

# APLICABILIDAD DE ESTRATEGIAS GENÉRICAS DE DISEÑO PASIVO EN EDIFICACIONES BAJO LA INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN CONCEPCIÓN Y SANTIAGO, CHILE

Artículo  
Recibido 31-08-2015  
Aceptado 24-11-2015

Applicability of generic passive design strategies in buildings under the influence of Climate Change in Concepción y Santiago, Chile

CARLOS RUBIO-BELLIDO, Universidad de Sevilla,  
Sevilla, España, carlosrubio@us.es

JESÚS ALBERTO PULIDO-ARCAS, Universidad de la Prefectura de  
Shiga, Hikone, Japón, jesus.a.pulido@gmail.com

MARÍA URETA-GRAGERA, Universidad de Sevilla,  
Sevilla, España, mariaug@hotmail.com

## RESUMEN

Las estrategias de diseño pasivo en arquitectura y el comportamiento energético de la edificación normalmente se cuantifican en base a archivos climáticos que, por lo general, no consideran las predicciones del clima. Este artículo profundiza en la generación de datos climáticos futuros y su influencia en el confort higrotérmico, así como en las estrategias de diseño arquitectónico genéricas de adaptación desde el punto de vista pasivo. Con ese fin, se han generado determinados escenarios climáticos para Concepción y Santiago, dos de las conurbaciones urbanas más pobladas de Chile, para los años 2020, 2050 y 2080. Las predicciones se han realizado para el escenario más extendido de emisiones de Gases de Efecto Invernadero GEIA 2 "medium-high", según el Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. Los niveles de confort se han examinado desde una perspectiva adaptativa, considerando estrategias de diseño genéricas, ambos modelos recogidos en la ASHRAE. Al analizar los pronósticos climáticos con los modelos de confort, se obtienen resultados para una mejor comprensión del grado de adaptación del usuario y la arquitectura al posible clima futuro. Esta investigación genera estrategias genéricas para optimizar el diseño de construcciones en Chile.

## Palabras clave

Cambio climático, confort térmico, confort adaptativo, estrategias de diseño pasivo

## ABSTRACT

Passive design strategies in architecture and building performance are normally quantified based on weather files that do not generally consider weather forecasts. This paper investigates the generation of future weather data and its influence on hygrothermal comfort, as well as the applicability of generic passive design strategies. To this end, climate scenarios were generated for Concepción and Santiago, two of the most highly populated conurbations in Chile, for the years 2020, 2050 and 2080. Predictions were produced for the most extensive greenhouse gas emissions scenario, GEIA 2 or "medium-high", according to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Comfort levels were analysed using an adaptive approach and considering generic design strategies, both of which are included in ASHRAE standards. Upon analysing the weather forecasts with comfort models, results were obtained that provide a better understanding of the degree of adaption of both the users and the architecture to the possible future climate. This research creates generic strategies to optimize the design of buildings in Chile.

## Keywords

Climate change, thermal comfort, adaptive comfort, passive design strategies

## 1. INTRODUCCIÓN.

Las predicciones sobre escenarios climáticos, la adaptación de la arquitectura y los usuarios a ellos, se postula, aunque con diversas incertidumbres (Schiermeier, 2010), como uno de los focos principales de investigación y desarrollo en el ámbito científico. Desde la creación del Intergovernmental Panel on Climate Change en 1988, que recientemente ha publicado su Quinto Informe de Evaluación (IPCC, 2014), numerosos son los estudios que consideran el calentamiento global, el aumento de las emisiones y la escasez de recursos. En esta línea, se han generado modelos de predicción para diversos escenarios climáticos (Jentsch, Bahaj y James, 2008). La mayoría de dichos modelos se han producido en Reino Unido -por diversas razones (Mylona, 2012)-, aunque comienzan a extenderse cada vez más a lo largo del marco internacional (Guan, 2009). Actualmente, de los múltiples escenarios IPCC, se ha trabajado en los B1, B2, A2 y A1FI, siendo el A2 "medium-high", el modelo de emisiones más frecuentemente empleado.

En Chile, un país con diversos climas, según Norma Chilena Oficial NCh 1079.Of2008, por su extensión y orografía, el impacto del cambio climático es un tema crucial para fomentar el desarrollo sustentable de sus ciudades y su arquitectura. Los comprometidos fenómenos naturales a producirse por este calentamiento global, han sido ampliamente estudiados desde el Ministerio de Medio Ambiente, creando el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (Oficina de Cambio Climático, 2014) y variadas han sido las implicaciones de la comunidad científica para estos supuestos futuros (Eriksen et al., 2011).

Desde el punto de vista del sector de la edificación en Chile, numerosos han sido también los criterios de diseño pasivo. Los actuales Términos de Referencia Estandarizados TDRé, Control Ambiental y Eficiencia Energética, aunque se centran en edificaciones terciarias, se han orientado hacia la adaptación climática y un mejor entendimiento del medio. En este tema, que se aborda de forma intensa en la actualidad (Robert and Kummert, 2009), el conocimiento de posibles escenarios climáticos cambiantes puede permitir prever una mejor comprensión de la adaptación climática, y así reducir los recursos y conseguir niveles aceptables de confort, entendiendo este último término como parámetro psicofísico que atiende a una relación entre ser humano, arquitectura y hábitat que se ha decantado de forma particular en cada cultura, sociedad y clima (Givoni, 1969).

## 2. OBJETIVO, MATERIALES Y METODOLOGÍA.

El objetivo principal de esta investigación es conocer los niveles de confort higrotérmico y las estrategias de diseño genéricas a aplicar en la arquitectura para futuros escenarios, teniendo en cuenta la acción del cambio climático. Los casos de estudio se centran en las áreas urbanas de Concepción y Santiago, dos de las más pobladas de Chile. Con el fin de cumplir este objetivo se ha desarrollado la siguiente metodología:

Para la obtención de los escenarios climáticos se han tomado los archivos climáticos disponibles (U.S. Department of Energy) Energy Plus Weather EPW, para Concepción y Santiago, provenientes del formato International Weather for Energy Calculations IWECC de ASHRAE. Las predicciones se han realizado considerando la idoneidad del modelo UK Met Office Hadley Centre Coupled Model 3 HadCM3 (Met Office), que contempla la combinación de las pautas A2a, A2b y A2c. Mediante el programa CCWorldWeatherGen (ídem), basado en los estudios de Belcher, Hacker y Powell (2005), el escenario de emisiones GEI A2 y los archivos EPW actuales, se obtienen mediante "morphing" los archivos climáticos para los años 2020, 2050 y 2080.

Los niveles de confort se han analizado cruzando los datos climáticos con dos modelos que reportan diferentes análisis basados en los 8760 datos horarios obtenidos para cada fecha y localización. Ambos se ejecutan desde el programa Climate Consultant 6.0 (Energy Design Tool UCLA) de la Universidad de California Los Ángeles UCLA y se basan en diagramas psicrométricos directamente relacionados con las variables climáticas. El primer modelo se basa en el confort adaptativo ASHRAE Standar 55-2013 (ASHRAE, 2013), fundamentado en los estudios de Humphreys y Nicol (2000), que tiene en cuenta espacios que están ventilados de forma natural. En estos espacios el usuario puede abrir y cerrar los huecos, por lo que las condiciones interiores dependen del clima exterior. Este modelo persigue establecer el porcentaje del año en el que las condiciones son confortables dentro de unos márgenes en los que el usuario puede adaptar su forma de vestir al clima. De esta forma, podemos estimar el porcentaje de horas anuales en las que el usuario puede sentir confort al interactuar con el medio en futuros escenarios. El segundo se sustenta en el modelo de confort ASHRAE Handbook of Fundamentals (ASHRAE, 2005), también conocido como modelo del voto predictivo medio (PMV), el cual, basado en los estudios de Fanger (1970), plantea diversas estrategias genéricas de diseño pasivo y activo para conseguir condiciones de confort teniendo en cuenta el clima específico y el porcentaje de personas insatisfechas. Así, es posible considerar en el presente pautas de diseño que sean potenciadas para futuros escenarios y, de esa manera, prever y optimizar las condiciones de confort del usuario. Una vez realizados estos análisis, se establece una serie de consideraciones a modo de conclusión que bien pueden cerrar el propósito de esta investigación y que se añaden al vasto conocimiento sobre habitar el clima cambiante.

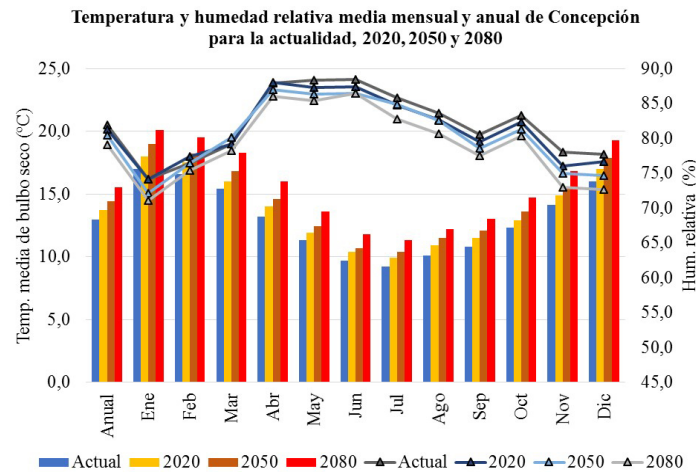


Figura 1. Gráfica de temperatura media de bulbo seco y humedad relativa en Concepción.  
 Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Año	Annual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura media de bulbo seco (°C)	Actual	13,0	17,0	16,6	15,4	13,2	11,3	9,7	9,2	10,1	10,8	12,3	14,2	16,0
	2020	13,7	18,0	17,5	16,0	14,0	11,9	10,4	9,9	10,9	11,5	12,9	14,9	17,0
	2050	14,4	19,0	18,2	16,8	14,6	12,4	10,7	10,4	11,5	12,1	13,6	15,6	17,9
	2080	15,6	20,1	19,5	18,3	16,0	13,6	11,8	11,3	12,2	13,0	14,7	16,8	19,3
Humedad relativa (%)	Actual	81,9	74,1	76,5	79,2	87,9	88,3	88,4	85,8	83,6	80,5	83,3	78,0	77,7
	2020	81,3	74,1	77,4	79,2	88,0	87,3	87,4	84,8	82,6	79,5	82,3	76,0	76,7
	2050	80,4	72,1	76,4	80,1	87,0	86,3	86,4	84,9	82,5	78,5	81,3	75,0	74,7
	2080	79,1	71,1	75,4	78,2	86,0	85,3	86,4	82,8	80,6	77,5	80,3	73,0	72,7
Radiación global horizontal (Wh/m2)	Actual	355	537	507	405	307	189	162	182	236	335	414	467	520
	2020	358	540	506	405	306	193	166	184	239	342	420	475	525
	2050	361	539	500	400	310	195	173	188	244	346	423	477	531
	2080	366	537	504	409	314	201	177	193	249	353	437	485	534

Tabla 1. Datos climáticos medios mensuales y anuales de Concepción para la actualidad, para 2020, 2050 y 2080. Fuente: Elaboración propia.

### 3. GENERACIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS.

#### 3.1. CONSIDERACIONES DEL MODELO.

Aunque el modelo HadCM3 A2 es el más extendido para realizar simulaciones para fechas futuras y en opinión de los autores puede considerarse como un camino de desarrollo "probable" sobre las escalas temporales estudiadas, es necesario establecer las siguientes consideraciones que esclarecen algunas limitaciones del modelo:

- Una cierta incertidumbre en los datos subyacentes de resolución del General Coupled Model (GCM) para casos específicos.
- La escasa representatividad del archivo actual EPW para una ubicación específica y su entorno inmediato. Por ejemplo: microclimas, islas de calor, variaciones climáticas localizadas, obstrucciones solares, etc.
- La imposibilidad de contemplar fenómenos naturales puntuales asociados al cambio climático como tormentas, lluvias estacionales, períodos de sequía, etc.

#### 3.2. MODELO DE ESCENARIO DE GEI A2 PARA CONCEPCIÓN Y SANTIAGO.

Los datos que a continuación se exponen derivan de los archivos EPW generados para cada localización y fecha. De todas las variables climáticas, el estudio se centra en la temperatura de bulbo seco, la humedad relativa y la radiación global horizontal de acuerdo con los TDRé. Para cada una de estas variables se cuenta con los 8760 datos horarios del año. En aras de una mayor claridad y teniendo en cuenta que son predicciones, se han agrupado por meses y por año en las siguientes tablas y figuras. Los datos se analizan para la anualidad y se agrupan durante las estaciones de invierno y verano.

Como se puede observar de forma gráfica, en la localización de Concepción (Figura 1) la temperatura media anual se incrementa desde los 13,0°C actuales hasta los 15,6°C en 2080 (Tabla 1), la humedad relativa decae levemente del 81,9% al 79,1%, manteniéndose en niveles propios de este clima y la radiación global horizontal aumenta sutilmente 355 a 366 Wh/m2. Si se analizan los datos mensuales, se advierte que el incremento de temperatura en invierno es de entre 2,1°C y 2,2°C, según mes, sin embargo, durante los meses de

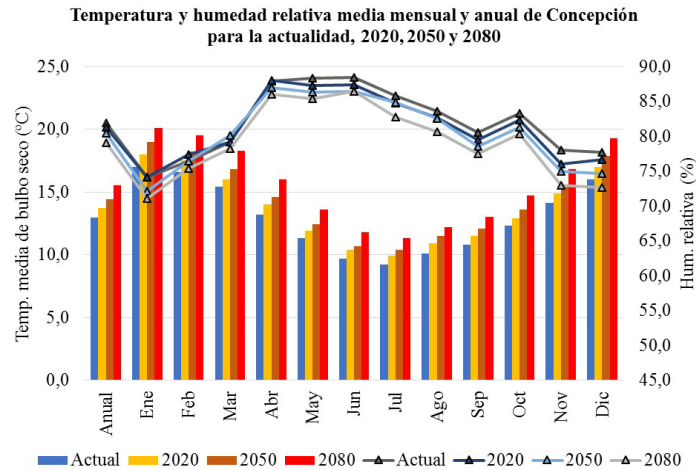


Figura 2: Gráfica de temperatura media de bulbo seco y humedad relativa en Santiago.  
 Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Año	Annual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura media de bulbo seco (°C)	Actual	13,0	17,0	16,6	15,4	13,2	11,3	9,7	9,2	10,1	10,8	12,3	14,2	16,0
	2020	13,7	18,0	17,5	16,0	14,0	11,9	10,4	9,9	10,9	11,5	12,9	14,9	17,0
	2050	14,4	19,0	18,2	16,8	14,6	12,4	10,7	10,4	11,5	12,1	13,6	15,6	17,9
	2080	15,6	20,1	19,5	18,3	16,0	13,6	11,8	11,3	12,2	13,0	14,7	16,8	19,3
Humedad relativa (%)	Actual	81,9	74,1	76,5	79,2	87,9	88,3	88,4	85,8	83,6	80,5	83,3	78,0	77,7
	2020	81,3	74,1	77,4	79,2	88,0	87,3	87,4	84,8	82,6	79,5	82,3	76,0	76,7
	2050	80,4	72,1	76,4	80,1	87,0	86,3	86,4	84,9	82,5	78,5	81,3	75,0	74,7
	2080	79,1	71,1	75,4	78,2	86,0	85,3	86,4	82,8	80,6	77,5	80,3	73,0	72,7
Radiación global horizontal (Wh/m2)	Actual	355	537	507	405	307	189	162	182	236	335	414	467	520
	2020	358	540	506	405	306	193	166	184	239	342	420	475	525
	2050	361	539	500	400	310	195	173	188	244	346	423	477	531
	2080	366	537	504	409	314	201	177	193	249	353	437	485	534

Tabla 2: Datos climáticos medios mensuales y anuales de Santiago para la actualidad, y para 2020, 2050 y 2080. Fuente: Elaboración propia.

verano éste se acentúa, oscilando entre los 3,3°C y los 2,9°C. Ello, unido al decremento de la humedad relativa en estos meses de entre 5,0% y 1,1%, denota un cambio climatológico significativo en esta época de año. Durante el invierno, aunque se produce un notable descenso en la humedad relativa, ésta sigue ubicándose en niveles altos propios de este clima. La radiación global horizontal sufre ligeros cambios mensuales, siendo significativo su mayor aumento en meses de invierno y su estabilización o ligero decremento en los meses de verano.

de verano decae entre 8,0% y 5,0%, lo cual denota un cambio climatológico aún más brusco que en Concepción. Durante el invierno, la humedad relativa llega hasta el 70,3%, lo cual constituye un sustancioso descenso que, unido al incremento de temperatura, también modifica de forma notable esta época del año. La radiación global horizontal, al igual que en Concepción, sufre ligeros cambios mensuales, pero en este caso se nota un aumento más constante en la mayoría de los meses del año.

En el caso de Santiago, con la misma escala de gráfico (Figura 2), se observa cómo el cambio climático afecta de forma más abrupta debido a la mayor diferencia de estaciones en este clima. La temperatura media anual se incrementa desde los 14,5°C actuales hasta los 18,1°C en 2080 (Tabla 2), la humedad relativa decae del 71,2% al 65,3%, y la radiación global horizontal aumenta levemente de 390 a 401 Wh/m2. Al analizar los datos mensuales se advierte que el incremento de temperatura en verano es de entre los 4,2°C y los 4,4°C, según mes; no obstante, durante los meses de invierno la oscilación es menor, de entre 3,3°C a 2,7 °C. La humedad relativa en los meses

Año	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Actual	10,6	32,3	29,8	20,6	7,5	1,3	0,0	0,0	0,0	1,5	4,4	9,9	21,4
2020	12,0	33,3	31,1	24,1	9,0	1,6	0,1	0,0	0,0	1,5	5,4	11,7	9,9
2050	14,4	37,9	35,9	26,6	10,1	1,7	0,3	0,0	0,0	2,5	6,9	19,3	32,8
2080	18,0	41,7	40,6	32,1	16,9	4,4	1,3	0,0	0,9	3,8	11,3	25,4	39,0

Tabla 3. Confort adaptativo para Concepción en % de horas en la actualidad, en 2020, 2050 y 2080.  
 Fuente: Elaboración propia.

Año	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Actual	16,2	29,7	27,5	25,7	15,0	9,5	0,0	0,0	0,7	8,5	18,8	27,2	32,7
2020	16,9	26,1	26,0	25,7	17,6	11,2	2,4	0,0	4,7	10,3	19,8	27,5	32,4
2050	18,7	26,9	28,6	26,7	21,0	13,0	6,3	0,4	8,1	12,5	21,2	27,6	32,4
2080	20,3	24,9	28,4	28,8	23,8	17,3	10,1	6,3	10,1	16,3	21,6	26,7	30,5

Tabla 4. Confort adaptativo para Santiago en % de horas en la actualidad, en 2020, 2050 y 2080.  
 Fuente: Elaboración propia.

## 4. APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE CONFORT.

### 4.1. CONSIDERACIONES DE LOS MODELOS.

Los modelos de confort que se desarrollan a continuación se basan en los datos de los archivos EPW, por lo que se tienen en cuenta las limitaciones antes mencionadas. Además, estos estudios psicrométricos no consideran elementos de la envolvente, orientación o factor de forma de la edificación. Así, en el modelo de confort que considera las estrategias de diseño, podemos denominar éstas como "genéricas", ya que son los límites establecidos en un diagrama. Dichos límites han sido contrastados con diversos experimentos de campo a lo largo del mundo y su fortaleza radica en permiten la comparación entre los datos actuales y los futuros en los casos de estudio.

### 4.2. CONFORT ADAPTATIVO.

El modelo de confort adaptativo definido en ASHRAE Standard 55-2013 asume que las condiciones interiores son aceptables dentro de unos límites marcados por la temperatura del aire exterior, siendo el rango máximo de estudio entre los 10°C y los 33,5°C. En ambos casos de estudio, las temperaturas medias de invierno son inferiores al mínimo, por lo que durante estos meses se prevé que el confort no se puede conseguir sin sistemas de aporte de calor. No obstante y debido a la costumbre de utilizar ropa de abrigo en invierno y a la tolerancia que suelen demostrar los usuarios que habitan los edificios ventilados de forma natural (Bouden y Ghrab, 2005; Feriadi y Wong, 2004), los

límites son ampliados en el rango del 80%. Tal ampliación se fundamenta en el hecho de que el usuario adaptará su forma de vestir al clima en un rango de 1,0 a 0,5 Clo y que realizará actividades sedentarias propias de habitar un hogar de entre 1.0 a 1.1 Met. Este método no evalúa cómo el confort es afectado por las diversas estrategias de diseño pasivas, sino que lo determina sólo en términos de confort adaptativo, que contempla que ventilación natural.

Desde ese enfoque, el confort se consigue actualmente (usando ventilación natural) el 10,6% de las horas del año en Concepción (Tabla 3) y el 16,2%, en Santiago (Tabla 4). Debido al calentamiento global y considerando estos climas como relativamente fríos, el porcentaje de horas de confort sube hasta el 18,0% en Concepción y hasta el 20,3% en Santiago para las predicciones de 2080.

Si analizamos este incremento mes a mes, en el caso de Concepción (Tabla 3) se puede señalar que la mayor diferencia se da en los meses más cálidos y que durante invierno esta no es significativa, manteniéndose en unos niveles por debajo del confort. Por lo que una mayor interacción con el entorno, cuando las condiciones exteriores son más cercanas a los límites de confort, no debe descuidar en invierno el obtenerla obtención de ganancias en invierno y disminuir la disminución de pérdidas.

En el análisis mensual de Santiago (Tabla 4), se observa una ligera pérdida en las condiciones de confort de noviembre a febrero, ya que las temperaturas exteriores exceden los límites. Por ello, habrá que mejorar las estrategias de refrigeración en la edificación. En condiciones invernales, sólo en la predicción de 2080, parece ser probable que en un porcentaje representativo de horas, en torno al 10% máximo, se puedan obtener niveles de confort con ventilación natural.

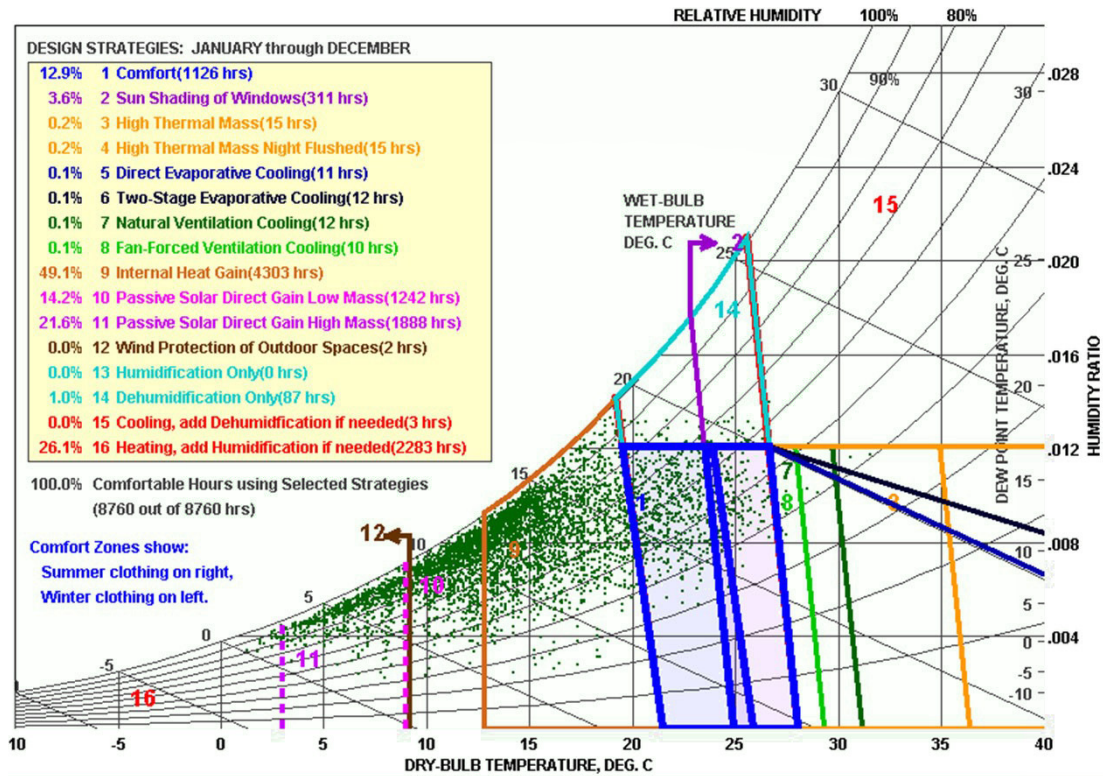


Figura 3. Ejemplo de estrategias genéricas de diseño para 2050 en Concepción.  
 Fuente: Climate Consultant 6.0.

### 4.3. CONFORT SEGÚN ASHRAE HANDBOOK OF FUNDAMENTALS: ESTRATEGIAS GENÉRICAS DE DISEÑO PASIVO.

El modelo de confort ASHRAE Handbook of Fundamentals proviene de un estudio experimental que considera la temperatura de bulbo seco, la humedad relativa, la velocidad del aire y la actividad metabólica. Además, determina el PMV estimando el vestuario empleado en invierno y verano, y el hecho de que el usuario se encuentra más confortable con el aire más seco cuando las temperaturas son ligeramente más altas. Este modelo (Figura 3) es idóneo para nuestros particulares casos de estudio, ya que actualmente ambos climas poseen un elevado porcentaje de humedad relativa.

Al aplicar este modelo de confort para el caso de Concepción (Tabla 5 y Figura 4) y Santiago (Tabla 5 y Figura 5) es posible denotar que el confort se consigue en la actualidad el 8,1% y el 15,4% del año, respectivamente, es decir, las condiciones climáticas exteriores se establecen dentro de la zona 1 durante esta serie de horas anuales. Este parámetro se ve incrementado paulatinamente hasta la predicción de 2080 en 15,2%, en Concepción, y en 19,7%, en Santiago, como ya ocurría con el modelo de confort adaptativo, por lo que el diseño arquitectónico debería tender a interactuar de forma más activa con el exterior. Es relevante recordar

las consideraciones establecidas tanto en las predicciones como en la aplicación de estos modelos, ya que el cambio climático puede llevar a situaciones devastadoras asociadas a múltiples factores. De esa forma, este análisis se realiza en el contexto de lo que, en términos físicos, se denomina "equilibrio inestable".

Al examinar cada una de las 16 estrategias que establece el modelo para el año, en la localización de Concepción, es posible distinguir (Figura 4) las más influyentes en la actualidad y en escenarios futuros. El uso de protecciones solares aumenta considerablemente del 0,7 al 6,7%. Este parámetro está relacionado con el decremento de ganancias solares en elementos ligeros, como ventanas y atrios, por lo que implementar el diseño de los mismos, sobre todo los orientados al norte, supondrá conseguir mayores niveles de confort en los meses más cálidos y tener menos pérdidas en los más fríos. Como se ha advertido a partir de los datos climáticos, aunque exista un calentamiento paulatino las estrategias de refrigeración 4, 5, 6, 7, 8, 13 y 15 tienen apenas influencia en Concepción, pues las temperaturas exteriores se mantienen por debajo de los límites de confort. Sin embargo, aquellas estrategias de incremento de calor sensible y latente sí que son determinantes. Es común que en este tipo de clima las ganancias internas sean decisivas para conseguir sensaciones de confort. En la actualidad, con un 42,1% de las horas se puede llegar a niveles aceptables. Nótese que esto se consigue con mayor facilidad en edificios terciarios con gran afluencia de público y equipamiento, no obstante, es mucho más

Modelo ASHRAE Handbook of Fundamentals Estrategias genéricas de diseño pasivo en % de horas	Concepción				Santiago			
	Actual	2020	2050	2080	Actual	2020	2050	2080
1. Confort	8,1	10,2	12,9	15,2	15,4	17,2	17,9	19,7
2. Protecciones solares	0,7	1,7	3,6	6,7	10,8	12,1	14,2	16,6
3. Alta masa térmica	0,0	0,1	0,2	0,7	6,1	8,0	10,6	13,2
4. A. M. T. con disipación nocturna	0,0	0,1	0,2	0,7	6,1	8,0	10,8	14,2
5. Enfriamiento evaporativo directo	0,0	0,0	0,1	0,7	6,0	7,3	9,5	11,1
6. Enfriamiento evaporativo incrementado	0,0	0,0	0,1	0,7	6,1	7,5	10,1	12,5
7. Ventilación natural	0,0	0,1	0,1	0,7	4,8	5,3	5,2	5,2
8. Ventilación forzada	0,0	0,0	0,1	0,6	2,9	2,8	2,7	2,7
9. Ganancias internas	42,1	45,5	49,1	53,1	33,7	36,1	36,8	37,4
10. Ganancias solares en elem. ligeros	17,4	15,6	14,2	12,9	9,6	7,8	6,5	4,9
11. Ganancias solares en elem. de alta masa	20,4	20,9	21,6	22,4	21,9	21,7	21,0	19,5
12. Protección al viento	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13. Humidificación	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14. Deshumidificación	0,2	0,7	1,0	3,1	0,1	0,3	0,4	1,4
15. Refrigeración	0,0	0,0	0,0	0,3	0,1	0,2	0,7	1,3
16. Calefacción	35,1	31,0	26,1	19,2	33,6	29,5	25,8	20,4

Tabla 5. Confort adaptativo para Santiago en % de horas en la actualidad, en 2020, 2050 y 2080.  
 Fuente: Elaboración propia.

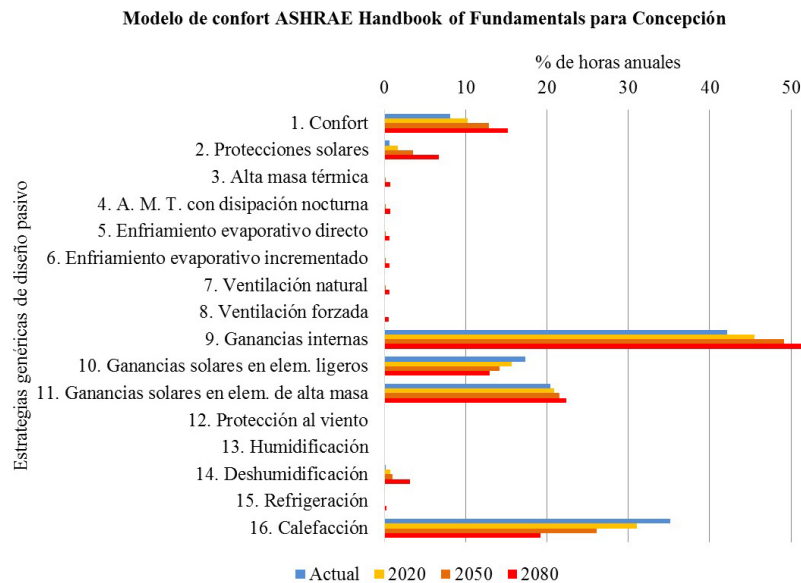


Figura 4. Estrategias genéricas de diseño para Concepción en la actualidad, en 2020, 2050 y 2080.  
 Fuente: Elaboración propia.

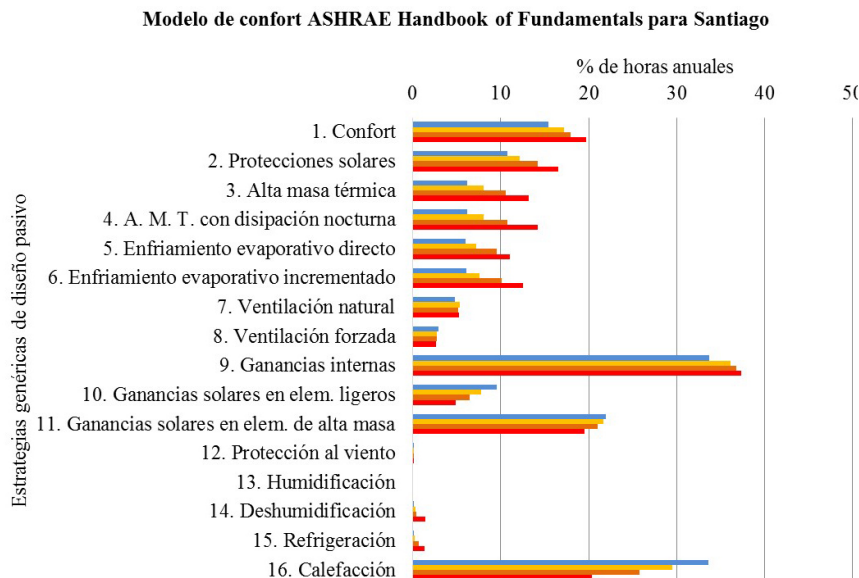


Figura 5. Estrategias genéricas de diseño para Santiago en la actualidad, en 2020, 2050 y 2080.  
 Fuente: Elaboración propia.

difícil adquirir este elevado porcentaje en viviendas. Este valor está estrechamente ligado a la calefacción, que bien puede generarse mediante sistemas activos, pero que también se puede conseguir mediante elementos pasivos. En la actualidad, la estrategia de calefacción supone el 35,1% del año ya que, aunque se consigan altas ganancias internas, no se alcanzan los límites de confort. A medida que se produce un incremento en la temperatura exterior se reduce el porcentaje de calefacción, al 19,2% en 2080, adquiriendo mayor importancia las ganancias internas: 53,1% en igual fecha. Asimismo, el porcentaje de horas en los que se obtiene ganancias solares en los elementos de gran masa, se incrementa sensiblemente, con lo que una mejora en el diseño de la envolvente con sistemas pasivos de acumulación de calor, puede mejorar la eficiencia energética y el confort térmico si existe un rango mayor de temperaturas. Al reducir el uso de elementos activos y conseguir una mayor interacción con el ambiente exterior, hay que considerar sistemas de deshumidificación, pues los niveles de humedad relativa se mantienen altos pese a su decremento.

En el caso de Santiago, las estrategias de confort son bien diferentes, tanto en la actualidad como en futuros escenarios, puesto que hoy son influyentes las estrategias pasivas de enfriamiento y éstas se ven incrementadas después de forma paulatina, siendo determinantes para conseguir confort. Así, la tendencia supone un diseño que tenga en consideración que la envolvente debe disipar el calentamiento que se verá incrementado mediante el cambio climático en un 14,2% en 2080, potenciar estrategias de enfriamiento evaporativo en un 11,1 y 12,15%, e incrementar las protecciones solares según orientación, en un 16,6%. Las estrategias de calefacción se reducen del 33,6 al 20,4% y aunque las estrategias de refrigeración aumenten levemente, son menos influyentes que la deshumidificación en determinados momentos del año, pese a la reducción de la humedad relativa. Nuevamente, las ganancias internas constituyen el parámetro más destacado, pues permiten prever meses menos fríos, en la medida en que éstas ellas varían de un 33,7% en la actualidad a un 37,4% en 2080 (aunque sufre un incremento bastante menor que en el caso de Concepción). Las ganancias solares también se reducen, por lo que un diseño en el que se perfeccione el factor de forma, se considere estrategias de enfriamiento pasivo y se optimice el porcentaje de huecos según orientación, mejorará la eficiencia energética y el confort en las edificaciones.

## 5. Conclusiones.

En esta investigación se ha tratado el caso de estudio que constituyen las ciudades de Concepción y Santiago en Chile. Las conclusiones deben entenderse, por tanto, como particulares para dicho caso. El método de análisis puede extrapolarse a otros lugares, teniendo en cuenta la especificidad de cada localización, así como otros factores, tales como los legales o socioculturales. Dicho esto, se pueden extraer las siguientes conclusiones del presente estudio:

- La comparación entre los escenarios climáticos presentes y futuros permite llegar a ciertas conclusiones acerca de la conveniencia de adaptar el diseño de los edificios a un fenómeno cambiante, como lo es el clima. Los escenarios calculados (2020, 2050 y 2080) suponen un período que bien puede coincidir con la vida útil de un edificio construido hoy (5, 25 y 65 años, respectivamente), por lo que no se han tratado fenómenos lejanos en el tiempo o improbables. En este sentido, sería conveniente plantear un diseño "dinámico" para el edificio, dicho de otro modo, un diseño preparado para los futuros escenarios climatológicos posibles.

- Aunque la variación en el clima es un fenómeno que, globalmente, es considerado como perjudicial, en algunos estudios particulares, como el que nos ocupa, puede resultar, paradójicamente, beneficioso. Un aumento de las temperaturas medias tiene como efectos principales, en este caso, un aumento de las horas de confort durante el año y una disminución del uso de sistemas artificiales de calefacción. No obstante, sería erróneo estimar que el cambio del clima es beneficioso para las ciudades de Santiago y Concepción, o para Chile en su conjunto, ya que hay que considerar los efectos perjudiciales de este cambio en otros ámbitos, como por ejemplo, el desequilibrio de los ecosistemas, la disminución de las precipitaciones o la recurrencia de fenómenos catastróficos (tifones, lluvias torrenciales, sequías, etc.).

- Puesto que se han analizado las variaciones climáticas en dos ciudades de tamaño considerable, sería conveniente, tomando como punto de partida este caso de estudio, combinar los modelos experimentales GEI A2 con el efecto que los tejidos urbanos densos ejercen sobre el microclima de las ciudades. De hecho, algunos de los principales efectos de un denso tejido urbano, en este sentido, suelen ser un aumento de las temperaturas medias y una disminución de la humedad relativa. Tal consecuencia, en asociación con los escenarios propuestos, podría arrojar conclusiones interesantes acerca del agravamiento del cambio del clima en extensos conglomerados urbanos.

Con todo, los modelos de confort y las estrategias genéricas de diseño pasivo han determinado ciertas pautas a seguir desde el punto de vista del proyecto constructivo que se prevén como bases para una arquitectura más sustentable y consciente con el hábitat. Profundizando en los casos de estudio, tanto Concepción como Santiago se ven



influenciados de forma notable en este proceso de cambio. En Concepción, aunque siguen primando las estrategias de calentamiento, hay que considerar las ganancias solares y avanzar hacia sistemas pasivos de calefacción. En el caso de Santiago, la tendencia denota que la adaptación se debe centrar en el enfriamiento mediante sistemas pasivos, teniendo en cuenta que en los meses más fríos aún se necesitarán ganancias para conseguir confort.

Numerosas son las incertidumbres que estos modelos plantean y esta investigación pretende arrojar luz sobre los posibles fenómenos que ocurrirán en el futuro, así como nuestro modo de adaptarnos a ellos. En definitiva, las simulaciones o predicciones nos permiten observar con cierta cautela hechos que aún no han ocurrido, de modo que habrá que concebirlas como tales, dentro del marco científico en el cual se inscribe esta investigación. Comprender estos cambios y reflexionar sobre cómo los edificios pueden ser más resilientes respecto de ellos, es un primer paso para una adaptación sensible y consciente al cambio del clima.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Departamento de Arquitectura y Diseño Urbano de la Universidad de California por la herramienta Climate Consultant y al grupo de investigación de Energía Sustentable de la Universidad de Southampton por la herramienta CCWorldWeatherGen, ambas de acceso abierto.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

AHSRAE STANDARDS COMMITTEE. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. 2013. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning, 2013.

AHSRAE TECHNICAL COMMITTEE. *ASHRAE Handbook of Fundamentals: 2005*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning, 2005.

BELCHER, Stephen, HACKER, Jacob y POWELL, Diana. Constructing design weather data for futureclimates. *Building Services Engineering Research and Technology* [en línea]. 2005, n°26, pp. 49-61. [Consultado 25 agosto 2015]. DOI:10.1191/0143624405bt112oa

BOUDEN, Chiheb y GHRAB, Nadia. An adaptive thermal comfort model for the Tunisian context: A field study results. *Energy and Buildings* [en línea]. 2005, n°37, pp. 952-963. [Consultado 25 agosto 2015]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2004.12.003

ENERGY DESIGN TOOL UCLA [en línea]. [Consultado 28 agosto 2015]. Disponible en: <http://www.energydesign-tools.aud.ucla.edu/>

ERIKSEN, Siri, ALDUNCE Paulina, SEKHAR, Chandra, D'ALMEIDA, Rafael, MOLEFE, John Isaac, NHEMACHEN, Charles, O'BRIEN, Karen, OLORUNFEMI, Felix, PARK, Jacob, SYGNA, Linda y

ULSRUD, Kirsten. When not every response to climate change is a good one: Identifying principles for sustainable adaptation. *Climate and Development* [en línea]. 2011, n°3, pp. 7-20. [Consultado 25 agosto 2015]. DOI:10.3763/cdev.2010.0060

FANGER, Poul Ole. *Thermal Comfort*. 1ª ed. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.

FERIADI, Henry y WONG, Nyuk Hien. Thermal comfort for naturally ventilated houses in Indonesia. *Energy and Buildings* [en línea]. 2004, vol. 36, n°7, pp. 614-626. [Consultado 25 agosto 2015]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2004.01.011

GUAN, Lisa. Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings. *Building and Environment* [en línea]. 2009, n°44, pp. 793-800. [Consultado 25 agosto 2015]. DOI:10.1016/j.buildenv.2008.05.021

GIVONI, Baruch. *Man, Climate and Architecture*. 1ª ed. Amsterdam/London/New York: Elsevier Publishing Company Limited, 1969.

HUMPHREYS, Michael y NICOL, Fergus. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings* [en línea]. 2002, vol. 34 n°6, pp. 563-572. [Consultado 25 agosto 2015]. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00006-3

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: 2014*. Ginebra: IPCC, 2014.

JENTSCH, Mark F., BAHAJ, AbuBakr S. y JAMES, Patrick A. B. Climate change future proofing of buildings - Generation and assessment of building simulation weather file. *Energy and Buildings* [en línea]. 2008, n°40, pp. 2148-2168. [Consultado 25 agosto 2015]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.06.005

MET OFFICE. Met office Hadley centre [en línea]. [Consultado 28 agosto 2015]. Disponible en: <http://www.metoffice.gov.uk/climate-change/resources/hadley>

MYLONA, Anastasia. The use of UKCP09 to produce weather files for building simulation. *Building Services Engineering Research and Technology* [en línea], 2010, vol. 33, n°1, pp. 51-62. [Consultado 25 agosto 2015]. DOI: 10.1177/0143624411428951

OFICINA DE CAMBIO CLIMÁTICO. *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático: 2014*. Santiago: Ministerio del Medio Ambiente, 2014.

ROBERT, Amélie, KUMMERT, Michaël. Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past. *Building and Environment* [en línea]. 2012, n°55, pp. 150-158. [Consultado 25 agosto 2015]. DOI:10.1016/j.buildenv.2011.12.014

SCHIERMEIER, Quirin. The real holes in climate science. *Nature* [en línea]. 2010, vol. 463, n°7279, pp. 284-287. [Consultado 25 agosto 2015] DOI: 10.1038/463284a

UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON. Sustainable Energy Research Group [en línea]. [Consultado 28 agosto 2015]. Disponible en: <http://www.energy.soton.ac.uk/ccworldweathergen/>

U.S. Department of Energy [en línea]. [Consultado 28 agosto 2015]. Disponible en: [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata\\_about.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm)