
Fuente: Elaboración del autor.

urbano es preponderante en lo referente al tiempo que permanece un canal vial irradiado. Los escenarios con perfil sobre la línea municipal (A) están en sombra 2 horas más durante el período de calentamiento y reducen 2 horas la insolación durante la tarde.

En suma, la vegetación (VE) disminuye la intensidad de radiación y la forma del perfil urbano (A) reduce las horas de exposición, y de manera más significativa en la orientación N-S (Figura 7).

TEMPERATURA DE AIRE MÁXIMA SEGÚN ESCENARIOS Y ORIENTACIÓN.

La Tabla 3 describe las temperaturas máximas de aire, según escenario evaluado, a escala peatonal.

- *Cañón vial E-O*: Los escenarios más eficientes, es decir, los que menos elevan la Ta durante las horas de máxima radiación, son aquellos vegetados, que poseen albedo combinado rango 4, o sea, alto albedo sobre superficies horizontales y bajo albedo en superficies verticales, tanto para el perfil urbano sobre línea municipal (A) como para el escalonado (B). La alternativa con albedo homogéneo rango 2, esto es, alto albedo en toda la envolvente, con vegetación y sobre línea municipal (A), también se mantiene más fría durante las máximas temperaturas (ver VE_A4, VE_B4, y VE_A2 en Tabla 3).

Las alternativas más calientes corresponden a los escenarios sin vegetación, perfil escalonado (B) y con albedo rango 1 y 3, es decir, las configuraciones que tienen niveles de albedo bajos en toda la envolvente y en las superficies horizontales respectivamente (ver SV_B1, SV_B3 y SV_A3 en Tabla 3).

- *Cañón vial N-S*: Al analizar las alternativas con cañones urbanos de orientación N-S, se evidencia que los escenarios más eficientes son aquellos vegetados, que poseen albedo combinado rango 4, para ambos perfiles urbanos (sobre línea municipal y escalonado) (ver VE_A4 y VE_B4 en Tabla 3).

La configuración que más eleva la Ta pertenece al escenario sin vegetación, con perfil escalonado y albedo combinado rango 3, correspondiente a niveles de albedo bajo en techos y pavimento y niveles de albedo alto en fachadas, según SV_B3 en Tabla 3. Al contrastar los comportamientos térmicos extremos entre escenarios, las diferencias de Ta registradas entre la configuración más fría (VE_A4) y la más caliente (SV_B3) son de 5°K, en orientación de cañón E-O, y de 6°K, en orientación N-S (Tabla 3).

Manteniendo constante la materialidad del canal vial y modificando la forma del perfil urbano (edilicia y vegetal), es posible disminuir la Ta hasta 2.4°K en canales viales E-O y hasta 2.7°K en N-S.

Manteniendo constante la forma (edilicia y vegetal), las consecuencias de cambiar la materialidad del canal vial permiten disminuir la Ta hasta 2.8 °K en E-O y hasta 3.5 °K en N-S.

TEMPERATURA MEDIA RADIANTE SEGÚN ESCENARIOS Y ORIENTACIÓN.

La temperatura media radiante (Tmr) determina el grado de confort y nivel de habitabilidad de un espacio exterior. Es por ello, que en la Tabla 4 fueron detalladas, según configuración morfológica y material, a escala peatonal.

- *Cañón vial E-O*: Del total de los escenarios estudiados, aquellos que registran menor Tmr durante el periodo de calentamiento (8 a 20 h) están vegetados, tienen un rango de albedo homogéneo 1 (nivel de albedo bajo en toda la envolvente), tanto para el perfil urbano sobre línea municipal, como para el escalonado. Corresponden a los valores VE_A1 y VE_B1 en la Tabla 4.

Las alternativas que más elevan la Tmr no están vegetadas, tienen rangos de albedo 2, 3, y 4, para ambos perfiles urbanos, correspondiendo a los valores SV_A 2,3,4 y SV_B2, 3, 4 en la Tabla 4.

Temperatura media radinte máxima (Tmr; K)																							
cañón E-O	Albedo homogéneo				Albedo combinado				cañón N-S	Albedo homogéneo				Albedo combinado									
		albedo 1	albedo 2	albedo 3	albedo 4		albedo 1	albedo 2		albedo 3	albedo 4		albedo 1	albedo 2	albedo 3	albedo 4							
VE	A	358,62	379,86	369,2	371,01	VE	A	355,27	377,59	367,67	367,17	SV	A	375,61	395,24	385,49	386,98	SV	A	370,6	392,48	380,97	383,81
	B	356,95	376	364,61	369,62		B	354,26	373,92	363,27	367,17		B	374,8	392,36	381,92	386,43		B	371,72	390,86	378,98	384,79

Tmr (K)

■ 380-400
■ 360-380
■ 340-360

Tmr (K)

■ 380-400
■ 360-380
■ 340-360

Tabla 4. Temperatura media radiante máxima (Tmr) según escenario y orientación del cañón vial, a una altura de 2 metros y en grados Kelvin (K).
 Fuente: Elaboración del autor.

- Cañón vial N-S: Al igual que en los cañones E-O, los escenarios con orientación N-S que elevan menos su Tmr están vegetados, tienen un rango de albedo 1, con perfil urbano sobre línea municipal y escalonado, indicados en VE_A1 y VE_B1 en la Tabla 4.

Aquellos escenarios que más elevan la Tmr del canal vial N-S no están vegetados, tienen rangos de albedo 2, 3, y 4, para ambos perfiles urbanos como se indica en SV_A 2, 3,4 y SV_B 2, 4 en la Tabla 4.

Las Tmr extremas entre los escenarios evaluados, registran diferencias entre la configuración más fría (VE_A4) y la más caliente (SV_A2) igual a 24°K en orientación de cañón E-O y 25°K en orientación N-S (Tabla 4).

Manteniendo constante la materialidad del canal vial es posible disminuir la Tmr hasta 20.9°K en canales viales E-O, (VE_B3) y hasta 17.6°K (VE_B4) en escenarios vegetados y con perfil escalonado.

Manteniendo constante la forma (edilicia y vegetal), las consecuencias de cambiar la materialidad del canal vial permiten disminuir la Tmr hasta 21.2 °K en E-O y hasta 22.3°K en N-S, siendo más eficientes los escenarios con albedo homogéneo bajo (VE_A1).

Cabe destacar que los materiales para pavimentos que resultan más eficientes desde el punto de vista térmico, son aquellos con alto nivel de albedo, los cuales, sin embargo, pueden causar severos problemas de confort visual en un recinto urbano. Es por ello que una alternativa recomendable es la aplicación de pavimentos con textura, como es el caso del pavimento "Pétreo pulido circular gris-P13-", graficado en la Figura 1.

Anivel internacional, investigaciones desarrolladas por Santamouris (2011) estudian superficies con geometría fractal -isotrópicas- que descomponen el haz de luz en todas las direcciones y, de esa forma, se disminuye el efecto de deslumbramiento trabajando sobre la rugosidad y texturas de las superficies o con pinturas termo crómicas que utilizan la energía de la radiación solar para cambiar de color.

CONCLUSIONES.

La morfología incrementa la captura de radiación solar y los materiales aumentan la permeabilidad, absorptividad y capacidad calorífica de las superficies de la envolvente, provocando un crecimiento de las cargas térmicas dentro de un recinto urbano. El factor de visión de cielo (SVF) es un indicador morfo-forestal. El mismo relaciona la estructura morfológica edilicia y forestal de un canal urbano. En los escenarios analizados, a medida que el SVF se incrementa, también lo hacen la temperatura del aire (Ta) y la temperatura media radiante (Tmr), debido al mayor ingreso de radiación de onda corta (solar) hacia el interior del cañón.

En un cañón urbano de 18 metros de alto y con un canal vial de 20 metros de ancho, la alternativa térmicamente más eficiente resulta de la configuración vegetada, con perfil urbano continuo sobre línea municipal y niveles de albedo alto en techos y pavimentos, y nivel de albedo bajo en fachadas. Estos escenarios registran disminuciones de Ta y Tmr de 6° y 25°, respectivamente.

Los resultados revelan que incrementar el porcentaje de vegetación y aplicar materiales con altos niveles de albedo en techos y pavimentos, es la estrategia más efectiva para disminuir la Ta.

Los parámetros de diseño que impactan en mayor medida sobre la reducción de la Tmr comprenden el incremento de la vegetación dentro del canal vial y la incorporación de materiales para fachadas con bajo nivel de albedo. La modificación de estas variables tiene un efecto más notorio en canales viales con orientación N-S que en aquellos E-O. Cabe subrayar que la densificación conlleva al incremento de la Tmr y éste, a su vez, produce la disminución de la habitabilidad térmica de los canales viales.

Al contrastar el peso de cada variable, se evidencia que la modificación del material de la envolvente tiene mayor impacto que la modificación de la morfología edilicia, tanto en canales vegetados, como sin vegetar. Esta información permite

rehabilitar térmicamente un recinto urbano mediante el empleo de materiales que se adecuen a las necesidades particulares de cada espacio, de acuerdo a su morfología, clima y orientación, sin requerir de una intervención de mayor envergadura que incluya trabajar sobre la forma edilicia.

Este trabajo es de carácter inicial, no obstante, entre las medidas de diseño identificadas se encuentran la promoción de materiales de construcción con alto albedo sobre superficies horizontales, formas de diseño del hábitat que disminuyan el periodo diario de exposición a la radiación solar -como es el caso del perfil urbano sobre línea municipal- y los trazados urbanos que faciliten los procesos de renovación atmosférica -orientación que favorezca la ventilación urbana. Estos criterios, aplicados al planeamiento urbano, contribuirán, en definitiva, a mejorar la eficiencia energética y ambiental en ciudades con altos niveles de radiación solar.

AGRADECIMIENTOS.

Se agradece a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica -ANPCYT- y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas -CONICET- que proporcionaron los fondos para la presente investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

AKBARI, Hashem; LEVINSON, Ronnen y STERNB, Stephanie. Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies. *Solar Energy*, 2008, vol. 82, n°7, pp. 648-655.
AKBARI, Hashem; MENON, Surabi y ROSENFELD, Arthur. Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO₂. *Climatic Change*, 2009, vol. 94, n°3, pp. 275-286.

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

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

ALI-TOUDERT, Fazia y MAYER, Helmut. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation on an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environmet*, 2006, n°41, pp. 94-108.

BRUSE, Michael. ENVI-met 3.1. On-Line Manual [en línea], 2006. [Consultado 22 mayo 2016] Disponible en: <http://www.envi-met.com>.

CORREA, Érica. *Isla de Calor Urbana. El caso del área metropolitana de Mendoza*. Tesis doctoral inédita, Universidad Nacional de Salta, Argentina, 2006.

CORREA, Érica; RUIZ, M. Angélica y CANTÓN M. Alicia. Morfología forestal y confort térmico en "ciudades oasis" de zonas áridas. *Ambiente Construido*, 2010, vol. 10, n°4, pp. 119-137.

DOYA, Maxime; BOZONNET, Emmanuel y ALLARD Francis. Experimental measurement of cool facades performance in a dense urban environment. *Energy and Buildings*, 2012, n° 55, pp. 42-50.

ERELL, Evyatar; PEARLMUTTER, David; BONEH, Daniel y KUTIEL, Pua Bar. Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban canyons. *Urban Climate*, 2014, n°10, pp. 367-386.

GIVONI, Baruch; Noguchi, MIKIKO; SAARONI, Hadas; POCHTER, Oded; YAACOV, Yaron; FELLER, Noa y BECKER, Stefan. Outdoor comfort research issues. *Energy and Buildings*, 2003, vol. 35, n°1, pp. 77-86.

JOHANSSON, Erik y EMMANUEL, Rohinton. The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the hot, humid city of Colombo, Sri Lanka. *International Journal Biometeorology*, 2006, vol. 51, n°2, pp. 119-133.

KOTTEK, Markus; GRIESER, Jürgen; BECK, Christoph; RUDOLF, Bruno y RUBEL, Franz. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, vol. 15, n° 3, pp. 259-263.

PEARLMUTTER, David; BERLINER, P., y SHAVIV, E. Urban climatology in arid regions: current research in the Negev desert. *International Journal of Climatology*, 2007, vol. 27, n°14, pp.1875-1885.

SANTAMOURIS, Matheos. *Advances in passive cooling (Buildings, energy and solar technology series)*. Londres: Earthscan Publications Ltd., 2007.

SANTAMOURIS, Matheos. *Energy and climate in the urban built environment*. New York: Routledge Publications. Taylor & Francis Group, 2011.

SANTAMOURIS Matheos. Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 2014, n°103, pp. 682-703.

SHASHUA-BAR, Limor; TSIROS, Ioannis y HOFFMAN, Milo. Passive cooling design options to ameliorate thermal comfort in urban streets of a Mediterranean climate (Athens) under hot summer conditions. *Building and Environment*, 2012, n°57, pp.110-119.

SHISHEGAR, Nastaran. The Impact of Green Areas on Mitigating Urban Heat Island Effect: A Review. *The International Journal of Environmental Sustainability*, 2014, vol. 9, n°1, pp. 119-130.

THORSSON, Sofia; LINDBERG, Fredrik; BJÖRKLUND, Jesper; HOLMER, Björn yRAYNER, David. Potential changes in outdoor thermal comfort conditions in Gothenburg, Sweden due to climate change: the influence of urban geometry. *International Journal of Climatology*, 2010, vol. 31, n°2, pp. 324-335.

YAGHOUBIAN, Neda y KLEISSL, Jan. Effect of reflective pavements on building energy use. *Urban Climate*, 2012, vol. 2, pp. 25-42.