



# **INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHETUMAL**

## **“Validación de modelos de simulación térmica aplicado a casas de interés social de tipo aislado en clima cálido subhúmedo”**

Tesis que para obtener el Grado de:

### **Maestro en Construcción**

Presenta:

**Arq. Ricardo Alexis Barrientos González**

Director:

**Dr. Ricardo Enrique Vega Azamar**

Chetumal, Quintana Roo a 24 de octubre del 2019

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen .....	1
Abstract .....	1
Introducción.....	2
CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN .....	3
1.1 Antecedentes.....	4
1.1.1 Sustentabilidad y eficiencia energética internacional .....	4
1.1.2 Situación de la vivienda social.....	7
1.2 Planteamiento del problema.....	8
1.3 Justificación .....	10
1.4 Hipótesis.....	10
1.5 Objetivo general .....	11
1.5.1 Objetivos particulares .....	11
1.6 Delimitación del tema.....	11
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 Marco conceptual .....	13
2.1.1 Ganancias de calor en los edificios .....	13
2.1.2 Modelos de simulación y enfoques de evaluación.....	13
2.1.3 Discrepancia en las predicciones .....	15
2.1.4 Modelación y cálculo DesignBuilder + EnergyPlus.....	16
2.2 Estado del arte .....	18
2.2.1 Validación de modelos.....	18
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	22
3.1 Diseño metodológico.....	23
3.2 Equipos y herramientas de trabajo .....	25
3.2.1 Adquisidores de datos para interior .....	25
3.2.2 Adquisidores de datos para exterior .....	26
3.2.3 Creación de archivo meteorológico personalizado .....	27
3.3 Procesamiento de información .....	27
3.3.1 Análisis de incertidumbre.....	27
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29

4.1 Casos de estudio.....	30
4.2 Configuración de los modelos teóricos.....	32
4.2.1 Configuración físico-constructiva .....	32
4.2.2 Componentes de sistemas eléctricos .....	34
A) Aparatos.....	34
B) Iluminación.....	36
C) Aire acondicionado .....	37
4.2.3 Esquema de operación .....	37
4.3 Primer periodo de monitoreo en recámara acondicionada: Febrero-Abril 2019....	37
4.3.1 Resultados ambientales en interior.....	38
4.4 Segundo periodo de monitoreo a nivel multi-zona: semana representativa Mayo 2019 .....	42
4.4.1 Evaluación de temperatura en microclima.....	44
4.5 Validación de modelos mediante iteraciones.....	46
4.5.1 Validación modelo Caso 1 .....	46
4.5.2 Validación modelo Caso 2.....	50
4.5.3 Ganancias de calor en ambos casos.....	54
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES .....	56
5.1 Conclusiones.....	57
5.2 Recomendaciones .....	58
REFERENCIAS .....	59
ANEXOS.....	63
Anexo 1: Formato descriptivo de componentes de vivienda.....	63
Anexo 2: Publicación de artículo científico .....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. División porcentual del consumo energético por sector en el 2017, realizado a partir de datos de la SENER.....	5
Figura 2. Mapa con la división regional según las características climáticas de México. .	6
Figura 3. Periodos horarios de mayor uso de lavadora según ENCEVI 2018 .....	7
Figura 4. Diagrama de flujo de las actividades realizadas Elaborado a partir de la metodología ASHRAE 14-2002 y Hwa Cho (2019) .....	23
Figura 5. Adquisidores de datos localizados colocados sobre muro en las recámaras principales, y suspendidos debajo del plafón en zonas comunes.....	25
Figura 6. Estación meteorológica ubicada en el ITCH (izq.). Dispositivo HOBO con su protector solar, localizado en la azotea de caso de estudio 1 (der.).....	26
Figura 7. Distancia entre los casos de estudio y la estación meteorológica .....	26
Figura 8. Pestaña de aplicación para convertir archivos climatológicos para EnergyPlus .....	27
Figura 9. Imagen satelital de Chetumal, señalando el fraccionamiento donde se encuentran los casos estudiados. ....	30
Figura 10. (De izquierda a derecha) Plantas arquitectónicas de las viviendas correspondiente al caso 1, caso 2 y caso 3.....	31
Figura 11. Creación de modelos geométricos mediante DesignBuilder. De arriba a abajo: Casa 1, Casa 2, Casa 3. ....	33
Figura 12. Definición del uso de equipos mediante la simplificación del cálculo por potencia absoluta.....	35
Figura 13. Comparación anual de las temperaturas promedio semanales según el archivo histórico y datos de CONAGUA .....	38
Figura 14. Comparación de parámetros interiores en Recámara de Casa 1 .....	39
Figura 15. Comparación de parámetros interiores en Recámara de Casa 2 .....	40
Figura 16. Comparación de parámetros interiores en Recámara Casa 3.....	41
Figura 17. Comparación gráfica del consumo energético en los casos estudiados .....	42
Figura 18. Evaluación de las mediciones registradas mediante HOBO y la estación Davis Vantage Pro .....	43
Figura 19. Representación del error en las mediciones registrado el día 10 de mayo en la vivienda 1 .....	44
Figura 20. Comparación gráfica de parámetros ambientales de micro-clima y macro-clima para el Caso de estudio 1 .....	45
Figura 21. Comparación gráfica de parámetros ambientales de micro-clima y macro-clima para el Caso de estudio 1 .....	46
Figura 22 Regresión lineal de parámetros ambientales en recámara .....	47
Figura 23. Parámetros ambientales en sala-comedor.....	48
Figura 24. Comparación de variación de temperatura horaria real contra simulada en Recámara.....	48
Figura 25. Comparación de oscilación horaria de parámetros reales contra simulados en Sala-comedor .....	49
Figura 26. Comparación de demanda energética durante la semana representativa ..	49

Figura 27. Regresión lineal: Recámara principal .....	50
Figura 28. Regresión lineal: Comedor-cocina .....	51
Figura 29. Regresión lineal: Recámara/bodega .....	51
Figura 30. Comparación de parámetros interiores en Recámara principal .....	52
Figura 31. Comparación de parámetros interiores en Recámara-bodega.....	53
Figura 32. Comparación de parámetros interiores en Comedor-cocina .....	53
Figura 33. Comparación de demanda energética durante la semana de evaluación .	54
Figura 34. Comparación de ganancias térmicas en ambos casos de estudio .....	54

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de diseño de las viviendas seleccionadas.....	31
Tabla 2. Descripción de las propiedades térmicas de los materiales utilizados en la vivienda.....	33
Tabla 3. Inventario de aparatos eléctricos de cada casa agrupados por zona .....	34
Tabla 4. Esquema de operación de luminarias Casa 1.....	36
Tabla 5. Esquema de operación de luminarias Casa 2 .....	36
Tabla 6. Esquema de operación de luminarias Casa 3.....	36
Tabla 7. Características de los equipos de aire acondicionado que cuenta cada vivienda.....	37
Tabla 8. Resultados de la primera campaña de monitoreo contra dos niveles de simulación: con Archivo Meteorológico Histórico (AH) y el personalizado (AP). .....	39
Tabla 9. Cálculo de la media de consumo energético con base en el consumo facturado por CFE. ....	41
Tabla 10. Comparación del error de consumo eléctrico en kWh entre lo simulado contra el real.....	41
Tabla 11. Desglose porcentual del consumo total por sistema eléctrico.....	42
Tabla 12. Medición del error en los datos ambientales.....	43
Tabla 13. Análisis de parámetros ambientales In situ contra la estación meteorológica.	45
Tabla 14. Resultado de las iteraciones para validación en Casa 1 .....	47
Tabla 15. Comparación de iteraciones para validación en Casa 2.....	50
Tabla 16. Representación porcentual comparativa de las ganancias térmicas .....	55

## Resumen

Las políticas internacionales promueven la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas del consumo de energía proveniente de combustibles fósiles, de la cual se estima que el sector habitacional es responsable de cerca del 40% del total de emisiones generadas a nivel mundial, producidas durante la etapa operativa dentro del ciclo de vida de los edificios. Por otro lado, se ha identificado que las condiciones ambientales son determinantes para el uso de sistemas tanto de calefacción y aire acondicionado (HVAC), sistemas que representan más del 60% de total de la energía consumida en el sector habitacional. Como resultado, en los últimos años se ha incorporado la evaluación energética mediante el uso de herramientas BIM como parte de los procesos de certificación ante estándares internacionales pero también para reducir los costos de mantenimiento y operación de los sistemas HVAC, prestando menor importancia a la temperatura generada en el interior como consecuencia de la interacción de los efectos térmicos ambientales con las cargas internas para la evaluación de confort. Debido a lo anterior, éste estudio utilizó un enfoque de simulación validada en edificios para evaluar el desempeño térmico a nivel multi-zona de 2 viviendas aisladas de interés social bajo las condiciones del clima cálido sub-húmedo durante un periodo representativo del periodo más cálido. Los resultados arrojaron que las viviendas presentan una diferencia de la temperatura del aire de hasta 7°C, con relación a la zona urbana. Mientras que la validación de los modelos bajo los parámetros de temperatura y humedad relativa interior se ubicó dentro de los índices NMBE  $\leq 10\%$  y CV(RMSE)  $\leq 30\%$  en cada uno de los espacios. Por otra parte, mediante el factor de determinación arrojó que la correlación existente entre los datos simulados y los reales se clasifica con una dependencia media, mientras que los resultados de la evaluación energética arrojaron una diferencia de hasta 33% para el caso 1, y un sobre-cálculo representativo del 167% para la casa 2.

## Abstract

International policies promote the reduction of CO<sub>2</sub> emissions derived from the consumption of energy from fossil fuels, for which it is estimated that the housing sector is responsible in a 40% of the CO<sub>2</sub> emissions generated worldwide, produced during the operational stage within its life cycle. On the other hand, it has been identified that environmental conditions are a key factor for the use of both heating and air conditioning (HVAC) systems, which represent more than 60% of the total energy consumed. These factors have promoted the use of building performance models to mainly evaluate energy consumption, without taking into account the indoor temperature, which has the greatest influence on the comfort assessment. Therefore, this study conducted a building validated simulation approach to evaluate the multi-zone thermal performance of 2 isolated type houses of social interest under the conditions of the sub-humid warm climate. The results showed that the houses have a difference in air temperature of up to 7 ° C, in relation to the urban area. While the validation of the models under the parameters of indoor temperature and relative humidity was within the NMBE  $\leq 10\%$  and CV (RMSE)  $\leq 30\%$  indices in each of the spaces. Furthermore, the determination coefficient showed that the correlation between the simulated and actual data is classified in a medium dependence, while the results of the energy evaluation showed a difference of up to 33% for case 1, and an over-simulation of 167% for house 2.

## Introducción

Desde el embargo de petróleo a principios de los 70's, comenzaron a plantearse alternativas que permitan lograr la cobertura total de energía frente a un futuro con reservas de combustibles fósiles cada vez más escasas. Posteriormente, con los efectos del cambio climático fueron creados protocolos internacionales para la reducción de gases efecto invernadero, donde la eficiencia energética destaca como una de las alternativas de ahorro hacia una completa decarbonización mediante el uso de energías renovables.

Por su parte, el sector habitacional representa el 40% a nivel global de emisiones de CO<sub>2</sub>, por lo que protocolos y estudios se han encargado de proponer alternativas para mitigar el impacto generado durante la etapa de construcción. Sin embargo, se estima que la operación representa la etapa dentro del ciclo de vida de las edificaciones en la de mayor emisiones de gases efecto invernadero (GEI).

Con la evolución y los requerimientos de certificación para edificios verdes, las tecnologías BIM (*building information model*) están más presentes gracias a la automatización de la construcción y permiten otorgar un panorama de consumo energético y térmico en el interior de las viviendas. Sin embargo, muchos casos han demostrado que las predicciones asociadas con la modelación guardan una brecha significativa una vez que edificios con certificación sostenible superan consumos energéticos no valorados en los modelos deterministas. Es entonces que se recurre a la validación o calibración de modelos al proceso de registrar datos reales del edificio de estudio con la finalidad de contrastar aquellos simulados después de un proceso de selección estadístico. El resultado final es disminuir la diferencia de los valores reales con los obtenidos en la predicción para asumir escenarios de comportamiento futuro bajo condiciones ambientales adversas o evaluar el efecto que tendrán las intervenciones de mejora en el edificio real.

Esta investigación desarrolló un proceso de calibración térmica a tres casos de vivienda social con la tipología más popular en la República, la vivienda aislada, siguiendo una metodología de estudio integral. El proyecto está integrado por 5 capítulos: en el Capítulo 1 se describe los antecedentes y se establece el planteamiento de la investigación; en el Capítulo 2 se presentan los conceptos utilizados durante toda la investigación, se expone el funcionamiento del programa de cálculo así como un análisis de estudios previos desarrollados bajo la misma línea de investigación; en el Capítulo 3 se describe la metodología ejecutada así como la descripción del sitio estudiado; mientras que el Capítulo 4 presenta los resultados obtenidos en los periodos de evaluación así como una discusión de los datos; mientras el Capítulo 5 concluye con recomendaciones para trabajos posteriores, la bibliografía consultada, así como anexos complementarios a esta investigación.

# **CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN**



## 1.1 Antecedentes

### 1.1.1 Sustentabilidad y eficiencia energética internacional

Desde la unificación del concepto de sustentabilidad en el informe Brundland acuñado en 1987 (Materials and environment, 2013), ya existía un interés ante la protección de los recursos económicos, sociales y ambientales. Especialmente a partir de crisis de los combustibles fósiles que generó el embargo en 1973, se tomaron acciones en eficiencia energética para aumentar la seguridad de reservas de recursos no renovables y disminuir el cambio climático (Martínez-Montejo, 2016). Así, las políticas internacionales a principios de los 90's se encargaron de promover estas actividades a todas las áreas de producción siendo el Protocolo de Kioto (1997) se presentan alternativas que promueven la eficiencia energética en el proceso de la búsqueda hacia la independencia de recursos fósiles. Su ratificación (2005) y vigencia (contemplada para el año 2020) se encuentra integrada por diferentes países agrupados como: Anexo 1, al cual pertenecen varios países de la unión Europea; y el Anexo 2, compuesto en su mayoría por países en vías de desarrollo dentro de los que se encuentra México.

Así, la sustentabilidad es una filosofía que ha permeado en todos los sectores de producción que cuentan con estándares para garantizar tanto la calidad del producto o servicio. En la construcción, por su parte, esta tendencia además se encuentra materializada a través de diferentes estándares de edificios verdes: LEED en Estados Unidos de América, BREEAM, en el Reino Unido; Green Building Labelen China, CASBEE en Japón, LIDER-CALENER en España (Shi, Si, Zhao, Tian, & Jin, 2018), entre los más relevantes.

La eficiencia energética se define como la producción de menor energía para el desarrollo de las mismas actividades sin comprometer su desarrollo. En un sentido estricto no existe una medida cuantitativa para definir la efectividad energética, por el contrario, sirve como estrategia comparativa para valorar los resultados de diferentes indicadores a los que Patterson agrupa como: termodinámicos, económicos y la combinación de ambos (G. Patterson, 1996). La eficiencia energética es uno de varios aspectos de desempeño de los edificios, sin embargo en la modelación las brechas de error simuladas de los reales se producen tanto en la energía, como en las temperatura en interior, el confort térmico, acústico, niveles de soleamiento, entre otros (Wilde, 2014).

Se ha documentado que la vivienda representa entre el 15% y 50% del consumo eléctrico en diferentes países, estimándose un promedio de 30% de la energía total que se consume en el planeta (Rosas-Flores, Rosas-Flores, & Morillón Gálvez, 2011). Esto adquiere mayor importancia conociendo que dentro del ciclo de vida de las edificaciones más del 80% de los impactos ambientales se generan durante la etapa de operación (Sharma, Saxena, Shree, & Varun, 2011). Además del hecho de que las ciudades se encuentran en una expansión constante que aumenta la intensidad del consumo eléctrico, este crecimiento en la trama urbano también conlleva a la deficiencia en los servicios de infraestructura (Guillermo Aguilar, 2011), dificulta la movilidad y promueve la variación de condiciones climáticas ambientales entre las zonas urbanas, periurbanas y rurales: fenómeno denominado islas urbanas de calor (IUC) (Taha, Akbari, Rosenfeld, & Huang, 1988).

Esto ha obligado a que los países adopten políticas que fijen rangos de consumo e intensidad energética con base en el género del edificio, mientras otros promueven la certificación mediante sustentabilidad, valiéndose de diferentes herramientas con la finalidad de representar modelos de desempeño en edificios (MDE) para valorar el efecto de diferentes materiales y equipos, principalmente en los consumos energéticos durante su tiempo de vida así como

valorando los costos en su construcción. Estos modelos funcionan a través de cargarlos con la mayor cantidad de información a la que se puede obtener acceso (o también llamada datos de entrada) para correr cálculos termodinámicos predefinidos por los softwares en periodos de interés en niveles horarios, diarios y anuales; cuyos resultados se identifican como datos de salida. Entre los principales parámetros de salida utilizados en la evaluación de edificios verdes se encuentra el consumo energético, cuantificación de CO<sub>2</sub> y la temperatura operativa para el confort higrotérmico.

### 1.1.2 Situación energética en México

De acuerdo con el balance nacional de energía de producción primaria de la SENER durante el 2017, en México se generaron un total de 7,027.22 petajoules, de los cuales; el 84.5% deriva de los hidrocarburos (petróleo crudo, gas natural, condensados), un 4.4% proviene del carbón, el 1.6% de la núcleo-energía; mientras que el 9.4% se genera mediante energías renovables, siendo la hidroenergía y geoenergía las que destacan, entre otras, con valores representativos globales de 1.6% y 1.8%, respectivamente (SENER, 2017).

En cuanto a la energía final consumida, de acuerdo con datos oficiales, esta fue de 5,498.88 petajoules, distribuida en diferentes sectores que se pueden ver representados en la Figura 1, donde el sector de vivienda representa el 14% del consumo total. Por su parte, el sector industrial se encuentra compuesto, entre otros, por los consumos de la industria cementera, de vidrio y de la construcción representando el 3.19%, 0.93% y 0.24%, respectivamente.

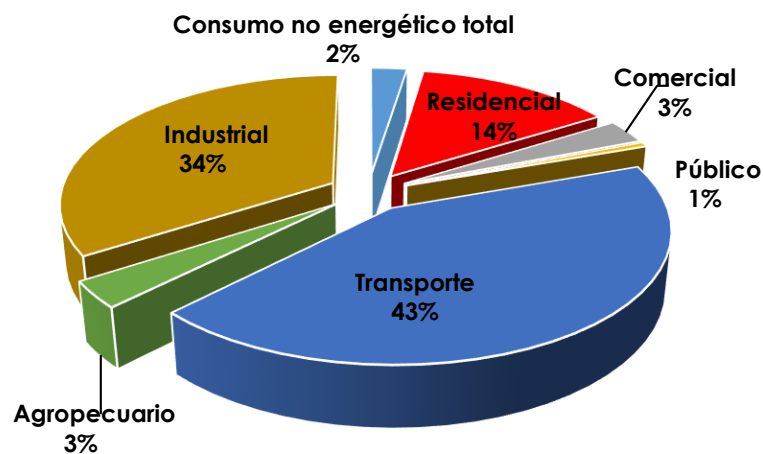


Figura 1. División porcentual del consumo energético por sector en el 2017, realizado a partir de datos de la SENER.

Para conocer el uso final de la energía en los hogares, es conveniente analizar cuáles son los sistemas que la integran. Para tal caso, hay que comenzar mencionando que la información disponible sobre el consumo de energía en los hogares posibilitan las estimaciones de primer nivel, según la Agencia Internacional de Energía, que son: el porcentaje de cobertura energética, tipo de combustible para cocinar y equipamiento de vivienda. Sin embargo, no existe aún un diagnóstico detallado en que se indiquen las características de la vivienda con el consumo de energía final. Las herramientas de información más cercanas corresponden a la información estadística generada por el INEGI a través de la Encuesta Intercensal, Encuesta Nacional de

Hogares y recientemente La Encuesta Nacional sobre Consumo Energético en la Vivienda (ENCEVI) 2018. Por su parte, esta última cuenta con una clasificación de datos a partir de 3 regiones climáticas de la república (ver Figura 2): la región cálida extrema, ubicada en el norte; la templada, en el centro de la república, y la región tropical, en el sureste, que incluye a los estados de la Península de Yucatán, Tabasco, Chiapas, Veracruz, Guerrero y Oaxaca. Dentro de esta clasificación por regiones es posible identificar 3 grupos de sistemas en los que deriva el consumo final de energía: la iluminación, los misceláneos y los equipos de ventilación y/o calefacción.

En el sistema de la iluminación se estima que el 72% de las luminarias usadas en las viviendas son de tipo ahorradoras fluorescentes, frente a un 16% de tipo incandescentes, mientras que la tecnología LED representa el 12% de iluminación a nivel nacional. Entre los aparatos de mayor consumo que componen el grupo de los misceláneos se encuentran los televisores, lavadoras, planchas y refrigeradores. De acuerdo con datos del ENCEVI, los televisores son los equipos de mayor uso en las viviendas con una representación del 91.5% similar a los 43.5 millones de unidades. La mayoría de estos cuenta con no más de 5 años de antigüedad (72.6%) y un mayor porcentaje de utilización de entre 2 y 5 horas de uso (45.9%). Además, el 71% de las viviendas cuentan con lavadora propia; siendo un 49% de ellas que cuentan con una antigüedad menor a los 5 años. Como se puede ver representado en la figura 3, en las tres regiones más del 70% de las viviendas lavan durante el horario matutino que comprende de 6:00am a 12:00pm (INEGI, 2018).



Figura 2. Mapa con la división regional según las características climáticas de México.

En el caso de las planchas, se estima que 20.2 millones de viviendas utilizan estos equipos (representando un 62%), con una mayor distribución hacia las planchas con vapor, con un 65.4%. El caso de los refrigeradores es interesante ya que representa uno de los aparatos que genera mayor demanda energética y se estima que se cuenta con un total de 28.9 millones de unidades, representado un porcentaje de 87.9% dentro de los hogares.

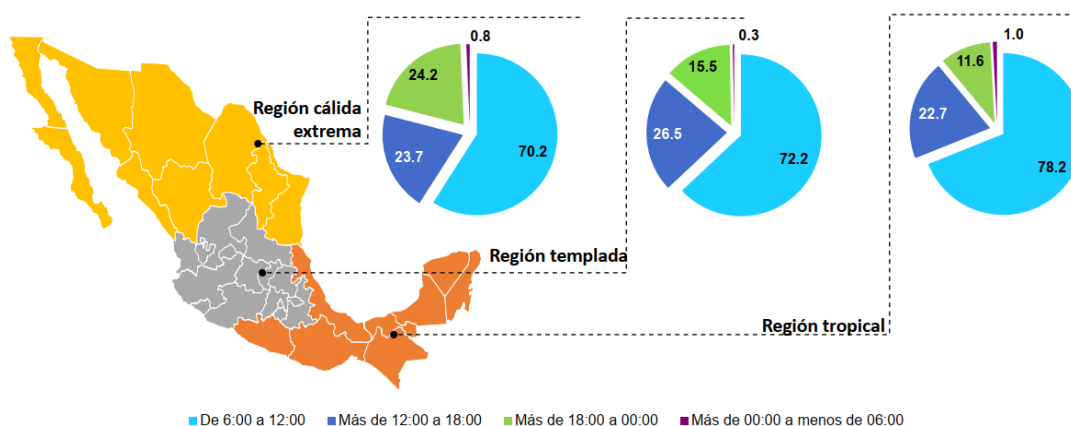


Figura 3. Periodos horarios de mayor uso de lavadora según ENCEVI 2018

Como parte del sistema de climatización, la ENCEVI 2018 apunta a que el mecanismo más popular son los ventiladores, que se estima su uso en el 45% de las viviendas: con una demanda que supera las 5 horas de uso diario (61.6% para los ventiladores de piso y el 52.2% de ventiladores de techo). En la misma categoría, se estima que un total de 7 millones de viviendas cuentan con equipos de aire acondicionado, en donde la región cálida extrema y la tropical son las que cuentan con la mayor cantidad de unidades con una distribución porcentual de 80% y 15.7%, respectivamente (INEGI, 2018). El uso de este sistema representa el 3% de la demanda energética nacional total (Oropeza-Pérez, 2016), pese a que en algunos su incorporación se considera sinónimo de estatus social, lo cierto es que en las regiones más cálidas son una solución instantánea para combatir las altas temperaturas, frente a la falta de incorporación de estrategias de ventilación pasiva.

Sin embargo, hay que tener presente que como cualquier aparato posee un periodo de vida útil o de eficiencia en el desempeño, ya que son propensos a la degradación por su uso a través de los años como consecuencia del envejecimiento natural de los materiales, mala operación y ausencia de mantenimiento preventivo. Este efecto se traduce principalmente en una caída de tanto del coeficiente de desempeño (*coefficient of performance, CoP*) en el caso de equipos de calefacción y en el porcentaje de eficiencia energética (*energy efficiency ratio, EER*) para el caso de los dispositivos de refrigeración (Eleftheriadis, 2018).

### 1.1.2 Situación de la vivienda social

El aumento de la vivienda tiene una fuerte dependencia con el crecimiento poblacional: en 1980 la población total era de 66.8 millones de habitantes (Cerón-Palma, Sanyé Mengual, Oliver Solá, Montero, & Ponce Caballero, 2013), y en 2015, el total de población supera los 119 millones de habitantes (Instituto nacional de geografía y estadística, 2019). Por su parte, Cerón et al. (2013) mencionan que la dinámica de México ha promovido la adquisición de casa propia, mientras que en otros países se ha promovido un mercado de renta de vivienda. El resultado es que se estime un total de 31 millones de vivienda (Instituto nacional de geografía y estadística, 2019), con un posible crecimiento hasta los 36.7 millones hacia el año 2025 (Partida Bush, 2008).

Con el crecimiento de los desarrollos habitacionales, así como las consecuencias derivadas por el aumento en la demanda energética y con ello aumento en las emisiones de CO<sub>2</sub>, promovieron que instituciones crearan programas con la intención de disminuir los impactos ambientales, como el "Proyecto de Vivienda Cero Energía", coordinado por la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) y organismos internacionales. A partir de entonces, se han elaborado programas piloto como el de "Aislamiento Térmico", el "Proyecto de Vivienda Baja en Carbono", "Ecocasa" y, desde

2012 comenzó a diseñarse el piloto para el "Programa Mexicano-Alemán ProNAMA", que abarca tanto proyectos de viviendas nuevas como incorporación del programa a viviendas existentes y busca, una vez concluido el piloto, contar con una vasta cobertura para las viviendas del país (Secretaría de Gobernación, 2014). Por su parte el Instituto de Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT) que se encarga de gestionar y otorgar crédito para la vivienda, y que a su vez cuenta con un programa denominado "Hipoteca Verde" para promover la adquisición de casas de interés social implementando eco tecnologías que aseguran un ahorro energético de hasta 40%.

Pese a esto, uno de los principales problemas radica en la repetición de patrones de diseños de vivienda que no se adaptan a la región climática de construcción y a los procesos ejecutados por los desarrolladores habitacionales para agilizar procesos constructivos y disminuir precios de inversión, ya que el aislamiento térmico es usado en un porcentaje muy pequeño de las viviendas, focalizándose, en especial, en las regiones templadas y cálido extremo (INEGI, 2018).

Al igual que sucede con el análisis de consumos energéticos, no existe una clasificación detallada sobre las características de vivienda más allá de las provistas por el INEGI a través de sus diferentes encuestas. Sin embargo, la OCDE estima que en México el 84% de las viviendas se pueden identificar como de tipo aislado (OECD, 2015); es decir, que no comparten ni muros ni techos con otras edificaciones colindantes (GIZ/INFONAVIT, 2011).

Como complemento, si bien más del 80% de las viviendas de toda la República se encuentran construidas tanto en muros y losa con materiales como block o concreto, la ENCEVI identifica que la incorporación de aislantes térmicos no es una práctica en la construcción de la vivienda, pues únicamente el 14.9% de la zona árida cuenta con algún tipo de aislamiento en la envolvente, mientras que tanto en la zona templada como en la zona húmeda se registra un porcentaje máximo de viviendas con aislantes representativo del 1.5% (INEGI, 2018).

Por su parte, la degradación también afecta a los materiales de la envolvente, sobre todo aquellos que se encuentran sometidos a agentes agresivos y cambios de temperatura, humedad y contaminación. El envejecimiento de los componentes de los edificios es resultado de las condiciones climáticas tanto internas como externas, que modifican sus propiedades de transferencia de calor, y la cuantificación de estos daños se conduce a través de pruebas de laboratorio mediante la aceleración de los procesos climáticos de envejecimiento. El caso algunos materiales aislantes evaluados, tales como el poliestireno extruido (XPS) el mayor porcentaje de degradación se presenta durante los primeros dos años posteriores a su instalación, mientras que en el paneles de aislamiento al vacío tienen una degradación del 10% luego de 5 años, principalmente por producto de altas temperaturas y niveles de alcalinidad elevados; y por otra parte la lana de fibra de vidrio presenta una elevación en su conductividad térmica de hasta 12% en edificios estudiados intervenidos en la década de los 80's (Eleftheriadis, 2018).

## **1.2 Planteamiento del problema**

De acuerdo con datos estadísticos de INEGI, el número de viviendas particulares en el estado de Quintana Roo es de 441,200, donde la vivienda particular representa el 83.48%, con una media de ocupantes de 3.4 habitantes por vivienda. Sin embargo, Quintana Roo también destaca por un 18.4% de viviendas unipersonales (INEGI, 2015). En términos generales, Othón P. Blanco es la tercera ciudad más importante del estado aun siendo capital, sin embargo el número de viviendas particulares se estima aproximadamente en 64,977 unidades, de las cuales el 95.18% incluyen aquellas de tipo dúplex, triplex y cuádruplex.

No obstante, Quintana Roo se encuentra en el lugar 17 en el ordenamiento de consumo eléctrico de (SENER, 2017) y destaca por tener un crecimiento de la demanda energética más significativo de la República con un valor porcentual de un 19.43% del año 2010 al 2017. Este incremento se debe a dos factores determinantes, el constante crecimiento turístico y la migración por trabajo. Mientras que el primero se materializa en hoteles, el segundo se refleja en el número de viviendas habitadas.

Las características ambientales de esta zona cálida sub-húmeda provocan altas temperaturas durante todo el año, que se mantienen constantes durante el transcurso del día, y aumentan la sensación térmica debido a las altas concentraciones de humedad en el ambiente cuyos porcentajes promedios anuales oscilan entre el 65% y 80%. A este factor habría que sumar el hecho de que las viviendas no promueven la ventilación pasiva o se encuentran ubicadas en orientaciones con radiación solar directa, derivando en altas temperaturas al interior de las casas, y con ello acondicionar los espacios con equipos de aire acondicionado que llevan al aumento en la intensidad energética.

Estudios previos han comparado el comportamiento energético de la vivienda de acuerdo a su tipología mediante el uso de entrevistas y el seguimiento de consumo energético mediante las facturas eléctricas (Sanchez Zapata, Vega Azamar, Cruz Argüello, Ávila López, & Chan Juárez, 2018) señalando a las viviendas aisladas como las de menor consumo frente a las adosadas, y multifamiliares. En cuanto a la evaluación de la efectividad de programas de mejora de eficiencia energética, tales como "Hipoteca Verde", su aplicación cumple con un porcentaje inferior al que asegura generar el programa, y en el caso de los mejoras producidas por el uso de aislamiento en muro y plafón han demostrado tener un mínimo impacto en la temperatura interior, e incluso ser contraproducentes debido a su incorrecta instalación que provoca condensaciones entre el elemento aislante y el elemento estructural al que se encuentra sujeto (Gallegos Perez, 2016). Sin embargo, estas investigaciones tienen en su conjunto la característica de desarrollar una investigación detallada a una sola variable, que por lo regular no contempla la variable de operación real de la vivienda.

Es a partir del desarrollo e incorporación de los modelos de información de edificios (por sus siglas en inglés, BIM) en los procesos de toma de decisiones durante la etapa de diseño, que su evolución se ve sistematizada a partir de los *building energy models* (BEM) o *building energy performance model* (BEPM), probando que son una herramienta que permite predecir el comportamiento del edificio mediante la suposición de variables en parámetros térmicos y de operación, con lo que se reducen los costos de producción y prueba de modelos a escala real, permitiendo la optimización de recursos y tiempo invertido.

Por otro lado, estos modelos también han probado que pueden existir brechas entre los valores proyectados y los generados durante la etapa de post-ocupación, resultando en diferencias de las variables de salida que pueden llegar exceder las predicciones establecidas y con ello no cumplirse los ahorros estimados (Alborz, 2015). Para tales efectos, la modelación se vale de enfoques encargados en acortar el error generado entre las simulaciones y los datos reales generados en el sitio, mediante procesos de auditados de casos de sitio, y en cuyo caso el resultado son modelos validados. Para los casos en los que no se requirieron estos modelos para la concepción del edificio y se prevé su optimización bajo algún parámetro de sustentabilidad, este tipo de modelos también son aplicables.

Por lo anterior, hacia la búsqueda de alternativas que promuevan el confort higrotérmico, y la eficiencia energética de la vivienda social, se plantea la necesidad de desarrollar una caracterización a través de la validación de modelos de simulación de edificios en la que se evalúe la influencia de parámetros de operatividad, cargas internas, masa térmica y la acción

del microclima, en el desempeño térmico y energético la tipología de vivienda más popular en México.

### 1.3 Justificación

De acuerdo con el sistema de información e indicadores de vivienda se tiene una proyección de vivienda de 618,661 unidades en toda la República Mexicana para el año 2025 (Sistema nacional de información e indicadores de vivienda, 2019) frente a los 517,924 hogares totales hasta el 2017 (Instituto nacional de geografía y estadística, 2019), lo cual representa un aumento del 16.28 %. Además, se informa que México cuenta con el quinto puesto a nivel mundial de desarrollo de proyectos de Mecanismo para Desarrollo Limpio, en particular eficiencia energética (Gobierno de México, 2016). Entre las políticas de acción para el mejoramiento de la vivienda bajo una visión sustentable definidos por el Programa Nacional de Vivienda (Secretaría de Gobernación, 2014) se enlistan:

- Producción de conjuntos habitacionales con eficientes servicios urbanos
- Utilización de tecnologías para uso eficiente del agua
- Fomentar acciones con envolvente verde para disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>
- Incentivar el manejo eficiente de energías
- Establecer lineamientos para desarrolladores para que la vivienda nueva cumpla con las normas de ubicación, conectividad y sustentabilidad.

En éste sentido, pese a no existir parámetros de acción que especifique la eficiencia energética, el método empleado para asumir la disminución de impactos es la evaluación de diferentes escenarios. Y en este contexto de automatización de todos los sectores de producción, los modelos de simulación son una herramienta que permite conocer el desempeño de los edificios mediante la incorporación de datos de entrada confiables para reducir las incertidumbres en los resultados o datos de salida, reduciendo que implica reducción de costos para realizar pruebas experimentales a mayor escala y acortar los periodos de registro de datos, centrándose particularmente en los meses donde se registren las temperaturas más altas o bajas en el año.

Además, reducir el margen de error entre los modelos simulados y los edificios en un periodo posterior a su ocupación, como menciona Wilde (2014), no solo es de interés para el sector de la industria de la construcción y la ingeniería que en los últimos años se ha dedicado a centrar esfuerzos en edificios eficientes, de cero emisiones de carbón y Net zero energy, sino también para conservar edificios con buen desempeño energético a través de su tiempo de vida y afrontar los efectos climáticos.

### 1.4 Hipótesis

Estudios previos han ejecutado un enfoque integral de calibración de edificios auditando la operación de cada uno de los sistemas eléctricos con la intención de recabar la mayor información del sitio: desde el registro del consumo horario reportado por los aparatos, los sistemas de calefacción y aire acondicionado, apoyándose de parámetros como las temperaturas que presentan las superficies en el interior de los edificios con la finalidad de evaluar únicamente el desempeño energético ya que consideran los parámetros ambientales como un dato de a fine en la modelación.

Por lo tanto, la simplificación para obtener parámetros de entrada, en especial aquellos que generan mayor incertidumbre en la modelación, como lo son la operación y las condiciones

ambientales reales del sitio, permitirá que las simulaciones multi-zona arrojen resultados térmicos y energéticos cercanos a los de las viviendas reales.

## **1.5 Objetivo general**

Validar modelos de simulación térmica bajo un enfoque de simulación integral de tres casos de estudio de vivienda de interés social en operación durante un periodo crítico representativo durante el año de estudio.

### *1.5.1 Objetivos particulares*

1. Construir los modelos teóricos de predicción a partir de una descripción auditada de las viviendas seleccionadas.
2. Registrar parámetros térmicos en interior y exterior, así como el consumo energético global de cada uno de los casos seleccionados.
3. Determinar el error porcentual en los datos de salida de los modelos teóricos, mediante análisis de incertidumbre y sensibilidad, que se ajusten dentro del rango establecido en los lineamientos de la ASHRAE.

## **1.6 Delimitación del tema**

Para el desarrollo de esta investigación se excluyeron los parámetros relativos al consumo de agua y combustible gas L.P. o carbón, tanto para el caso del uso en estufa como para calentar el agua de diferentes muebles sanitarios. Esto responde a la reducción de variables en la experimentación de este proceso, además que en el caso del agua potable su cuantificación es difícil cuando las tarifas de cobro se encuentran unificadas a nivel de fraccionamiento. Mientras que la cuantificación del consumo de gas L.P. es difícil de medir cuando se utiliza el sistema de almacenamiento por cilindros.

Para el caso de los calentadores de agua, estos se excluyeron debido a su poco uso en la región climática, además que, de acuerdo con datos del INEGI, estas en su mayoría funcionan mediante el suministro de gas L.P.



## **CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO**

## 2.1 Marco conceptual

### 2.1.1 Ganancias de calor en los edificios

Se denomina envolvente del edificio a la capa de poco espesor que separa el mundo interior del mundo exterior, que comprende las paredes exteriores, los cristales y las cubiertas. Es al mismo tiempo perteneciente al edificio y al espacio urbano (Gregorio Atem, 2012); tiene la función de protección; regula el balance de humedad, temperatura y aire, estando en constante cambio energético con el ambiente exterior; aporta seguridad, resistencia y rigidez al edificio; sus características estéticas son muy importantes para arquitectos, usuarios y ciudad.

La principal función de los muros exteriores junto a las cubiertas y acristalamientos es establecer una barrera entre los ambientes exterior e interior, de modo que el interior pueda ser ajustado y esté en determinadas condiciones térmicas, lumínicas y acústicas.

El clima local tienen una gran influencia sobre el ambiente interior de los edificios, siendo sus características gran influencia jugando un rol crítico en las condiciones de ganancia de calor (A. Raja, J. Fergus, J. McCartney, & A. Humphreys, 2001). El control de impacto térmico se agrupa en tres diferentes formas:

- Transmisión de calor a través de la envolvente (transferencia por conducción), la envolvente del edificio modifica la transmisión de acuerdo a su masa térmica y aislamiento.
- Transmisión de energía solar directamente a través de aberturas (transferencia por radiación), estos pueden ser controlados mediante cortinas, elementos de sombra o acristalamiento.
- Infiltración de aire exterior a través de puertas, ventanas grietas y huecos (transferencia por convección), donde el movimiento del aire se puede controlar mediante ventanas y el aislamiento a través de vacíos de aire ayuda a reducir la infiltración.

Sin embargo, Fergus et al. (2001) señala que los efectos del clima pueden ser modificados mediante el uso de varios controles sobre los cuales los usuarios tienen influencia en su uso: para el control de la ventilación se encuentra la abertura de ventanas. Sin embargo el control de luminaria y ganancias solares dependen más del control individual.

Los métodos de ingeniería utilizan principios de la física para calcular la dinámica térmica y comportamiento energético de todo el edificio o sus sub-componentes. Estos métodos se pueden clasificarse difícilmente en dos categorías, el método compresivo y el método simplificado. El método compresivo utiliza elaboradas funciones físicas o dinámica de fluidos (térmica) para calcular precisamente paso a paso el consumo energético mediante todos sus componentes, información ambiental construcción, operación, esquema de usos de equipos HVAC (por sus siglas en inglés, *Heating and Ventilation Air-Conditioning*), como datos de entrada (Zhao & Magoules, 2012).

### 2.1.2 Modelos de simulación y enfoques de evaluación

Los modelos son representaciones o cálculos matemáticas empleados para reproducir el comportamiento de un fenómeno (ASHRAE Inc., 2002), visualizar el elemento, sistema o procurar entender o describir una idea compleja. Por su parte Jakeman et al. (2006) señalan que el proceso de modelación se trata de construir o descubrir un propósito mediante información y conocimientos previos, haciendo hincapié en que cada etapa del mismo debe estar sujeto a

una revisión crítica. Debido a su naturaleza de anticipar efectos en lapsos determinados, actualmente se han convertido en una práctica necesaria dentro del campo de la ciencia y las áreas de toma de decisiones. No obstante durante su representación es inevitable contar con incertidumbres dadas por la falta de conocimiento del fenómeno a modelar, por mediciones o valores de base imprecisos, ante lo cual conducir la creación de cualquier tipo de modelo requiere partir definiendo el propósito del estudio especificando el contexto del modelo y con ello determinar la información deben ser encontrados para procesarlos mediante un algoritmo de estimación o desempeño que ayude a identificar la estructura de los valores de parámetros y, finalmente, cuantificar la incertidumbre incidente como evaluación del modelo final (Jakeman & Letcher, 2006).

Los modelos de energía en edificios tienen su precedente en la década de los 20's con el desarrollo de los cálculos de flujo de calor, para evolucionar en los 80's donde las compañías de HVAC desarrollaron modelos a principio de los 80's (Royapoor & Roskilly, 2015).

En la construcción, el desarrollo tecnológico ha permitido la introducción de los modelos BIM (building information models) en la fase de diseño y con ello se ha expandido el área de estudio más allá de la estimación del comportamiento estructural y los costes que implica, sino que abarca hasta la estimación de carbón incorporado en los materiales (Canadian wood council, 2004), tiempo de vida y remplazo de los mismos, el desempeño energético operacional y con proyecciones durante su tiempo de vida, así como el grado de cumplimiento del confort interior. Por lo tanto, según sea el propósito de la modelación, existen lineamientos oficiales o recomendaciones que describen el proceso para conducirlos, sin olvidar establecer los índices bajo los cuales se avalúan los resultados de los modelos.

Mientras algunos señalan que existen ocho familias de modelos (Jakeman & Letcher, 2006), Coackley & Keane (2014) los agrupan de forma más sencilla en dos categorías; aquellos que son de tipo diagnóstico o pronóstico y de tipo law-driven o data-driven. En los modelos de simulación de edificios MSE, el tipo law-driven es usado para predecir el comportamiento de los sistemas mediante leyes bien definidas; mientras que el tipo data-driven se refiere al uso de información monitoreada para producir modelos capaces de predecir el desempeño de los edificios (Coakley, Raftery, & Keane, 2014). La ejecución de este último tipo de modelos es delimitada según las características como:

- Caja negra: Uso de modelos matemáticos o estadísticos sencillos que relaciona la influencia de parámetros de entrada con parámetros de salida,
- Caja gris: Los cuales difieren de la caja negra en el sentido de usar parámetros clave identificados en un modelo físico
- Calibración detallada de modelo: el cual utiliza el proceso descriptivo law-driven de los sistemas de edificio afinando los valores de entrada para coincidir con los datos medidos.

Por su parte la calibración se entiende como el proceso de comparar resultados de mediciones o modelos con estándares, con el propósito de determinar la desviación e incertidumbre relevante para el ajuste del objeto de medición o modelo (ASHRAE Inc., 2002). En las recomendaciones de la ASHRAE 14-2002 *Measurement of energy and demand savings* se proponen enfoques orientados hacia la evaluación del ahorro de energía en los edificios en periodos posteriores a las mejoras realizadas mediante mecanismos de conservación de energía (EMC), mediante tres tipos de enfoques de estudio que difieren en la forma de medir la energía real y las cantidades de demanda necesarias para determinar los ahorros: el enfoque integral de desempeño de edificio, que mide el flujo de energía final (eléctrica, gas, agua) usada completamente por el edificio; el enfoque de desempeño de intervención aislada,

particularmente estudia los efectos de las ECM en el uso y demanda de los subsistemas (iluminación, calentador de agua, refrigeración) mediante mediciones periódicas antes y después de su implementación; y el enfoque integral de simulación calibrada, el cual involucra la utilización de un programa de simulación comercial para crear un modelo de demanda de energía. Se suele realizar en condiciones previas a la intervención y se comprueba mediante datos reales, para después usarlo en la predicción de ahorros mediante condiciones posteriores a su intervención.

Para el proceso de calibración de modelos, el análisis de estudios de Coakley et al. (2014) señala que los dos tipos de ejecución del proceso de validación se da a través de un proceso manual automático. En el caso del primero, el modelador interviene de manera pragmática mediante iteraciones. Mientras que las automáticas se efectúan mediante técnicas matemáticas o estadísticas (Coakley, Raftery, & Keane, 2014).

Como este proceso requiere de recopilación de información, existen todavía cuestiones sobre el tiempo necesario para asumir como real los resultados. En este sentido la ASHRAE es estricta cuando menciona que para una validación es necesario contar con información registrada de por lo menos 12 meses. Sin embargo, otros autores proponen reducir el tiempo de monitoreo con el fin de hacer más manejable definir la rutina de los sistemas (ocupación, iluminación, HVAC) mediante la recomendación de periodos cortos representativos en lugar de todo un año de registro de información por periodos que van desde las 2 semanas hasta los dos meses (Coakley, Raftery, & Keane, 2014).

En cuanto a la evaluación de los procesos de incertidumbre presentes en la calibración de los modelos, a diferencia de años anteriores donde una sencilla diferencia porcentual bastaba para su valoración, actualmente se adoptaron índices estandarizados que permiten compensar la cancelación de datos por residuos negativos y medir la variabilidad de los datos: entre estos destacan el medida del sesgo (NMBE) y el coeficiente de variación CV(RMSE) (Coakley, Raftery, & Keane, 2014).

### *2.1.3 Discrepancia en las predicciones*

La discrepancia se entiende como la brecha, diferencia o vacío que existe entre los datos de salida producidos durante la modelación y los datos generados en el sitio. La literatura, por su parte ha puesto un mayor énfasis en el consumo energético por sobre otros parámetros. Algunos trabajos previos que han realizado el consumo de energía con un gran número de muestras han presentado diferencias de entre 2.5 y 4 veces más de la energía global consumida (Shi, Si, Zhao, Tian, & Jin, 2018). Por lo tanto se recomienda reducir el número de muestras para poder obtener información más precisa, no obstante esto tampoco garantiza que se logre una calibración.

La ASHRAE indica que en la calibración de modelos no existirá una reproducción íntegramente similar al comportamiento de los edificios (ASHRAE Inc., 2002), y se entiende que aquellos edificios que no cumplan con los índices señalados anteriormente entran en esta categoría, sin embargo la diferencia puede ser realmente significativa.

La teoría consultada ha identificado tres criterios de suma influencia en los errores; el comportamiento del usuario, las condicionantes del microclima y las diferencias diseño-construcción. El primero de los factores radica en los usuarios y la imposibilidad de predecir el comportamiento y también a que son un complejo sistema que se ve afectado por las características del ambiente, razones psicológicas y fisiológicas de cada individuo mismos reflejados en los controles de iluminación, horarios de apertura de ventanas control de termostatos, movimiento entre espacios y equipo de refrigeración promueven la complejidad de

este parámetro., en especial este fenómeno se ve potencializado en el género de vivienda cuando no se disponen de factores restrictivos como los espacios públicos y/o comerciales.

Por su parte, el micro clima juega un rol importante en la brecha de datos de salida, donde el fenómeno de IUC tiene gran impacto además de las características del contexto construido: las densidades así como la forma de los edificios y su proximidad generarán una modificación en la radiación, la velocidad y orientación del aire. Y ya que los edificios están proyectados para desempeñarse durante varias décadas su evaluación de desempeño no debe ser considerada con base en información histórica, sino promover su estudio usando futuras proyecciones climáticas (Sleinman, Whaley, & Saman, 2018). Esto se debe principalmente a que se suelen correr las simulaciones con archivos climáticos históricos de 30 a 50 años, cuando en realidad los edificios estarán sujetos a condiciones propensas a variaciones

La tercera variable deriva del diseño-construcción, comúnmente se acepta que durante el proceso constructivo y de instalación de los materiales, existen situaciones que no se pueden controlar y que inciden directamente en las cualidades térmicas de los materiales así como sus niveles de hermeticidad. En el supuesto de que los edificios se construyan con un estricto control y veracidad de acuerdo a los datos modelados, Shi et al. (2019) afirman que los modelos nunca reflejaran el desempeño real de los edificios. Dentro de este grupo se distinguen áreas de estudio: las propiedades de construcción, las que resultan del mantenimiento y reparación del edificio y los valores de ocupación de diseño contra los del periodo de post-ocupación.

Como criterios básicos para reducir el margen de error en la simulación de modelos, varios autores recomiendan incorporar los datos ambientales reales a los que el sitio se ve expuesto obtenidos mediante la instalación de una estación meteorológica en el sitio estudiado con el objetivo de crear un archivo meteorológico de año real (AMY) o archivo meteorológico personalizado (Shi, Si, Zhao, Tian, & Jin, 2018). En casos en los que no sea posible este proceso, otros autores proponen partir de archivos históricos meteorológicos para predecir el aumento de la temperatura u obtener datos fiables mediante la interpolación de estaciones cercanas (Eguía Oller, Alonso Rodríguez, Saavedra González, Arce Fariña, & Granada Álvarez, 2018). Para el caso de viviendas, se ha documentado que validar modelos mediante datos ambientales generados en el sitio ha resultado en buenos resultados, sin limitar su aplicación a un solo tipo de clima.

Sin embargo, el parámetro de mayor peso en los resultados finales suele asignarse a los usuarios y los esquemas de operación no considerados durante la evaluación. En particular en los casos como las viviendas y edificios de uso particular, ya que no existe un rígido control en las actividades y las situaciones extraordinarias (periodos de ausencia, mayor presencia de gente, esquemas de operación de sistemas no previstos) son más presentes.

#### *2.1.4 Modelación y cálculo DesignBuilder + EnergyPlus*

##### *DESIGNBUILDER*

Mediante la interfaz gráfica de DesignBuilder permite crear modelos de edificios partiendo de la creación de bloques mediante formas básicas que se pueden ensamblar, mover y transformar fácilmente. Estos se generan dibujando perímetros en dos dimensiones sobre planos horizontales, verticales o inclinados que pueden ser extruidos para generar formas tridimensionales.

La creación se puede dar a partir de tres tipos diferentes de bloques: bloques de edificio, de componente y contorno. En los que es posible modelar aberturas de cualquier forma y tamaño en muros exteriores, particiones, entrepisos y cubiertas.

El modelo 3D como los datos asignados se organizan a partir de una secuencia de niveles, estructurados jerárquicamente, donde la información se hereda a los niveles inferiores, mediante esta función permite que los ajustes que se apliquen en el nivel edificio se aplicaran a todos los niveles. Sin embargo, también es posible cambiar la información heredada por componente (Ordoñez García, 2014). A su vez, los datos que definen las características ofrecen un sistema basado en componentes y plantillas. Los componentes son datos que describen los elementos específicos del edificio, tales como: cerramientos dispositivos, sombreado de vidrios, etc. Por su parte las plantillas son paquetes que por lo general describen una parte importante del edificio (actividad, cerramientos, iluminación, HVAC) permitiendo cargar información de forma masiva al modelo y facilitar el proceso de trabajo.

### *ENERGYPLUS*

EnergyPlus es un software desarrollado por el Departamento de Energía de Estados Unidos de América, destacando como principal programa de simulación de edificios (Royapoor & Roskilly, 2015) ya que mantiene una lista de todas la herramientas de simulaciones periódicamente actualizada (Zhao & Magoules, 2012). Este software funciona como motor de simulación que trabaja a partir de archivos de texto IDF (Intermediate data format) con posibilidad de ser editado además de permitir la exportación de resultados a archivos de Excel. No obstante, trabaja dependientemente a una interfaz que permita la reproducción gráfica de la geometría del edificio (Eisenhower, O'Neil, & Mezie, 2012) ya sea por medio de DesignBuilder u Openstudio. Para la configuración de sus datos, EnergyPlus permite la conversión de archivos estadísticos a través de un programa estadístico climatológico.

Para la realización de los cálculos el EnergyPlus utiliza el concepto de Zonas, que no corresponde necesariamente a un único ambiente, pero un conjunto de ambientes sometidos a una misma condición. Las zonas pueden interactuar unas con las otras a través de superficies adyacentes y mixturas de flujos de aire. Gregorio Atem (2012) simplifica las funciones del programa como:

- Soluciones simultáneas e integradas en que la respuesta del edificio y el sistema primario y secundario están acoplados.
- Intervalos de tiempo definidos por el usuario, con fracción de hora.
- Técnica de solución, basada en balance de energía para cargas térmicas prediales, que permite el cálculo simultaneo de los efectos radiantes y convectivos en la superficie interior y exterior durante cada intervalo de tiempo.
- Conducción de calor a través de elementos del edificio tales como paredes, techos y suelos, usando las funciones de transferencia por conducción.
- Modelo de transferencia de calor y masa que lleva en consideración absorción y eliminación de humedad.
- Modelo de confort térmico basado en la actividad, temperatura de bulbo seco interna, humedad, etc. (Fanger, Pierce y KSU)
- Cálculo de balance de la ventana que permite el control electrónico de persianas, balance térmico capa por capa, lo que permite el reconocimiento de la amplitud de onda de la energía absorbida por el cristal de la ventana.
- Sistemas de HVAC configurables que permiten a los usuarios modelar sistemas típicos comunes y sistemas poco modificados.

- Cálculo de la polución atmosférica CO<sub>2</sub>

## 2.2 Estado del arte

### 2.2.1 Validación de modelos

Descritas las características y procesos necesarios para realizar los MSE, a continuación se presentará un breve análisis sobre la ejecución y los resultados obtenidos por investigaciones previas. La mayoría de los estudios revisados corresponden a países de la Unión Europea, quienes poseen mayor experiencia y aplicación de modelos de desempeño energético en edificios habitacionales, sobre todo en países como Reino Unido o España, donde se cuenta con una fuerte legislación en materia de edificios verdes e incluso cuentan con herramientas unificadas (LIDER CALENDER, en el caso de España) que permiten hacer de la modelación un procedimiento necesario para la gestión de permisos, donde se destaca el análisis de la validación energética sobre la validación térmica o de confort.

Ejemplo de estos se puede iniciar son los trabajos de Mustafaraj et al. (2014) que consistió en un análisis energético y de confort en un edificio de investigación de dos niveles en Irlanda, compuesto por un sistema de calefacción geotérmica ubicado en el sótano y cinco unidades de climatización. Para ello recurrieron a dos niveles de validación; el primero mediante una completa descripción del edificio y sus componentes físicos y equipamiento, evaluado con un archivo meteorológico histórico. Mientras que la segunda etapa consistió en el registro horario de los consumos reales de los sistemas de calefacción, temperatura del agua caliente, entrevistas a los usuarios y registros de temperaturas interiores mediante adquisidores de datos; con la creación de un archivo climatológico anual personalizado. Los resultados de ambas calibraciones estaban enfocados en medir la descarga de calor generada por los sistemas HVAC, el consumo eléctrico de todo el edificio, el consumo de gas y las temperaturas generadas en el interior. Luego del monitoreo periódico durante un año, los resultados de la validación correspondientes al consumo energético del edificio arrojaron una disminución en el índice MBE mensual de -5.5% y 8.6% en el primer nivel, a un -3.80% y 6.10% en el segundo nivel de precisión de calibración. En el caso de la temperatura interior, la calibración horaria disminuyó la desviación con respecto a MBE y CV (RMSE) de -9.10% y 21.30% respectivamente en el primer nivel, a un -6.50% y 12.40% en la segunda etapa.

También en el Reino Unido, un proceso de evaluación similar lo efectuaron para calibrar un edificio de oficinas de 3 niveles con una fachada cortina de vidrio (Royapoor & Roskilly, 2015). Para lograr reducir los errores en la calibración mediante EnergyPlus, integraron un archivo meteorológico con datos obtenidos de una estación colocada en la azotea del edificio analizado. Como resultado, la segunda etapa de validación arrojó una desviación de 1.08% menos en el consumo eléctrico anual simulado del real (medido) y un 3.8 % más de consumo de gas para calefacción. Como complemento para el afine de la temperatura interior se obtuvo un resultados de variación  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  en un 93.2% de las oscilaciones horarias, señalando que el software tiene una notable tendencia la predicción de temperaturas menores en el interior. En cuanto al consumo energético global anual presentaron un límite aceptable RMSE de 9.90% y un 9.70%, en su evaluación horaria y mensual respectivamente.

Por su parte, España es un país con una legislación hacia la certificación de viviendas mediante métodos como LIDER-CALENER. Prueba de su experiencia en el desarrollo de modelos de desempeño en los edificios se encuentra una alternativa de calibración que consiste en la personalización de un archivo de datos climatológicos mediante la interpolación de 6 variables meteorológicas registros anuales de 70 estaciones meteorológicas circundantes al área de

estudio (Eguía Oller, Alonso Rodríguez, Saavedra González, Arce Fariña, & Granada Álvarez, 2018). Aplicaron este método en un edificio representativo de 8 niveles en Galicia, mientras que la interpolación se efectuó con el método al método Thin Plate Spin, para cargarlo al software de trabajo, que para este caso fue TRNSYS. La creación del archivo meteorológico para la simulación ambiental redujo el coeficiente CV(RMSE) de un de un 0.74 a un 0.26.

En el sentido estricto, Tisov et al. señalan que en general las evaluaciones de calidad de aire, dentro de las cuales se encuentra la temperatura y humedad relativa en interior, han sido poco estudiadas debido a que se requiere procesar de manera manual grandes registros de datos (Tisov, Siroky, & Kolarik, 2016). Lo cierto es que, si bien no existe un procedimiento creado exclusivamente para validar la temperatura del ambiente en el interior de los edificios, muchos casos de estudio se han basado en los criterios de evaluación de ahorro energético establecidas por la ASHRAE, y en edificios de vivienda han encontrado mayor repercusión.

Con un enfoque similar, en Dinamarca por Paliouras et al. (2015) se realizó la calibración de un modelo teórico de una vivienda bajo estándares de calefacción y ventilación pasiva en estado de ocupación, con las temperaturas registradas en un periodo de 30 días en cada zona (Paliouras, Matzaflaras, & Peuhkuri, 2015). El estudio multi-zona contó con el emplazamiento de once adquirentes de datos para el registro de la temperatura operativa, humedad relativa y concentraciones de CO<sub>2</sub>. Para la calibración fueron necesarias diez iteraciones realizadas de manera manual, mediante la modificación de parámetros de entrada obtenidos de entrevistas detalladas sobre la operación durante la campaña de monitoreo cuyo valor más cercano se obtuvo en la recámara con porcentajes CV(RMSE) iguales a 3% para la temperatura operativa, 11.3% de CO<sub>2</sub> y 5.2% para la humedad relativa.

Mientras tanto en Bolzano Italia, fue conducida la validación energética de una vivienda del siglo XIII, incorporando la introducción de datos de entrada obtenidos en el sitio, tales como la conductividad real de la envolvente, la permeabilidad del aire y del ambiente exterior. La evaluación estadística necesitó de un análisis de sensibilidad que derivó en una validación mediante RMSE de 0.62°K de diferencia para la temperatura interior, y de 0.48 °K u 0.80°K de diferencia en la temperatura interior de los muros norte y sur, respectivamente (Roberti, Filippi Oberegger, & Gasparella, 2015).

Mientras tanto, su aplicación en América -y en particular en países cercanos al Ecuador-, ha ganado más interés en los últimos 5 años por factores económicos y de políticas normativas que establecen la reducción de la huella de carbono, y la incorporación de normas en materia de eficiencia energética que han permeado poco a poco han permeado han llegado hasta el sector habitacional, sin olvidar también que es un área de investigación con gran auge en la última década. Otro hecho que se encuentra presente en la mayoría de los estudios de calibración es su mayor aplicación en edificios públicos, esto se debe, entre otras cosas, al estímulo para la certificación como edificios verdes y también a la posibilidad de controlar los parámetros de operación mediante rutinas definidas por el género del edificio, como uno de los parámetros más críticos.

En México, probablemente el trabajo más representativo en el área de la modelación de edificios corresponde al desarrollado por la Cooperación Alemana al Desarrollo (por sus siglas en alemán GIZ) para el INFONAVIT en el año 2011. El análisis realizado en dicho reporte corresponde al de optimización de edificios, ya que se evaluaron los ahorros energéticos y de emisión de CO<sub>2</sub> evaluando tres tipos de intervenciones de aislamiento para diferentes climas. Tomando en cuenta: seis ciudades representativas de diferentes regiones climáticas y cuatro tipologías de vivienda; los modelos fueron analizados bajo simulaciones térmicas dinámicas, con valores de entrada simplificados, utilizando el motor EnergyPlus. Para la región cálida húmeda, la vivienda



aislada fue evaluada tomando como referencia la ciudad de Cancún, el modelo base fue configurado con una envolvente opaca de block hueco de concreto y losa maciza de concreto, resultando en ganancias de calor superiores a los 39 kWh/m<sup>2</sup> para el mes de Julio, de las cuales, aproximadamente el 60% provienen de los muros. Mientras que se identificaron siete meses críticos donde se requerían mapas de 10kWh/m<sup>2</sup>. Para contrarrestar los efectos de las ganancias térmicas (GIZ/INFONAVIT, 2011).

Por su parte, otro de los primeros trabajos de simulación enfocada en el desempeño energético y evaluación de confort fue el desarrollado en Salamanca, Guanajuato (2012), bajo la influencia de una región de clima templado subhúmedo (Climático, 2016). El proyecto consistió en una primera etapa de validación energética resultante en 5% y de gas en 1% de 5 viviendas representativas que no utilizan sistemas de refrigeración o calentamiento mecánico, para después correr otro periodo de simulaciones de optimización enfocados en identificar las combinaciones de materiales y aislantes en la envolvente que garanticen la disminución anual en el consumo energético y de gas con base en los periodos diarios dentro del confort interior (Griego, Krarti, & Hernandez-Guerrero, 2012). Mientras que en 2014, Oropeza-Perez y Ostergaard, mediante un cálculo de estimaron el impacto energético que generaría el aprovechamiento de ventilación natural en las regiones de clima cálido seco y clima húmedo, mediante c

Como estudios regidos por la peculiaridad del clima tropical, se puede enlistar el realizado en Bucarama, Colombia, con la intención de validar y optimizar ambientalmente el modelo de vivienda unifamiliar de dos plantas. Para esto el periodo de evaluación se monitoreo la temperatura interior con y sin ventilación natural de una vivienda en horario de 8am a 5pm, para después reproducirla mediante modelos. El estudio multi-zona se enfocó en analizar aquellos espacios cuyo MSE (media del error cuadrado) sean menor, que para tal caso correspondió al patio y cuarto con un error entre los datos registrados de 0.21°C y 0.29°C, respectivamente (Cárdenas, Osmá, Merchian, & Ordoñez, 2016). La valuación posterior permitió identificar que las ganancias de calor internas dependían en un 43.4% de las ventanas y en un 31.8% de las personas, mientras que las orientaciones este y oeste reportaron las menores temperaturas, debido a las pérdidas de calor provocadas por las corrientes de aire.

Otro caso en una región tropical se efectuó en Ecuador (Miño Rodríguez & Naranjo Mendoza, 2016) condujeron una evaluación comparativa entre dos viviendas rurales con diferentes materiales en la envolvente: caso A compuesta por muros de block de tierra comprimida y cubierta con tejas de concreto, mientras que el caso B fue de muro de block hueco de concreto con una cubierta a base de lámina de zinc. Además de comparar el impacto de la temperatura exterior con la registrada en interior, se evaluó la precisión del modelo con los datos horarios del monitoreo mediante dos niveles de evaluación: los resultados de regresión R<sup>2</sup> tuvieron una mayor correlación para la vivienda sin aislamiento del caso B(0.83) que para el caso B(0.79), mientras que la temperatura interior arrojó un RMSE de 1.1°C en ambos casos.

Dentro de la misma línea de investigación, en República Dominicana se condujo una optimización en el confort de la vivienda, dentro del proceso se condujo la validación del modelo de vivienda mediante el uso de sensores ambientales en interior y la evaluación de la temperatura superficial interior en la envolvente durante un año de monitoreo, con el fin de evaluar y proponer una mejora en el confort térmico (García, Cuadrado, & M. Blanco, 2018). El resultado de la campaña de temperatura interior arrojó un coeficiente de determinación de 0.98 entre los valores reales y simulados, sin embargo no se especifica el tiempo de los valores utilizados. La segunda parte presentó un análisis del impacto existente bajo ocho diferentes orientaciones –la mejor orientación fue hacia en la fachada Este con un promedio de 0.19°C de mejora respecto a la de mayor temperatura-, proyección de elementos de sombra sobre muros

(que no incidieron en la temperatura interior), así como diferente composición de materiales que resultaren generar mayores impactos en la temperatura (hasta 4°C menos) con respecto a las modificaciones en fachada.

Un ejemplo de la modelación matemática en componentes de la vivienda con proyecciones durante un tiempo de vida de 20 años fue ejecutado por Eleftheriadis en el 2018, cuantificando el impacto de la degradación del aislante de la envolvente y los equipos de calefacción dividida en mantenimiento bajo y alto en una casa tipo de Alemania. Con una proyección de 20 años concluyó que para el caso del aislamiento de XPS, la vivienda eleva los consumos de energía primaria durante los primeros 4 años, mientras que el boiler y calefactor sin mantenimiento elevan su consumo eléctrico un 29.8% y 47.1% respectivamente, durante el periodo de 20 años, lo cual se traduce en el consumo proyectado para 29 años en caso de no contar con la degradación (Eleftheriadis, 2018).

### 2.2.2 Islas urbanas de calor

El estudio climático consiste en la medición periódica de diversas variables, las mediciones de temperatura se encuentran afectadas por los alrededores, la vegetación la presencia de edificios y otros objetos, entre otros. Por lo tanto la Organización Mundial Meteorológica (WMO) señala que las mediciones no consisten únicamente en el registro de datos ambientales, sino también de las circunstancias o condiciones en las que son registradas. La información metadatos es necesaria para prever al investigador sobre la incertidumbre o error atribuible a los cambios.

Por su parte los escudos protectores solares han demostrado que no se adaptan perfectamente a un tipo de clima en particular y que puede variar según las condiciones del lugar. De esta forma la carcasa en la que se ingresan los data-loggers como protección solar se ven afectados principalmente por la radiación de onda corta y larga (Bernard, Kéravec, Morille, Bocher, & Musy, 2019). El trabajo de Bernard et al. (2019) consistió en estimar el error en las mediciones de temperatura del aire de los protectores solares mediante un proceso que involucró tres modelos matemáticos, el estudio llevado a cabo en el desierto de Sahara, evaluó y comparó los resultados de 18 estaciones meteorológicas, excluyendo aquellas con ventilador. Y tomaron como referencia los datos de temperatura del protector Davis ya que sigue la temperatura del aire rápidamente y es la menos sensible a la radiación global. Tiene mejor tiempo de respuesta, menor error en radiación y baja velocidad del viento. Como desventajas, el protector Davis en situaciones extremas suele tener el peor desempeño: en velocidades menores a  $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  no se alcanza la temperatura más alta en la noche ni la más baja durante el día; baja dirección del viento y radiación menor a los  $250\text{W}\cdot\text{m}^2$  tiene mayor impacto que aquellos con ventilador. Se suelen calentar durante altas velocidades del viento

## **CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA**

### 3.1 Diseño metodológico

Como se mencionó en el capítulo pasado, no existe un proceso normado para la ejecución de validaciones termo-ambientales, por lo que este trabajo desarrolló una metodología que partió del enfoque de análisis de simulación integral del edificio (*Whole building simulated calibration approach*) definido en los lineamientos de la *ASHRAE 14-2002: Measurement of energy demand and savings*, en conjunto con el diseño metodológico para la evaluación del desempeño de edificios según el nivel de adquisición de datos disponible (Hwa Cho, 2019), que en este caso corresponde al nivel 3. Es preciso señalar que se parte de una investigación de caso de estudio, la cual ha sido criticada por su enfoque cualitativo, falta de rigor científico y carencia de confianza en la presentación de datos (Bahanerein Mohd Noor, 2008). No obstante, su aplicación en el campo de la modelación permite valerse tanto de técnicas de investigación de campo (observación, entrevistas, adquisición de datos en sitio), como de la técnica documental (especificaciones técnicas, programación), para después someterla a un análisis estadístico que debe cumplir con criterios aceptados por asociaciones internacionales.

La figura 4 presenta el diagrama de trabajo ejecutado, destacándose por el color de las actividades según sea el objetivo particular señalado previamente en el capítulo 1: amarillo corresponde al primer objetivo, gris al segundo objetivo y azul al tercero.

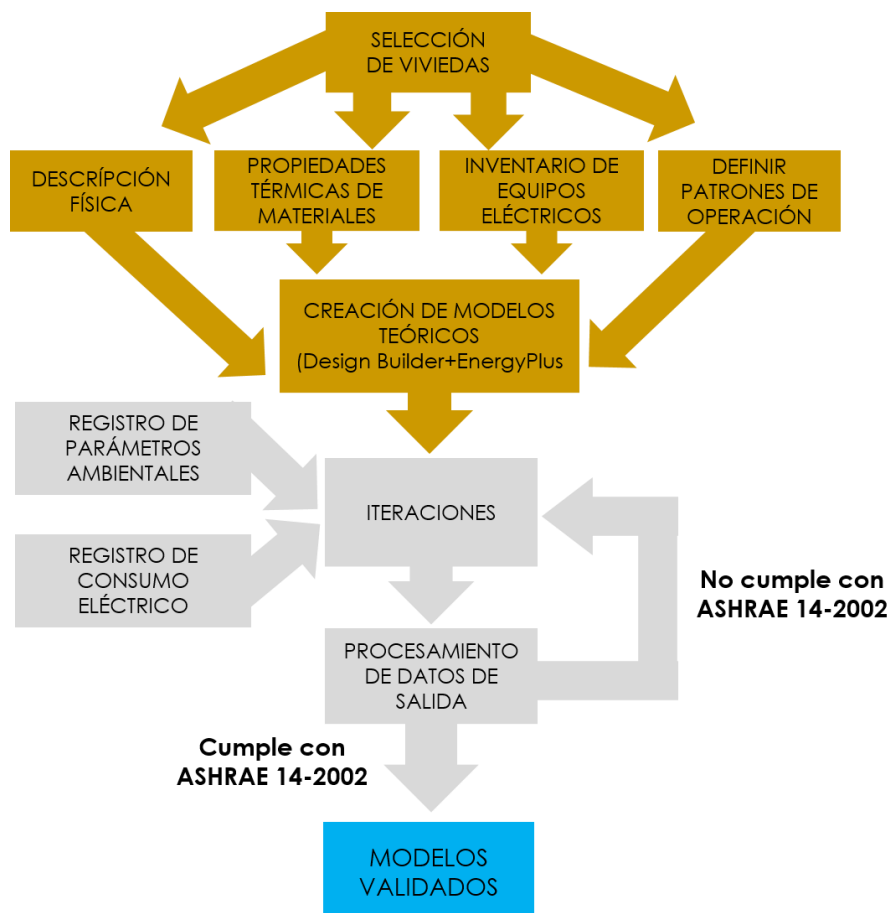


Figura 4. Diagrama de flujo de las actividades realizadas Elaborado a partir de la metodología ASHRAE 14-2002 y Hwa Cho (2019)

La investigación partió de la aprobación de los propietarios de la vivienda para la realización de un estudio de seguimiento que comienza con la descripción auditada de la vivienda, con la intención de recolectar la mayor cantidad de información referente a las características constructivas, geométricas y de uso energético de cada caso de estudio. Valiéndose de herramientas como cinta métrica, cámara fotográfica y un formato de entrevista previamente definido (consultar Anexo 1) se asistió al sitio de estudio para registrar la información necesaria para la elaboración de los modelos teóricos que corrieron mediante dos pruebas: una con el archivo histórico Typical Meteorological Year (TMY) obtenido desde la base Meteonorm, y otro mediante un Archivo Meteorológico Personalizado (AMP), creado a partir de los datos obtenidos en la estación meteorológica correspondientes únicamente a los meses registrados.

Este primer acercamiento se realizó a principios de febrero del 2019. Una vez que ya se disponía de los adquisidores de datos, estos fueron colocados en el interior de las recámaras que contaban con aire acondicionado. La primera campaña de monitoreo quedó definida del día 9 de febrero al 30 de abril y consistió únicamente en el registro ambiental de un solo espacio para cada caso de estudio. Durante este tiempo se realizó un seguimiento de consumo eléctrico mediante el recibo bimestral de CFE. Para la segunda de monitoreo no fue posible incluir a la vivienda 3, ya que los usuarios no pudieron continuar participando en el desarrollo de esta investigación, por lo que su periodo de monitoreo concluyó el 9 de abril.

Ya que trabajos previos han creado su AMP a partir de estaciones dispuestas en el sitio de estudio, en esta investigación no fue posible realizar el mismo proceso, debido a permisos para la instalación de equipo especializado fuera de las instalaciones del ITCH en donde no se cuente con las condiciones necesarias tanto para su correcta instalación, como el resguardo y protección de la unidad. Sin embargo, se contó con un sensor ambiental para exterior cuya instalación y recopilación de datos fue más sencilla. Aprovechando está limitante, se decidió comparar la diferencia de datos registrados en ambos sensores (la estación y el HOBO) para cuantificar la variación de temperatura del microclima de influencia en las muestras, tomando los datos de la estación como un referente ambiental urbano.

Además de un análisis comparativo de la temperatura del aire exterior, el segundo periodo de evaluación consistió en una campaña de monitoreo a cada uno de los casos de estudio, esta vez a nivel multi-zona durante una semana representativa de la temporada con las condiciones ambientales donde se registren las temperaturas más elevadas. Debido a la limitante en el número de dispositivos de registro de datos, las viviendas fueron estudiadas de manera independiente. El resultado fue un registro de parámetros tanto interior como exterior de los casos de estudio durante la semana que comprende del 10 al 17 de mayo, para la vivienda 1. Mientras que para la vivienda 2 el periodo de monitoreo fue del 20 al 26 de mayo del mismo año. Durante este proceso, el registro de consumo energético se realizó a partir de las lecturas a los medidores de CFE de cada vivienda en periodos de 24h durante la semana de estudio correspondiente a cada caso.

Una vez concluido el periodo de descripción y registro de datos, se efectuó el procesamiento de la información recopilada en los casos de estudio y se procedió a validar las viviendas mediante un proceso manual a través de iteraciones siguiendo el proceso de modificación mediante un parámetro a la vez, para la lectura de los datos de salida. Al contrastar la información de manera gráfica y estadística con el fin de cumplir con los requerimientos mencionados de la norma ASHRAE 14-2002, los parámetros en los que se concentró la variación de datos de entrada fue de aquellos a los que se tenía mayor incertidumbre: infiltración, renovaciones aire y ajuste de temperaturas de consigna de aire acondicionado. El objetivo de las iteraciones es acercar a los modelos teóricos con los valores reales obtenidos durante la segunda campaña de medición y

con esto valorar el desempeño de la vivienda para entender la afectación global a partir de un balance térmico para cada caso estudiado.

### 3.2 Equipos y herramientas de trabajo

#### 3.2.1 Adquisidores de datos para interior

Para el registro de los parámetros de temperatura y humedad relativa en interior se dispuso de un total de 3 adquisidores de datos tipo HOBO MX1101, de la marca Onset, con una precisión de  $\pm 0.21^{\circ}\text{C}$ , mismos que fueron instalados en el interior de las zonas de estudio tomando como referencia las recomendaciones de la ASHRAE 55-2017 y ANSI ASHRAE 62.2-2013, relacionadas con el Confort Térmico y la Ventilación y calidad de aire interior en edificios residenciales, respectivamente. Una ventaja de este equipo es la descarga de datos a través de Bluetooth por medio de la aplicación HOBO mobile Version 2.0.1.

Sin embargo, es importante destacar que el monitoreo de datos se realizó en viviendas ocupadas, y con el fin de evitar tanto daños a los sensores como a los usuarios y la realización de sus actividades al interior, se optó por colocarlos en puntos estratégicos (Enriquez & Jiménez, 2017): para el caso de las recámaras con aire acondicionado, el sensor se dispuso sobre el muro partición a una altura de 1.40m sobre el nivel de piso, localizada en el muro perpendicular al del equipo de enfriamiento con una distancia de 3m (ver figura 5). Además de localizarse alejado de la salida directa del aire, también se consideró colocarlo lejos de las ventanas o muros en los que se proyecte radiación solar directa, con el fin de evitar una afectación en el registro de datos.

Por su parte, en las zonas comunes, los dispositivos se colocaron en un punto equidistante de los muros perimetrales, suspendiéndose a una distancia de 80cm desde el plafón.

Durante la primera campaña de monitoreo, el registro de datos se estableció de manera horaria. Mientras que en la segunda campaña, durante la semana representativa, fue necesario el registro de manera sub-horaria.

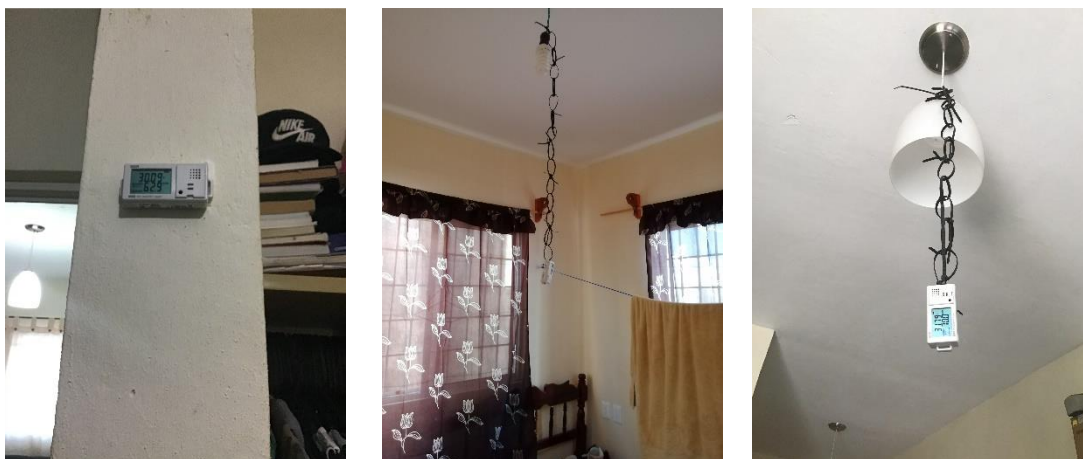


Figura 5. Adquisidores de datos localizados colocados sobre muro en las recámaras principales, y suspendidos debajo del plafón en zonas comunes

### 3.2.2 Adquisidores de datos para exterior

El registro de datos ambientales exteriores se realizó por medio de una estación meteorológica Davis Vantage Pro 2, instalada sobre la azotea del Laboratorio de Construcción del Instituto Tecnológico de Chetumal. La estación fue programada para el registro de datos en periodos subhorarios, tales parámetros registrados fueron: velocidad y dirección del aire, temperatura de bulbo seco, humedad relativa, presión barométrica y radiación global horizontal, entre otras. La estación meteorológica, cuya base cuenta con 1.10m sobre el nivel de la azotea (3.30m) y el anemómetro alcanza una altura total de 6.40m sobre el nivel de piso (ver figura 6), almacenaba la información de manera inalámbrica en la consola Vantage Pro, para luego importarla a una unidad PC mediante la conexión USB. La lectura y procesamiento de información almacenada en la unidad PC se gestionó mediante el programa de instalación WeatherLink 6.0.4.



Figura 6. Estación meteorológica ubicada en el ITCH (izq.). Dispositivo HOBO con su protector solar, localizado en la azotea de caso de estudio 1 (der.)

Con respecto a los casos estudiados, la estación meteorológica tiene una radio de distancia de 4.55km con respecto a la casa más cercana que es la Casa 2, mientras que la mayor distancia la tiene con la casa 1 con un radio aproximado de 5.22km (ver figura 7).

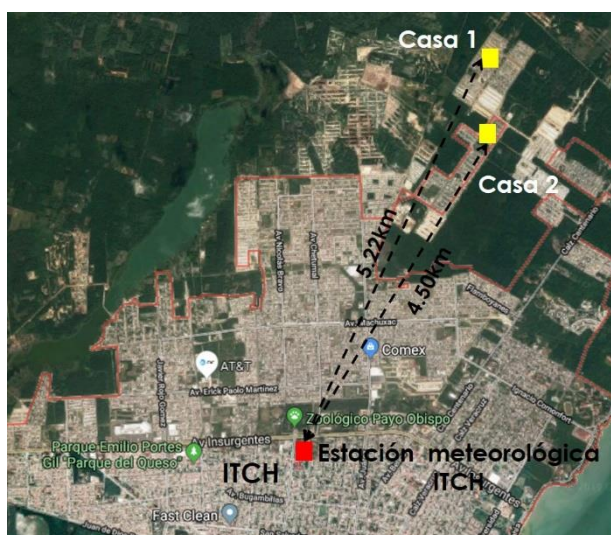


Figura 7. Distancia entre los casos de estudio y la estación meteorológica

Por otra parte, el monitoreo exterior en los casos de estudio se realizaron con un HOBO MX2300, de la marca Onset, colocado dentro de un protector solar de polietileno de alta densidad (HDPE), colocado en la azotea de las viviendas durante la semana de evaluación, a una altura

aproximada de entre 50cm y 80cm sobre el nivel de la losa. La descarga de datos, al igual que el HOBO MX1101, fue por medio de Bluetooth y almacenado en la aplicación HOBOMobile.

### 3.2.3 Creación de archivo meteorológico personalizado

La creación del archivo meteorológico personalizado en formato EPW se realizó de manera parcial por los periodos representativos correspondientes a la campaña de monitoreo y no se creó un archivo meteorológico de año típico personalizado. Para ello fue necesario contar con un archivo meteorológico de referencia para sustituir los datos en su formato .CSV. Para crear el archivo personalizado con el registro de datos de la estación, fue necesario usar el programa *Weather statistics and conversions* del paquete EnergyPlus.

En un archivo en formato .CSV se ingresaron los datos horarios (promediados del registro sub-horario de la estación) correspondientes a la temperatura de bulbo seco exterior(°C), humedad relativa (%), dirección del viento (°), velocidad del viento (m/s), presión barométrica (hPa) y radiación solar (W/m<sup>2</sup>). La estructura del formato del archivo climático disponía de otros valores que por defecto estaban en modo “realizar cálculos”, entre ellos la radiación difusa y radiación directa, mismas que la estación meteorológica calcula de manera íntegra considerándola como radiación global horizontal.

Una vez llenado el archivo .CSV, el programa de *Weather statistics and conversions* permite convertir el archivo ingresado en el fichero en diferentes formatos (tal como se muestra en la figura 7). Para este caso la opción fue el formato EnergyPlus; creando 4 archivos anexos. El archivo EPW es el que considera el programa para correr las simulaciones, mismo que será definido al operar el programa, en las propiedades a nivel sitio.

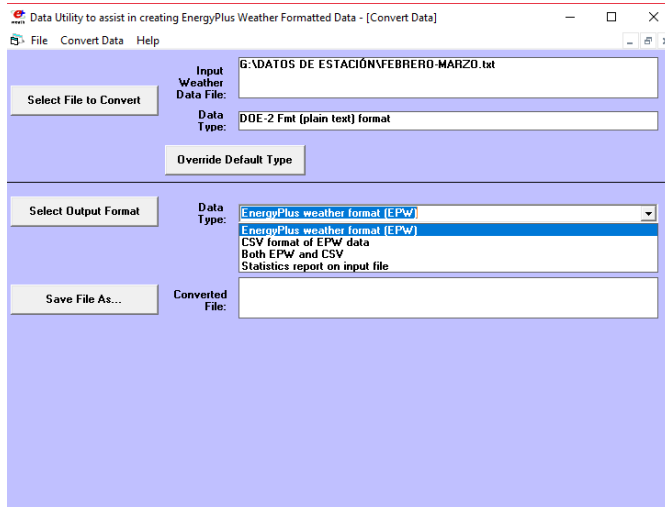


Figura 8. Pestaña de aplicación para convertir archivos climatológicos para EnergyPlus

## 3.3 Procesamiento de información

### 3.3.1 Análisis de incertidumbre

Teniendo noción de antemano que la certeza absoluta en los modelos no puede ser alcanzada, es conveniente cuantificar la incertidumbre de las propuestas teóricas. En esta etapa de la investigación es donde se concentra el proceso de calibración de los modelos, ya que los resultados de las simulaciones generadas (conocidos como datos de salida) son sometidos a un



análisis que pretende valorar el grado de sesgo y desviación producido entre los datos de salida y los datos reales.

En este sentido, la evaluación de calibración tomó como referencia el criterio de determinación con mayor aceptación, que es el de la ASHRAE Guideline 14-2002, el cual recomienda los siguientes índices para representar que tan bien descrito es la variabilidad de los datos según sea el nivel de información a evaluar ya sea en nivel horario o mensual: un error nominal de sesgo medio (por sus siglas en inglés NMBE) de  $\leq 10\%$  y un coeficiente de variación de la raíz del error cuadrático medio (CV RMSE)  $\leq 30\%$ , ambos casos cuando se realice una evaluación con datos horarios. Mientras que el criterio establecido para la evaluación mensual es de  $\leq 5\%$  para el caso de NMBE y de  $\leq 15\%$  para el caso de CV(RMSE). Sin importar el nivel de evaluación, las fórmulas para determinar los valores correspondientes se expresan en las ecuaciones:

$$NMBE\% = \frac{1}{m_{av}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{n} \times 100$$

$$CV(RMSE)\% = \frac{1}{m_{av}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{n}} \times 100$$

En donde  $n$  representa el número de valores evaluados, ya sea meses, días u horas;  $m_{av}$  es la media de los valores obtenidos en sitio;  $m_i$  son los valores reales o registrados y  $s_i$  son los datos simulados (Ramos Ruíz & Fernández Bandera, 2017).

Otro índice de evaluación utilizado para determinar el óptimo ajuste por medio de evaluar la aptitud entre los datos simulados contra los observados, es por medio de una línea de regresión  $R^2$ , conocido como coeficiente de determinación o Pearson (Ratner, 2009), cuyo valor límite se encuentra entre 0.00 y 1.00, significando con esto que un mayor valor presentaría de manera más precisa el comportamiento real del modelo. Por su parte, la ASHRAE considera que los modelos se encuentran dentro el grado de confianza siempre que el valor no esté por debajo de 0.75 (American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers, 2009). Por lo tanto, autores en el área recomiendan que la incertidumbre en los modelos sea evaluada mediante una fórmula de sesgo y una de bondad de ajuste (Guitierrez González, Alvarez Comendares, López Fidalgo, & Ramos Ruiz, 2019). La ecuación del coeficiente de determinación se expresa de la siguiente manera:

$$R^2 = \left( \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n m_i \cdot s_i - \sum_{i=1}^n m_i \cdot \sum_{i=1}^n s_i}{\sqrt{(n \cdot \sum_{i=1}^n m_i^2 - (\sum_{i=1}^n m_i)^2) \cdot (n \cdot \sum_{i=1}^n s_i^2 - (\sum_{i=1}^n s_i)^2)}} \right)^2$$

## **CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### 4.1 Casos de estudio

La ciudad de Chetumal se localiza al sur del estado de Quintana Roo bajo los paralelos 18°28' a 18°34' latitud Norte y los 88°14' a 88°29' longitud Oeste, con una elevación media de 9msnm (H. Ayuntamiento de Othon P. Blanco, 2018). De acuerdo con su ubicación geográfica, la clasificación Köppen la agrupa dentro de la zona cálido sub-humedo (García E. , 2004), teniendo una temperatura media anual de 28.2° (INEGI, 2017). Particularmente, los casos de estudio seleccionados pertenecen al fraccionamiento "Las Americas" en sus etapas II y III desarrollado por la inmobiliaria PROMOCASA. Como se puede apreciar en la figura 9, el desarrollo se encuentra en el pólígono urbano norte, que es donde se concentra el mayor porcentaje habitacional dentro de la trama urbana, particularmente orientado hacia el noreste, limitando con desarrollos como Centenario, Bicentenario y la población de Calderitas. Se reconoce al fraccionamiento "Las Americas" como una de los desarrollos habitacionales más recientes (etapas de construcción durante periodos del 2013 al 2016), y también como una de las zonas de mayor distancia con respecto al centro urbano y físico de Chetumal.

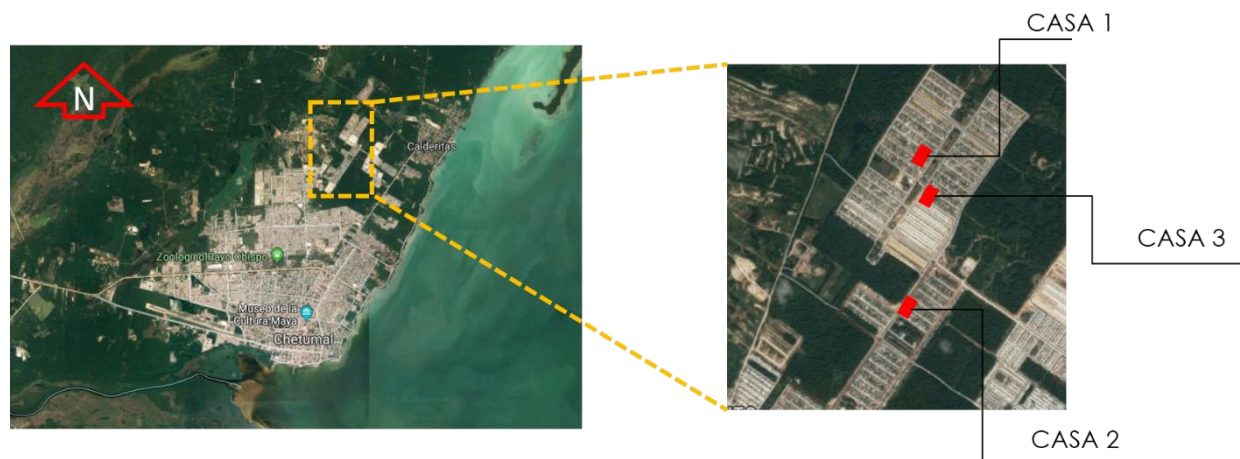


Figura 9. Imagen satelital de Chetumal, señalando el fraccionamiento donde se encuentran los casos estudiados.

La selección de los casos de estudio obedeció a una selección aleatoria regida por las siguientes características:

- Período de ocupación menor a los 7 años
- Densidad de ocupación de entre 1 y 4 habitantes por casa
- Una superficie construida no mayor a los 55m<sup>2</sup>
- Conserven las características de diseño originales

- Cuenten, por lo menos, con un espacio acondicionado con equipo de ventilación mecánica

Las características de diseño propias de cada una de las viviendas seleccionadas se pueden apreciar de forma gráfica en la figura 10, y su configuración física resumida en la figura 11. En los tres casos estudiados, los espacios acondicionados fueron la recámara principal, cuya ocupación coincidió ser de dos personas adultas para los tres casos. Por su parte, el caso 3 cuenta con 2 ocupantes adicionales menores de edad.



Figura 10. (De izquierda a derecha) Plantas arquitectónicas de las viviendas correspondiente al caso 1, caso 2 y caso 3.

Tabla 1. Características de diseño de las viviendas seleccionadas

	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Case 3</b>
<b>Orientación</b>	Noreste	Suroeste	Noreste
<b>Ocupación total</b>	2	2	4
<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	35.45	42.5	48.9
<b>Zonas</b>	Sala/comedor Cocina Baño Recámara	Comedor/cocina Baño Recámara/bodega Recámara pral.	Sala/comedor Cocina Baño Recámara niños

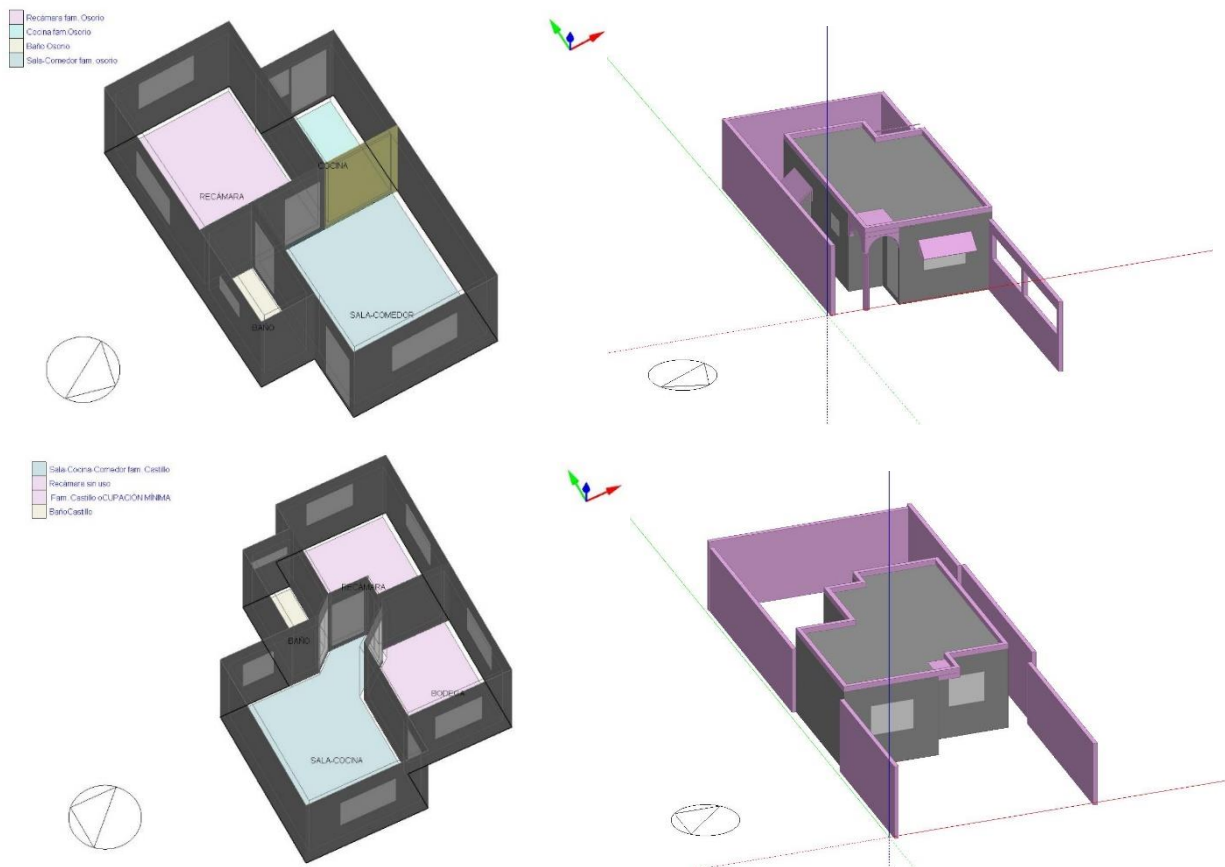
Recámara pral.

Zona de monitoreo	Recámara principal		
Área (m <sup>2</sup> )	10.2	8.62	9.4

## 4.2 Configuración de los modelos teóricos

### 4.2.1 Configuración físico-constructiva

La configuración de las propiedades de las casas de estudio partió de la visita a campo para realizar una descripción auditada de la envolvente y la identificación de los sistemas electrónicos componentes. Este proceso se valió de la observación, captura fotográfica y medición de las dimensiones de los elementos de las casas. Tal como se resume en la tabla 2, las casas poseen prácticamente los mismos materiales constructivos: mampostería y una delgada capa de concreto en la envolvente opaca, clasificándose como de tipo aligerada (block hueco en muros y forjado hueco unidireccional en losa). Del levantamiento físico de las casas se obtuvieron los datos para poder crear los modelos geométricos mediante la interfaz gráfica de DesignBuilder necesarios para los cálculos.



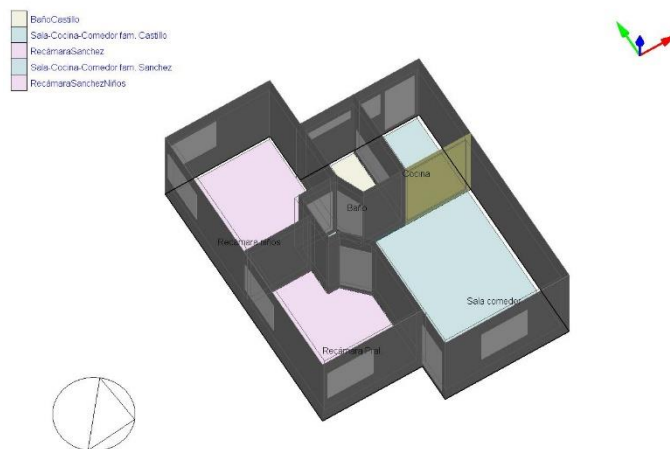


Figura 11. Creación de modelos geométricos mediante DesignBuilder. De arriba a abajo: Casa 1, Casa 2, Casa 3.

La operación en ambos casos de estudio es de dos ocupantes, por lo que se consideró un factor metabólico promedio del 0.90 (EnergyPlus, 2015). En cuanto a los valores térmicos de la envolvente, éstos fueron identificados mediante la visita al sitio, asumiendo propiedades térmicas constantes representadas en la tabla 2.

Tabla 2. Descripción de las propiedades térmicas de los materiales utilizados en la vivienda

	CASA 1		CASA 2		CASA 3	
	Materiales	Valor-U (W/m <sup>2</sup> K)	Materiales	Valor-U (W/m <sup>2</sup> K)	Materiales	Valor-U (W/m <sup>2</sup> K)
<b>Piso</b>	100 mm firme de concreto	4.73	100 mm firme de concreto	4.73	100 mm firme de concreto	4.73
<b>Muros y Particiones</b>	15mm Mortero exterior	2.66	15mm Mortero exterior	2.66	15mm Mortero exterior	2.66
	150mm Block hueco de concreto		150mm Block hueco de concreto		150mm Block hueco de concreto	
	15mm Mortero interior		15mm Mortero interior		15mm Mortero interior	
<b>Cubierta</b>	30mm concreto reforzado	3.377	30mm concreto reforzado	3.377	12mm calcreto	3.288
	170mm F.U. de concreto		170mm F.U. de concreto		30mm concreto reforzado	
	15mm de mortero interior		15mm de mortero interior		170mm F.U. de concreto	
<b>Marco de Ventanas</b>	1.2mm Aluminio	2.777	1.2mm Aluminio	2.777	1.2mm Aluminio	2.777
	30mm vacío de aire		30mm vacío de aire		30mm vacío de aire	
	1.2mm Aluminio		1.2mm Aluminio		1.2mm Aluminio	
<b>Acristalamiento</b>	Tintex verde 6mm	5.808	Filtrazol gris 6mm	5.812	Tintex verde 6mm	5.808
<b>Sombreado sobre ventanas</b>	1.5mm Acero galvanizado	160	N/A	N/A	N/A	N/A

Los valores *U* de los elementos resultaron de la configuración de cálculo predeterminada por EnergyPlus, tomando las propiedades de conductividad, calor específico, densidad y espesor de cada material los necesarios para asumir la transmitancia térmica del elemento. Para las propiedades térmicas de los materiales identificados se recurrió a los valores dados por otros

estudios: para el caso de los morteros y recubrimientos exteriores se tomó como referencia la caracterización de recubrimientos realizada por Mendoza García(2018), a la evaluación de muro de block hueco (Pérez, E. Cabanillas, F. Hinojosa, & C. Borbón, 2011), (C. Borbón, E. Cabanillas, & B. Pérez, 2010)forjados unidireccionales de vigueta y bovedilla. Para el caso particular de los vidrios, se recurrieron a las especificaciones técnicas según la marca, ya que diversos proveedores en el sector de la cancelería reportaron abastecerse de las marcas Tintex y Filtrasol.

También fueron considerados los datos la biblioteca de materiales CALENDER y LINDER que dispone EnergyPlus, a la que fue recurrida para datos de metales y cancelería, no para el caso de materiales con agregado petreo, puesto que los valores estan dispuestos de acuerdo a las propiedades del agregado de cada zona.

#### 4.2.2 Componentes de sistemas eléctricos

La visita auditada permitió elaborar un inventario de componentes eléctricos clasificados por plantillas que el propio software utiliza y se identifican como; aparatos, iluminación y HVAC. Mientras que la determinación del tiempo de uso de los diferentes sistemas eléctricos fue el resultado de las entrevistas hechas a los usuarios. El formato de la entrevista estuvo basado en gran medida en las tablas de la Guía para preparar estudios de viabilidad para proyectos de eficiencia energética (California Energy Commission, 2000), señalando, además de las características de los aparatos electrónicos, el número de horas diarias que se hace uso del equipo. Para hacer más práctica la recolección de información de datos, el registro horario se dividió en dos periodos; días entre semana (lunes a viernes) y días en fin de semana (sábado y domingo). De esta manera, se normaliza la potencia por zona que compone la vivienda y se reduce el grado de detalle en las operaciones de cálculo que realizará el programa al momento de correr con las simulaciones.

Con referencia a las cargas internas, estas fueron calculadas por la fracción de la demanda absoluta por zona, que para el caso 1 fue de 145W y 310W en el cuarto y la cocina/comedor, respectivamente; mientras que en el caso 2 fueron de 165W y 450W en el caso de la recámara principal y la cocina, respectivamente. Mientras que la casa 3 las cargas fueron de 145W y 520W, respectivamente en recámara y sala (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009). En el caso de la cocina, la fracción latente utilizada fue del 0.30, para los tres casos.

#### A) Aparatos

De la visita auditada al sitio se generó el inventario de equipos electrónicos que conforman las diferentes zonas de cada vivienda. Los resultados de las entrevistas y visita a campo están representadas en la tabla 3. La potencia fue obtenida mediante la información de la etiqueta de cada aparato misceláneo. Ya que en software se utilizaron opciones de modelado a partir de la potencia absoluta por zonas, la información se describe de manera decimal, ya que la programación de equipos se ingresara bajo de forma simplificada asignando la fracción de uso dependiendo el horario, tal como se ve en la figura 12.

Tabla 3. Inventario de aparatos eléctricos de cada casa agrupados por zona

	Espacio	Aparato	Cantidad	Volts	Potencia	Hr/día (Lun-Vie)	Hr/día (Sab y dom)	Potencia total x zona
<b>Casa 1</b>	Sala /cocina	Ventilador de piso	1	110	100	0.5	0	415
		Licudadora	1	110	320	0.083	0	

	Recámara	Refrigerador 9'	1	110	235	18	18	190
		T.V 38"	1	110	55	5	8	
		Ventilador de piso	1	110	70	5	8	
		Laptop	1	110	60	2	3	
		Celulares	2	110	5	6	6	
<b>Casa 2</b>	Comedor/cocina	Ventilador de piso	1	110	110	1	2.5	345
		Refrigerador 9'	1	110	235	16	16	
	Recámara	T.V 38"	1	110	55	4	8	2098
		Ventilador de piso	1	110	110	3	3	
		Laptop	1	110	60	1	3	
		Celulares	2	110	3	7	7	
		Plancha	1	110	1020	0.25	0	
Secadora p/cabello	1	110	850	0.16	0			
<b>Casa 3</b>	Sala/cocina	Ventilador de piso	1	110	55	4	3	404
		Consola de video	1	110	17	2.5	6	
		T.V. 24"	1	110	35	4	5	
		Refrigerador 11'	1	110	297	18	18	
	Recámara principal	T.V 32"	1	110	53	3	3	218
		Ventilador de techo	1	110	100	6	6	
		Laptop	1	110	60	2	3	
		Celulares	2	110	5	6	6	
	Recámara niños	Ventilador de piso	1	110	70	8	8	70

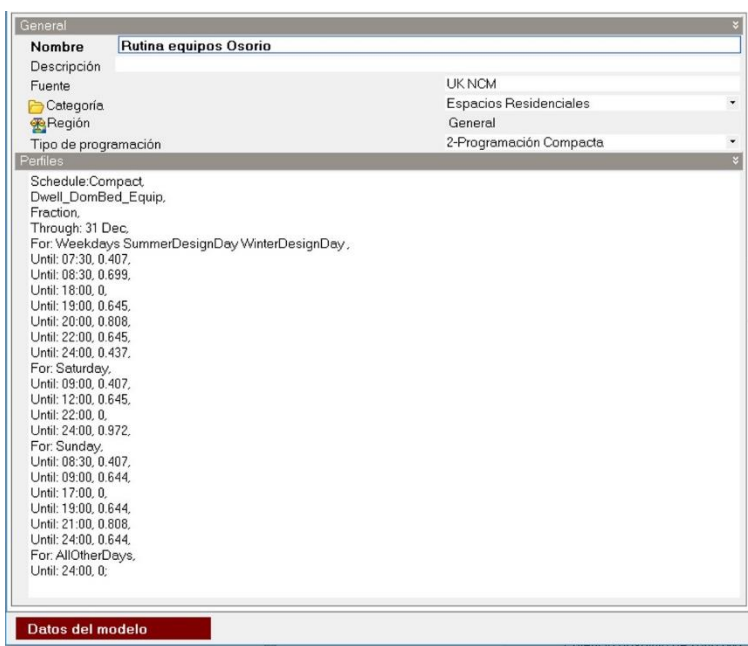


Figura 12. Definición del uso de equipos mediante la simplificación del cálculo por potencia absoluta



## B) Iluminación

En el caso de la iluminación, todas las viviendas contaban con luminarias fluorescentes compactas, de manera suspendida del plafón. La potencia particular de cada foco por zona oscilaba entre un potencia lumínica de 16W a 20w. Por lo tanto, para practicidad de modelado se optó normalizar la potencia de todos los espacios 5W/m<sup>2</sup>-100lux, que se encuentra normado para espacios residenciales (American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers, 2009).

Tabla 4. Esquema de operación de luminarias Casa 1

	LUNES A VIERNES	No. HORAS ENTRE SEMANA	SÁBADO	No. HORAS SÁBADO	DOMINGO	No. HORAS DOMINGO	TOTAL HORAS x SEMANA
<b>Recámara</b>	24:00-00:30	6.5	24:00-00:30	5.5	24:00-01:00	9	47
	7:30-8:30		9:00-12:00		08:00-09:00		
	19:00-24:00		22:00-00:00		17:00-00:00		
<b>Baño</b>	7:30-8:00	1	10:00-10:30	1	08:00-08:30	1	7
	19:00-20:00		22:00-22:30		19:00-19:30		
<b>Cocina</b>	8:00-8:10	1	10:00-10:20	1	08:30-08:40	1	7
	19:00-24:00		22:00-24:00		19:00-24:00		
<b>Comedor</b>	7:30-8:30	6		2	08:30-09:00	5.5	37.5
	19:00-24:00		22:00-24:00		19:00-24:00		
<b>Exterior</b>	8:30-21:00	12.5	12:00-22:00	10	9:00-21:00	12	84.5

Tabla 5. Esquema de operación de luminarias Casa 2

	LUNES A VIERNES	No. HORAS ENTRE SEMANA	SÁBADO Y DOMINGO	No. HORAS FIN DE SEMANA	TOTAL HORAS x SEMANA
<b>Recámara</b>	08:00-09:00	6	11:00-13:00	7	44
	18:00-23:00		19:00-24:00		
<b>Baño</b>	08:00-08:30	2.5	19:00-20:00	1	14.5
	20:00-21:00				
<b>Comedor/cocina</b>	08:30-22:00	13.5	14:00-23:00	9	85.5
<b>Recámara/bodega</b>	20:00-20:20	0.3	20:00-20:30	0.5	2.5
<b>Exterior</b>	9:00-24:00	15	14:00-24:00	10	95

Tabla 6. Esquema de operación de luminarias Casa 3

	LUNES A VIERNES	No. HORAS ENTRE SEMANA	SÁBADO	No. HORAS SÁBADO	DOMINGO	No. HORAS DOMINGO	TOTAL HORAS x SEMANA
<b>Recámara</b>	07:00-8:00	6	01:00-02:00	5	01:00-02:00	5	40
	19:00-24:00		09:00-10:00		20:00-24:00		
			21:00-24:00				
<b>Baño</b>	7:00-8:00	3	09:00-10:30	3.5	09:00-10:30	3.5	22

	16:00-17:00		14:00-15:00		14:00-15:00		
	20:00-21:00		21:00-22:00		21:00-22:00		
<b>Cocina</b>	18:00-22:00	4	18:00-22:00	4	20:00-20:30	0.5	24.5
<b>Comedor</b>	18:00-22:00	4	15:00-22:00	7	20:00-22:00	2	29
<b>Exterior</b>	19:00-22:00	3	15:00-22:00	7	12:00-22:00	10	32

### C) Aire acondicionado

En los tres casos las viviendas cuentan con un equipo de aire acondicionado de tipo mini Split de la misma capacidad de refrigeración, sin embargo a la casa 1 se le asignó una potencia de 1.85 kW ya que el equipo cuentan con más de 5 años de uso (SENER, 2015). Las características de los equipos se encuentran en la tabla 7.

Tabla 7. Características de los equipos de aire acondicionado que cuenta cada vivienda

	Casa 1	Casa 2	Casa 3
<b>Capacidad de enfriamiento (BTU)</b>		12,000	
<b>Potencia (kW)</b>	1.8	1.3	1.8
<b>EER</b>	2.51	3.52	2.51
<b>Consigna de temperatura (°C)</b>	20	23	22

El número de horas totales de uso semanal del aire acondicionado fue definido con un total de 44 hrs de uso para la vivienda 1, 41h en la vivienda 2, mientras que la vivienda 3 reportó un total de 23h.

#### 4.2.3 Esquema de operación

En cuanto a la ocupación, ésta estuvo determinada con base en las entrevistas realizadas a los ocupantes y su representación numérica partió de un esquema simplificado dividido por rutina de días entre semana y fines de semana. Por consiguiente, en una primera etapa la vivienda 1 reportó desocupada entre semana (lunes a viernes) en horario de 08:30hrs a 19:00hrs, los sábados reportó una desocupación de las 12:00hrs a las 21:00hrs. La vivienda 2 por su parte reportó periodos de desocupación entre las 08:00hrs a 20:00hrs durante la semana, con periodos deshabitados de 10:00hrs a 20:00hrs en sábado. Por su parte la vivienda 3 reportó desocupada en los periodos de 8:30hr a 18:00hr, durante la semana. Los sábados reportó una desocupación de 10:00hr a 17:00hr. En ambos casos, los domingos fueron los días con menor desocupación: para el caso 1 fue de 09:00hrs a 18:00hrs, mientras que en la casa 2 fue de 12:00hrs a 15:00hrs y la casa tres indicó que de 13:00hr a 16:00hr no solían estar dentro del cuarto.

### 4.3 Primer periodo de monitoreo en recámara acondicionada: Febrero-Abril 2019

Como parte del periodo de evaluación preliminar se corrió una simulación con datos ambientales anuales en el software de cálculo con el fin de contrastarla con la información proporcionada por CONAGUA correspondiente a los años 2017 y 2018. Se puede observar en la figura 13 que el año 2017 registró temperaturas por arriba de la media generada por el archivo histórico, mientras que en el 2018 presenta un comportamiento más irregular y con temperaturas por debajo del 2017. Basado en esto se observó que tanto en las semanas del 7 al 27 de mayo, así como del 27 de

agosto al 16 de septiembre se observaron temperaturas más extremas, mismas que fueron usadas para la evaluación del patrón de comportamiento en las 3 variables analizadas.

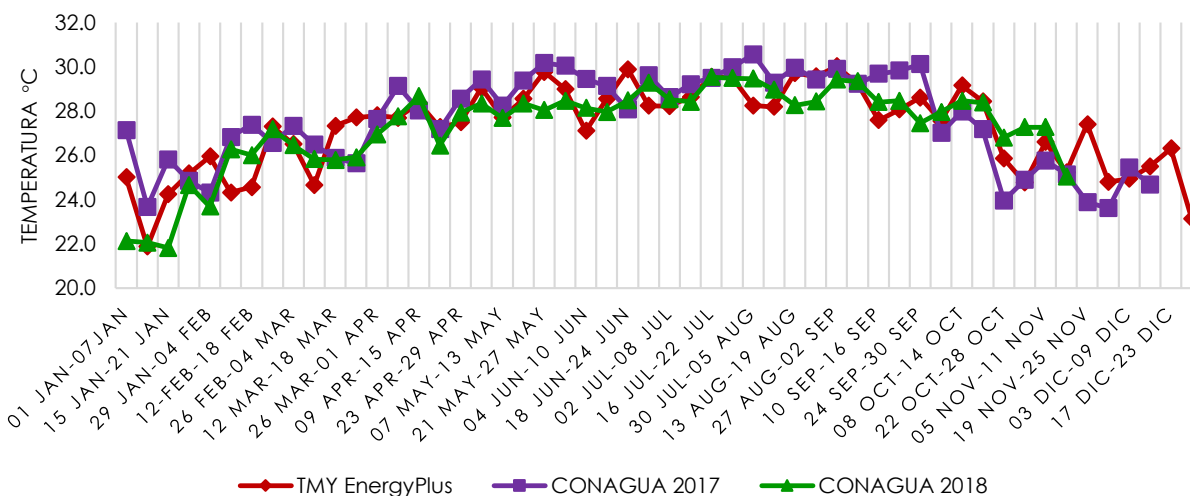


Figura 13. Comparación anual de las temperaturas promedio semanales según el archivo histórico y datos de CONAGUA

#### 4.3.1 Resultados ambientales en interior

Como parte de una evaluación preliminar se corrió una simulación del modelo teórico creado a partir de la descripción auditada y se evaluó contra los resultados de una primera campaña de monitoreo de temperatura interior en las recámaras de ambas viviendas: para el caso 1 fue del 9 de febrero al 30 de abril (1944h), en el caso 2 fue del 10 de febrero al 30 de abril (1920h), mientras que para la caso 3 fue del 10 de febrero al 9 de abril (1322h). En esta etapa, la evaluación de las simulaciones se realizó con el archivo meteorológico histórico de la ciudad obtenida mediante Meteonorm. En cuanto a la energía consumida de manera global por las casas, esta se obtuvo mediante la factura eléctrica expedida bimestralmente. Ya que el periodo de análisis cubrió dos bimestres, para obtener un consumo diario real fue necesario dividir el consumo total bimestral entre el número de días que comprendió el periodo.

Los resultados preliminares durante el estudio mensual arrojaron una diferencia en los promedios de temperatura simulados durante el primer nivel. Tomando en cuenta los criterios permisibles por la ASHRAE para el periodo mensual evaluando el NMBE y CVRMSE con rangos de <5% y <10%, respectivamente, se puede observar que únicamente el parámetro de humedad relativa en el caso 1 dentro del rango establecido. En la tabla 8 se encuentran representados por colores distintivos los resultados de la varianza: en azul se presentan aquellos que quedaron dentro del rango; en verde aquellos que se encuentran cerca del rango de índice comparativo y en rojo los que resultaron con gran diferencia de los rangos estadísticos. Por su parte, utilizando el archivo climático personalizado se puede observar que existe un acercamiento de las temperaturas promedio a las obtenidas de manera real: para el caso 1 fue de 1.34°C, para el caso 2 fue de 1.4 °C, mientras que el caso 3 fue de 0.77°C. En los valores negativos es posible apreciar una sobresimulación o tendencia a calcular valores más altos, mientras que los positivos indican una sub-simulación.

Cabe mencionar que los resultados de la primera entrevista fueron asumidos constantes durante el periodo de evaluación que comprende de febrero a abril, hecho por el cual se ingresa incertidumbre en la ocupación y operación de los aparatos.

Tabla 8. Resultados de la primera campaña de monitoreo contra dos niveles de simulación: con Archivo Meteorológico Histórico (AH) y el personalizado (AP).

	Recámara Casa 1			Recámara Casa 2			Recámara Casa 3		
	Real	SIM. AH	SIM. AP	Real	SIM. AH	SIM. AP	Real	SIM. AH	SIM. AP
<b>Promedio Temp. °C</b>	28.63	26.66	27.29	25.74	27.12	27.14	29.07	27.72	28.30
<b>Promedio H.R. %</b>	63.13	65.29	64.11	53.14	64.41	64.47	63.29	73.72	70.21
<b>NMBE RH%</b>		-3.43	-1.56		-21.20	-17.49		-19.65	-14.11
<b>CV RMSE RH %</b>		20.58	19.07		33.66	31.40		28.27	24.99
<b>NMBE TEMP%</b>		6.89	-3.86		-5.36	-7.79		3.07	1.09
<b>CV RMSE TEMP %</b>		10.85	9.17		10.48	11.73		6.60	5.55

Sin embargo las simulaciones con el AMP arrojaron datos más cercanos a los reales, por lo tanto, pese a no haber alcanzado un modelo de temperatura interior calibrado en los tres casos de estudio, se prosiguió con una campaña más restrictiva asumiendo que la incertidumbre por los parámetros ambientales ha sido reducida en gran medida y por lo tanto se prescinde del archivo TMY. Mientras tanto, la comparación grafica de la oscilación de temperatura y humedad en las recamaras se encuentra representada en la figura 14,15 y 16.

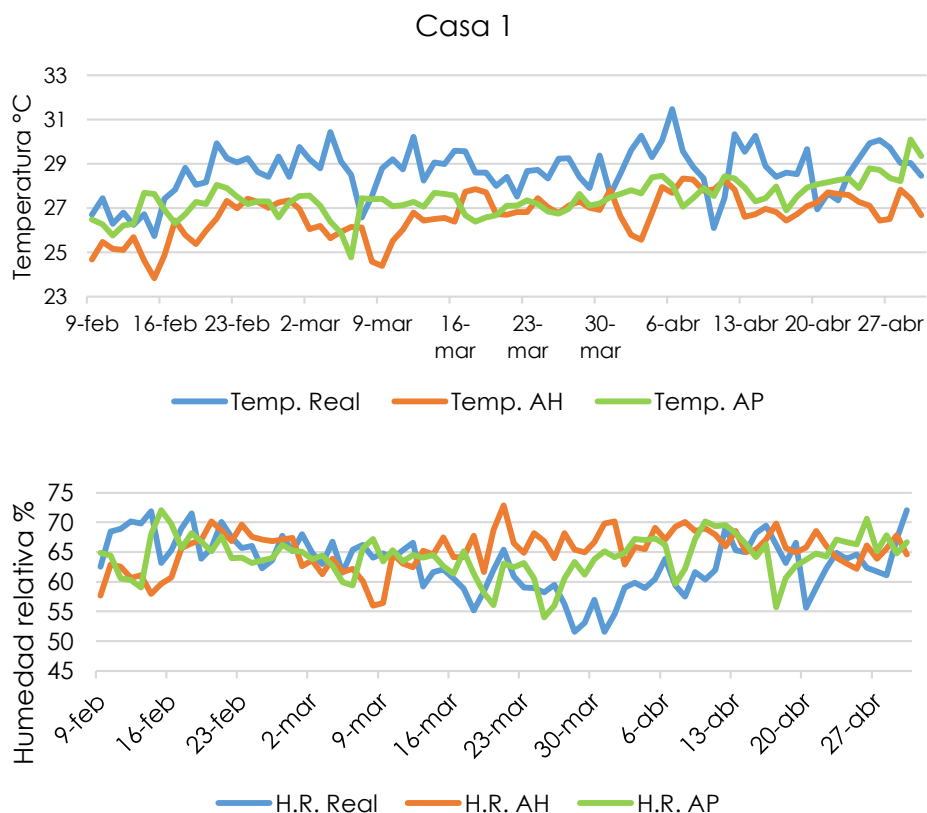


Figura 14. Comparación de parámetros interiores en Recámara de Casa 1

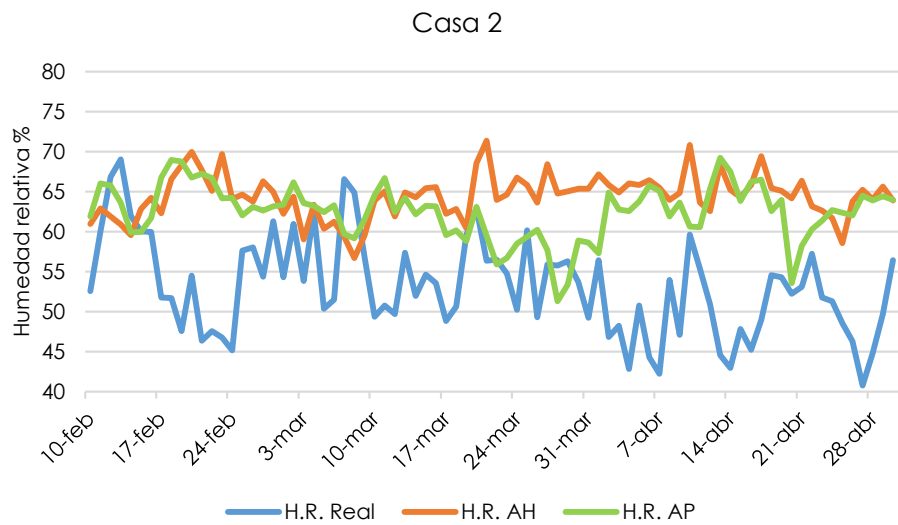
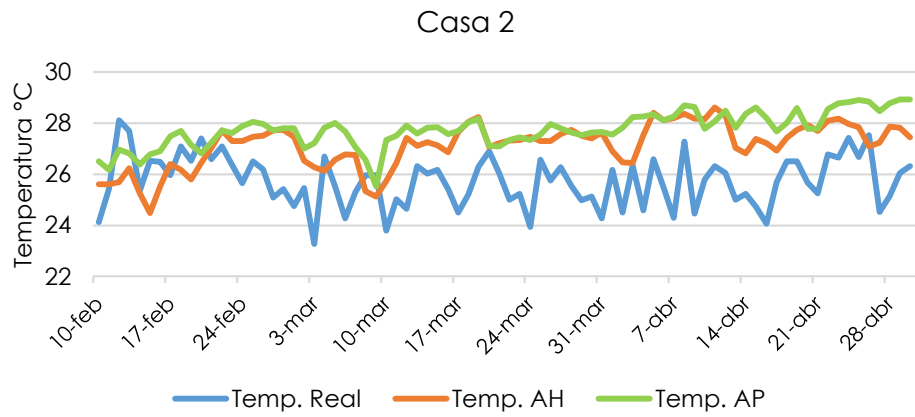
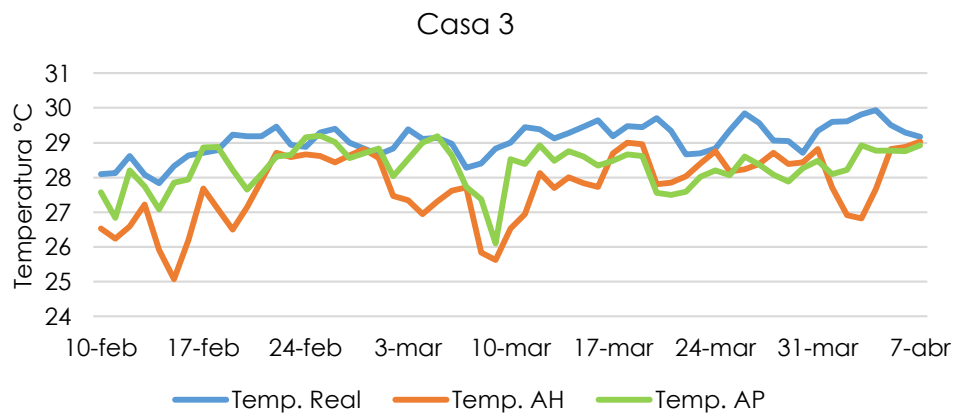


Figura 15. Comparación de parámetros interiores en Recámara de Casa 2



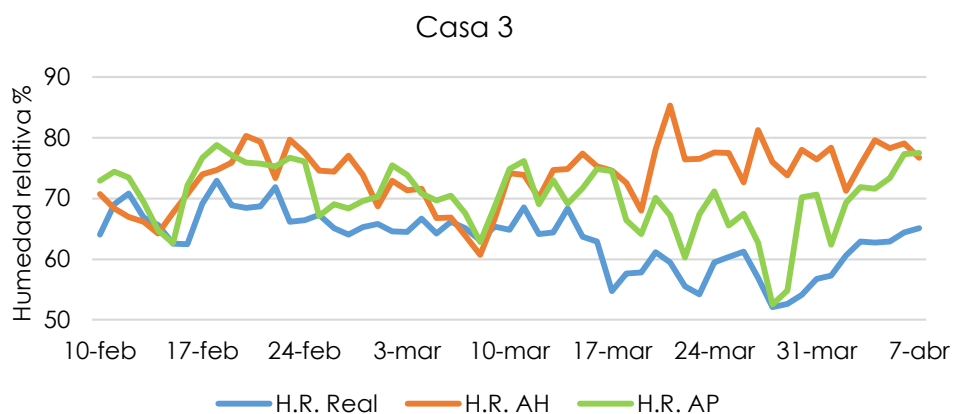


Figura 16. Comparación de parámetros interiores en Recámara Casa 3

Para el cálculo de consumo energético se tomó como referencia el recibo energético y se dividió entre los días analizados con la finalidad de obtener una media del consumo diario (ver tabla 9). De este cálculo se realizó la comparación contra los resultados simulados, la diferencia resultante se puede observar en la tabla 10 y en la figura 17, en donde a primera vista se puede apreciar un sobre cálculo en el consumo simulado y donde la vivienda 1 cuenta con el error porcentual de menor valor, mientras la vivienda 3 es la que obtuvo una diferencia casi tres veces el consumo real.

Tabla 9. Cálculo de la media de consumo energético con base en el consumo facturado por CFE.

	PERIODO DE FACTURA	CANTIDAD KWh	CONSUMO DIARIO PROMEDIO	CONSUMO EFECTIVO KWh	SUMA DE PERIODOS KWh
<b>CASA 1</b>	16-ene-18 mar	415	6.92	242.1	711.7
	18 mar-8 may	555	10.67	469.6	
<b>CASA 2</b>	16 ene-15 mar	156	2.6	122.2	202.6
	15 mar-17 may	134	2.23	80.4	
<b>CASA 3</b>	16-ene-18 mar	602	11.26	431.48	817.34
	18 mar-8 may	583	7.22	385.86	

Tabla 10. Comparación del error de consumo eléctrico en kWh entre lo simulado contra el real

	Consumo Factura CFE	Consumo Simulado	Error	ERROR %
<b>Casa 1</b>	711.70	754.39	-42.69	-6.00
<b>Casa 2</b>	202.60	541.41	-338.81	-167.23
<b>Casa 3</b>	817.34	946.88	-129.54	-15.85

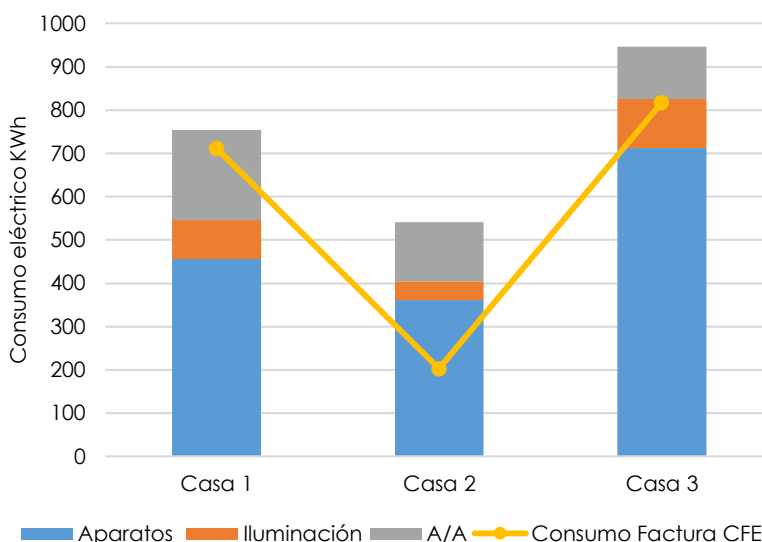


Figura 17. Comparación gráfica del consumo energético en los casos estudiados

Pese a la diferencia entre los datos simulados, se realizó el desglose de la demanda energética simulada con la finalidad de conocer el porcentaje que representa cada sistema eléctrico. El resultado fue que los aparatos representan más del 60% del total de la energía utilizado, destacando la vivienda 3 cuyo porcentaje de 75% se debe a un mayor número de personas con una utilización en conjunto de diferentes equipos (ver tabla 11). Por su parte, fue este caso de estudio el que presentó un porcentaje menor de utilización del aire acondicionado.

Tabla 11. Desglose porcentual del consumo total por sistema eléctrico

	Aparatos	Iluminación	A/A
<b>CASA 1</b>	60.527	11.92061	27.55239
<b>CASA 2</b>	66.75	7.88	25.38
<b>CASA 3</b>	75.19	11.96	12.86

#### 4.4 Segundo periodo de monitoreo a nivel multi-zona: semana representativa Mayo 2019

##### 4.4.1 Evaluación de microclima

En segunda etapa el modelo de simulación se realizó a nivel multi-zona durante una semana representativa solo en las viviendas 1 y 2, ya que en la vivienda 3 el monitoreo se interrumpió el 7 de abril, por cuestiones ajenas a esta investigación.

Previo registro de datos comparativos del microclima, se evaluó el grado de error producido por el protector solar del dispositivo HOBO en las mediciones ambientales exteriores durante una campaña de monitoreo de 12 días con registros sub-horarios. Tomando como referencia el estudio de Bernard et al. (2019), para el procesamiento de la información, los registros de la estación Davis fueron asumidos como reales para la identificación del error. En la evaluación de correlación se obtuvo un factor de 0.94 (ver figura 18), mientras que los resultados de la comparación de equipos se presenta en la tabla 12. Como se puede apreciar, la desviación absoluta representa un promedio de 0.71°C, sin embargo aquí la diferencia de valores se asume del error absoluto cuyo valor constante siempre es positivo. Sin embargo, el error máximo de temperatura obtenido en

valor negativo (-2.47°C) apunta a que el HOBO presenta una tendencia a mayores temperaturas, a diferencia de la humedad relativa, cuya diferencia indica que frente a la estación meteorológica, el HOBO puede llegar a registrar niveles de humedad ambiental inferiores. La diferencia entre estos valores puede bien deberse a las características de los protectores solares ya que el del HOBO es de polietileno de alta densidad, mientras que el protector de la estación de PVC.

Para entender mejor la varianza en los errores se calculó la desviación del error mediante la fórmula RMSE, cuyo valor medio fue de 0.87°C y 5.07% para los casos de temperatura del aire y humedad relativa, respectivamente. Además, durante la observación horaria se identificó que los periodos comprendidos entre las 10:00am a 6:00pm son aquellos donde se registra las diferencias más significativas. Por lo tanto, para el análisis ambiental de los casos de estudio se indujo la reducción del error (RMSE) a las mediciones adquiridas mediante el HOBO, únicamente en el horario crítico, con la finalidad de controlar la incertidumbre generada por el protector solar y que afecta los metadatos.

Tabla 12. Medición del error en los datos ambientales

	<b>Error Max.</b>	<b>MAD</b>	<b>RMSE</b>
<b>Temperatura °C</b>	-2.47	0.71	0.87
<b>Humedad relativa %</b>	12.70	4.32	5.07

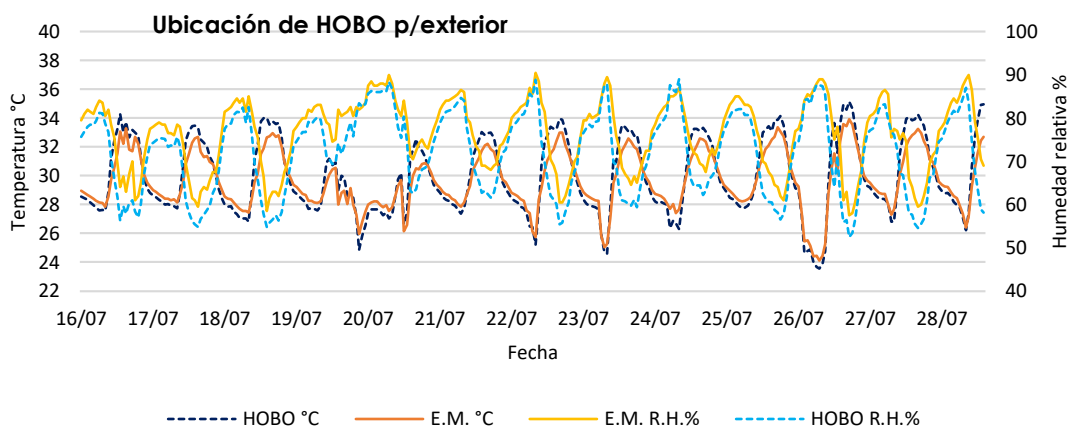
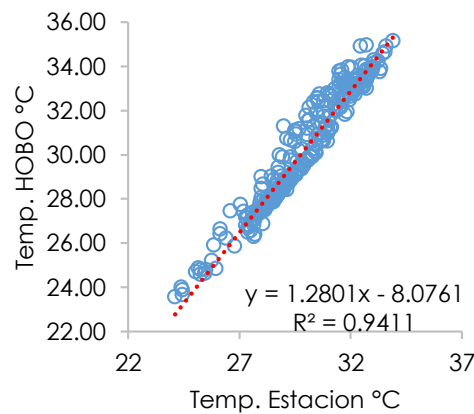


Figura 18. Evaluación de las mediciones registradas mediante HOBO y la estación Davis Vantage Pro



#### 4.4.1 Evaluación de temperatura en microclima

El registro de datos ambientales exteriores se realizó en periodos subhorarios y en su comparación diaria se induce el error previamente generado entre la estación y el adquisidor de datos. Los horarios en donde se registra el disparo en las oscilaciones ambientales se puede delimitar en el periodo que comprende desde las 9:00am hasta las 5:00pm o en algunos días extendiéndose hasta las 7:00pm (ver figura 19). Esto coincide con los periodos con mayor presencia de radiación solar, ya que se puede observar que durante los periodos nocturnos las oscilaciones tienen un comportamiento similar y en ocasiones la temperatura In Situ puede disminuir como se aprecia en las oscilaciones de los días analizados representados en las figuras 20 y 21.

Como se puede apreciar en la tabla 13 con el procesamiento de datos, el promedio global de ambos parámetros se presenta una variación periurbana de 0.32°C y 1.18°C para la temperatura promedio en los casos 1 y 2, respectivamente. Mientras que la humedad relativa del estudio periurbano en general presento valores inferiores que se traducen en 2.2% y 5.98%. No obstante, aun considerando el error que genera el protector solar del estudio en sitio (normalizado 0.87° C y 5.07%), las diferencias de temperatura en periodos horarias pueden alcanzar una diferencia de más de 7°C, como se registró para el caso 2.

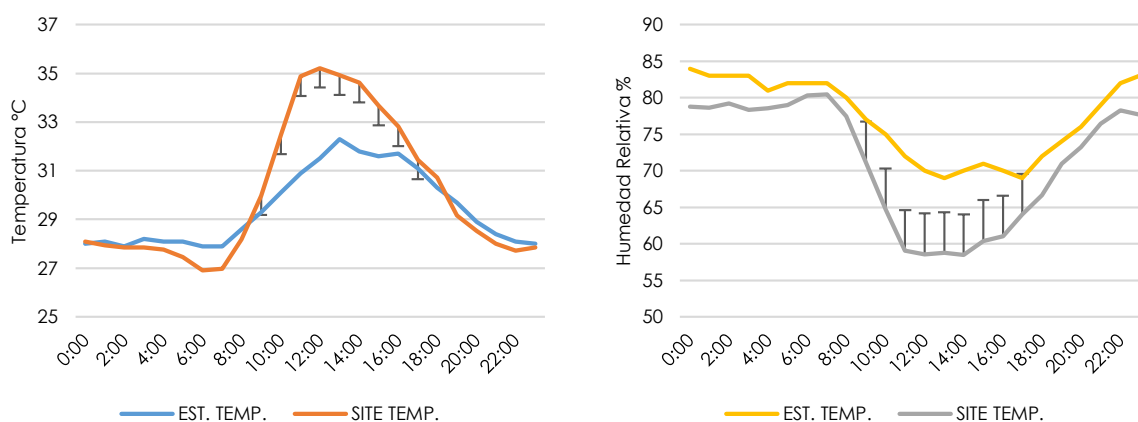


Figura 19. Representación del error en las mediciones registrado el día 10 de mayo en la vivienda 1

En cuanto a la humedad, la evaluación en los casos de estudio arrojó valores por debajo de los registrados en el entorno urbano, con diferencias de hasta 22%, valores que reflejan que las concentraciones de humedad son menores dentro del entorno en el que se encuentran los casos analizados.

Con esta sencilla evaluación de la temperatura del aire se puede comprobar que el fenómeno de las IUC se presenta en el fraccionamiento "Las Américas" y por lo tanto el archivo meteorológico con el que se correrán las iteraciones presentara un porcentaje de error.

Tabla 13. Análisis de parámetros ambientales In situ contra la estación meteorológica

		Temperatura				Humedad relativa			
		Min.	Max.	Error Max.	Promedio	Min.	Max.	Error Max.	Promedio
<b>Caso 1</b>	Urbano	27.40	32.30	-4.94	29.54	67.00	88.00	9.49	78.65
	Peri urbano	26.77	36.74			60.59	86.00		
<b>Caso 2</b>	Urbano	25.10	33.70	-7.57	29.55	50.00	92.00	22.78	73.98
	Peri urbano	25.31	39.87			42.47	85.10		

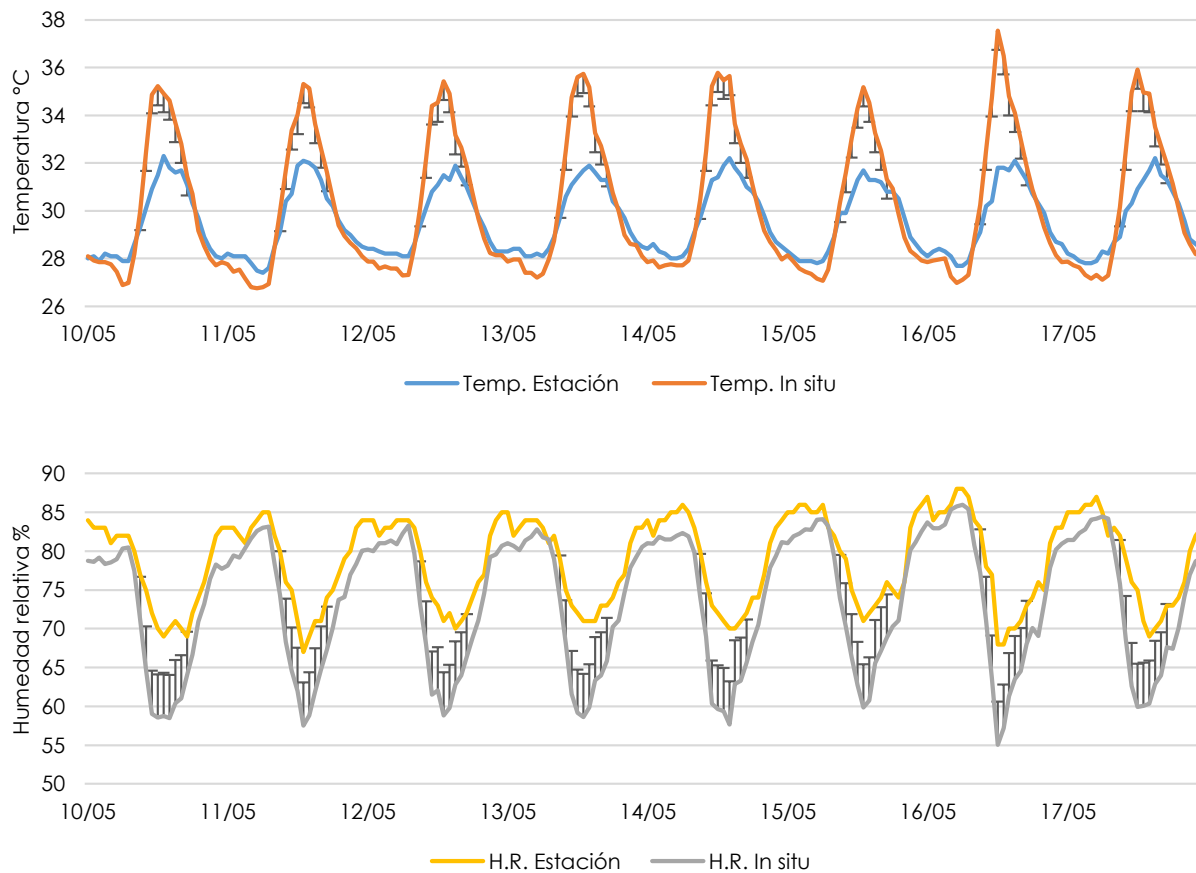


Figura 20. Comparación gráfica de parámetros ambientales de micro-clima y macro-clima para el Caso de estudio 1

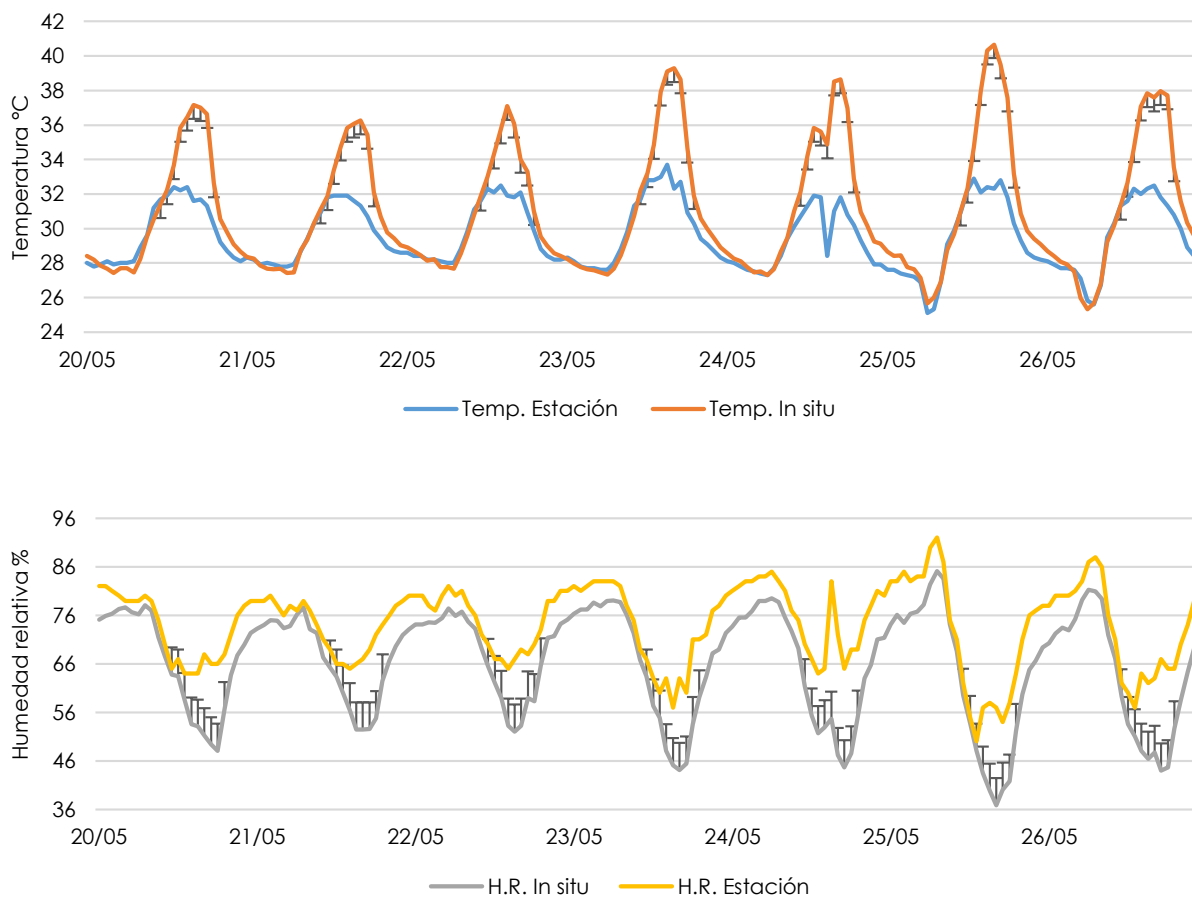


Figura 21. Comparación gráfica de parámetros ambientales de micro-clima y macro-clima para el Caso de estudio 1

## 4.5 Validación de modelos mediante iteraciones

### 4.5.1 Validación modelo Caso 1

Para lograr la calibración del modelo teórico, los datos corrieron a partir de una segunda corrida de simulaciones reemplazando el archivo meteorológico histórico por el correspondiente al actual archivo meteorológico. Por otro lado, se realizó una segunda entrevista con los usuarios para definir las actividades que realizaron día por día durante la campaña de monitoreo de la semana representativa. En este nivel los usuarios de la casa 1 reportaron que los periodos de ocupación fueron de dos horas más durante lunes y viernes con relación a la primera entrevista. Mientras que los sábados se ausentaban de casa durante el periodo de las 9:00am hasta las 20:00hrs, y los domingos reportaron una ausencia durante los horarios de 10:00hrs a 16:00hrs. De igual manera reportaron que el aire acondicionado lo apagaban en promedio a las 6:00am durante la semana, y a las 4:00am tanto en sábado como domingo, lo que se traduce en un total de 24hrs más de uso del sistema de aire acondicionado en referencia con la primera evaluación.

Cabe señalar que los promedios de humedad relativa que existen en interior fueron superiores al 60%. El factor principal que promueve este hecho es la falta de ventilación natural en los espacios impidiendo la renovación de aire. En el caso de la sala/comedor de la casa 1 fue el único espacio

reportado por mantener las ventanas abiertas y responder a un promedio de 2 ren/hr resultado de la iteración óptima

Tabla 14. Resultado de las iteraciones para validación en Casa 1

		Temperatura				Humedad relativa			
		R <sup>2</sup>	Media	NMBE%	CV(RMSE)%	R <sup>2</sup>	Media	NMBE%	CV(RMSE) %
<b>Recámara</b>	ITER. 1	0.25	26.11	16.03	18.17	0.41	60.85	7.26	13.25
	ITER. 2	0.37	28.29	7.10	16.72	0.68	66.52	-1.88	11.27
<b>Sala/comedor</b>	ITER. 1	0.67	28.41	12.57	12.97	0.36	74.86	-6.79	10.70
	ITER. 2	0.69	31.76	0.68	2.62	0.64	65.85	5.96	7.44

Como se puede apreciar en la figura 19 y 20, las regresiones apuntan a que si bien se obtuvo una mejora con los resultados de la primera iteración, para esta simulación ajustándolos valores de infiltración se obtiene un coeficiente que no es aceptado por los lineamientos oficiales. Sin embargo, para la zona de la sala-comedor (figura 20), misma que no cuenta esta acondicionada con equipo de enfriamiento, se aprecia una mayor

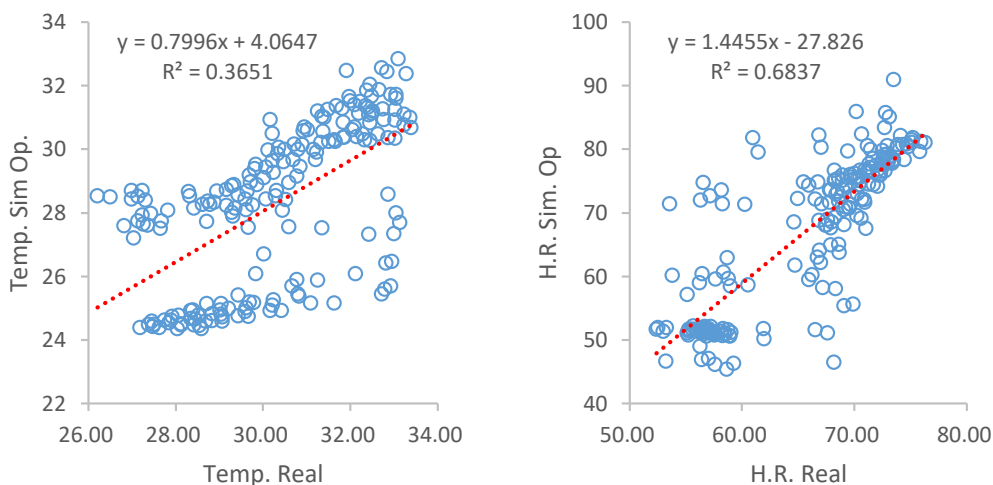


Figura 22 Regresión lineal de parámetros ambientales en recámara

En cuanto a la recámara de la vivienda 1, la temperatura de consigna de aire con la que se obtuvo mejor correlación fue la correspondiente a iteración con 20°C que resultó en un valor de 0.37, frente al 0.33 de una consigna de 18°C y de 0.28 para la de 22°C. Esta diferencia en parte se puede deber a la degradación del equipo de aire acondicionado debido a que cuenta con más de 4 años de operación (Eleftheriadis, 2018).

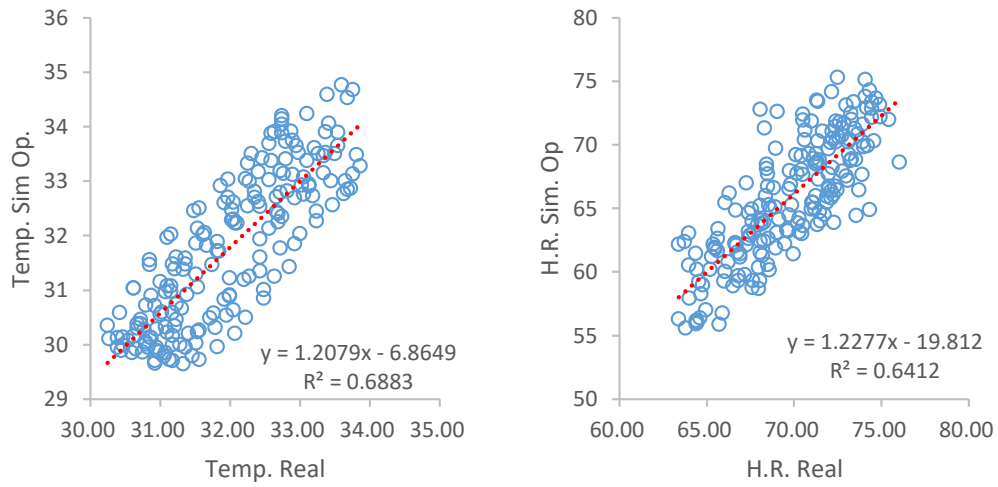


Figura 23. Parámetros ambientales en sala-comedor

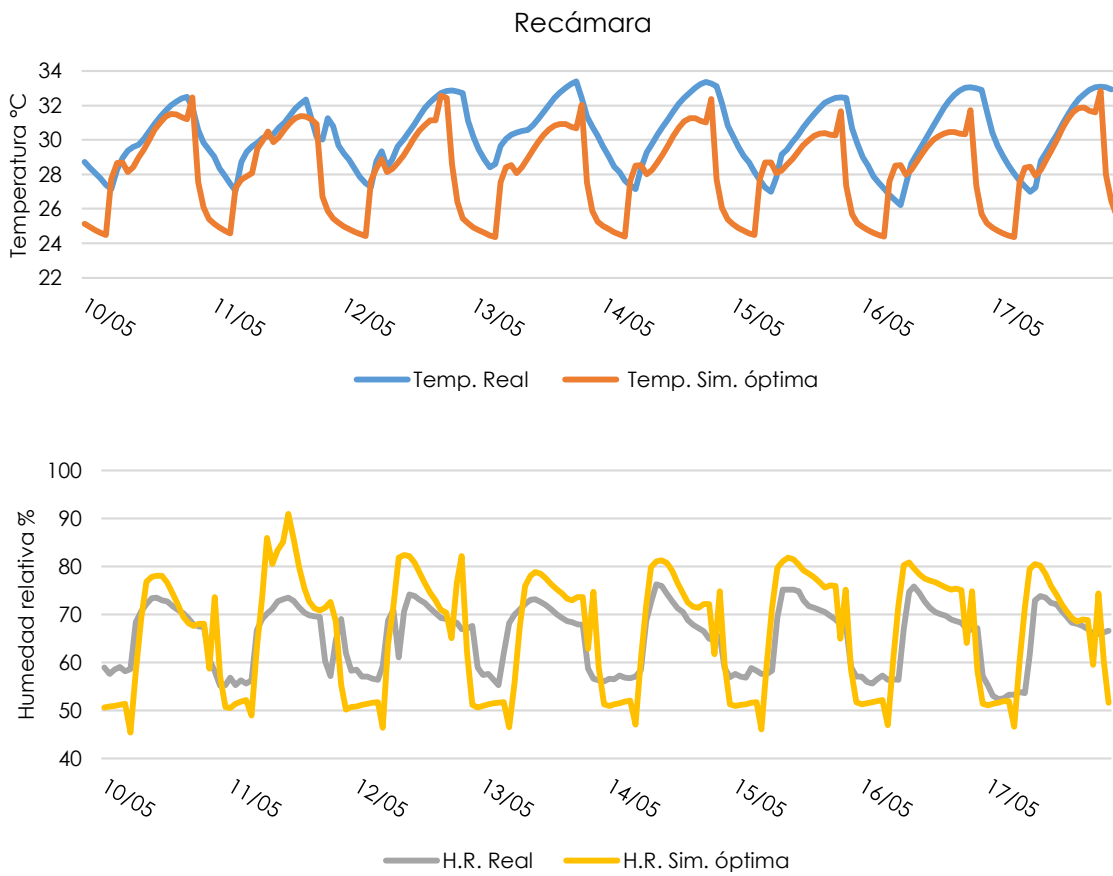


Figura 24. Comparación de variación de temperatura horaria real contra simulada en Recámara

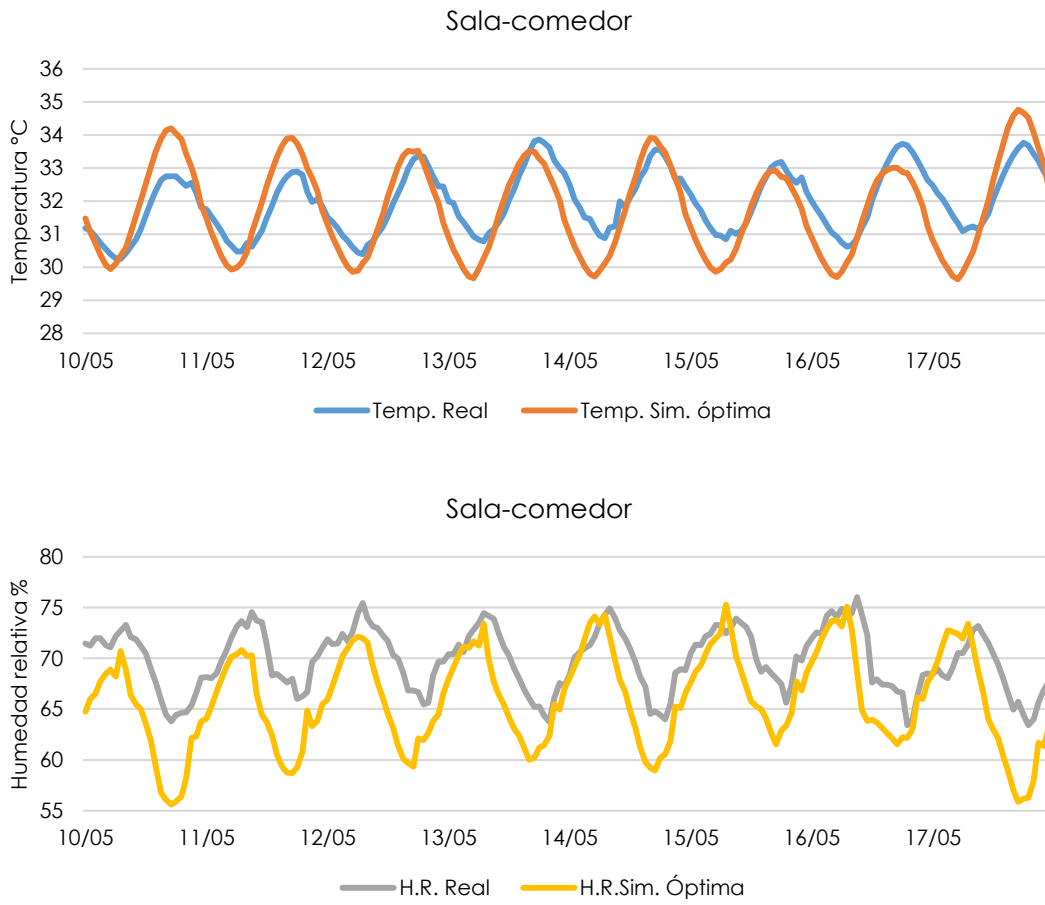


Figura 25. Comparación de oscilación horaria de parámetros reales contra simulados en Sala-comedor

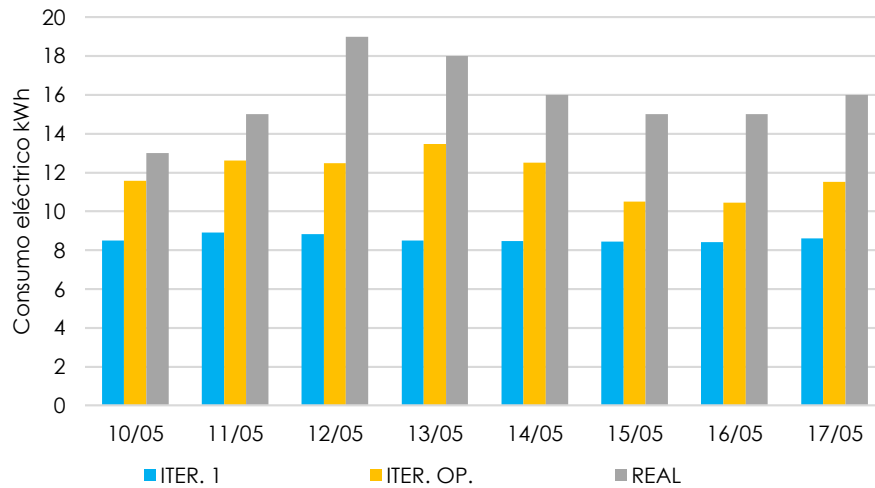


Figura 26. Comparación de demanda energética durante la semana representativa

4.5.2 Validación modelo Caso 2

Para el caso de la vivienda 2, la ocupación se mantuvo constante salvo el tiempo en funcionamiento del aire acondicionado que en total sumó 31hrs más a la semana en contraste con la primera evaluación realizada durante febrero. Además, la casa 2 reportó que redujo la temperatura de consigna del aire hasta los 16°C durante las primeras 3hrs de encendido, eventualmente regresando a la consigna de 23°C una vez el cuarto estuviera en una temperatura “agradable”. Uno de los parámetros de incertidumbre de mayor complejidad fue la infiltración. Los tres valores evaluados en el segundo nivel de iteraciones para cada espacio tomaron como referencia los rangos fijados por la ATTMA Technical Standard para determinar la permeabilidad de viviendas (association, 2010), expresados de manera aleatoria como 0.20m³/h.m²@Pa, 0.60m³/h.m²@Pa, 0.80m³/h.m²@Pa, para una estanqueidad óptima, media y pobre, respectivamente Las modificaciones de la infiltración derivaron en un impacto mínimo en la temperatura interior simulada, sin embargo los mayores cambios se presentaron durante el proceso de correlación, en donde la diferencia entre la humedad relativa simulada y la real llevo a presentar un error diferencial de hasta 33%. En los casos de humedad relativa se obtuvieron en todas las zonas analizadas valores de correlación linear positiva clasificada dentro del rango moderado a bueno (0.3-0.7) (Ratner, 2009) aún en la primera iteración que no contaba con la información más cercana al periodo de utilización correspondiente a esa semana, nótese los tres espacios sin aire acondicionado. Mientras que en el caso de la temperatura en interior, se observó que la correlación llegó a tener una dependencia débil (0-0.30) en la primera iteración.

Tabla 15. Comparación de iteraciones para validación en Casa 2

		Temperatura				Humedad relativa				
		R²	Media	NMBE%	CV(RMSE)%	R²	Media	NMBE%	CV(RMSE) %	
<b>Caso 2</b>	Recámara pral.	ITER. 1	0.09	29.35	-5.01	13.77	0.60	63.86	-29.58	38.51
		ITER. 2	0.38	28.09	-0.74	11.01	0.05	69.20	-35.01	40.49
	Comedor/cocina	ITER. 1	0.54	31.16	5.73	6.95	0.40	64.27	-9.55	14.72
		ITER. 2	0.61	32.94	0.02	3.42	0.43	70.58	-8.94	13.24
	Recámara/bodega	ITER. 1	0.47	30.27	7.92	8.70	0.43	73.14	-4.86	9.79
		ITER. 2	0.51	30.80	6.07	6.87	0.44	68.97	0.88	6.39

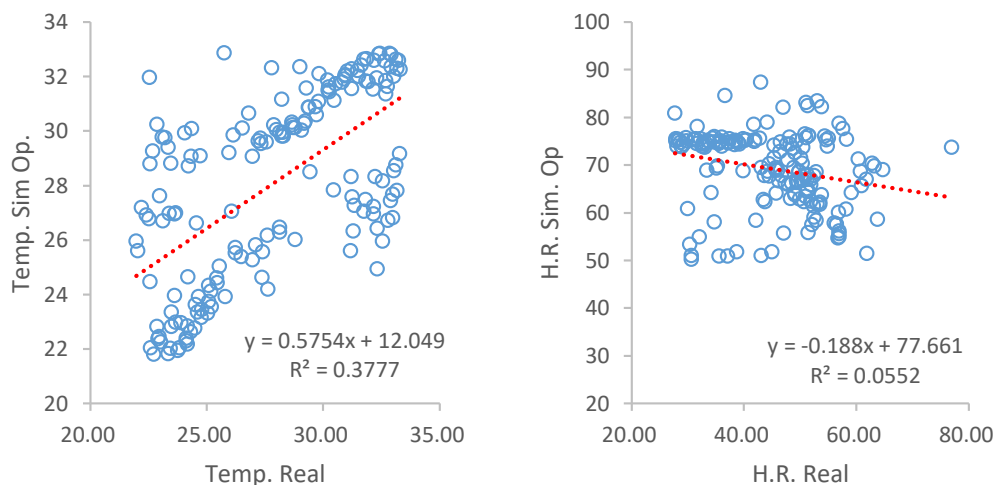


Figura 27. Regresión lineal: Recámara principal

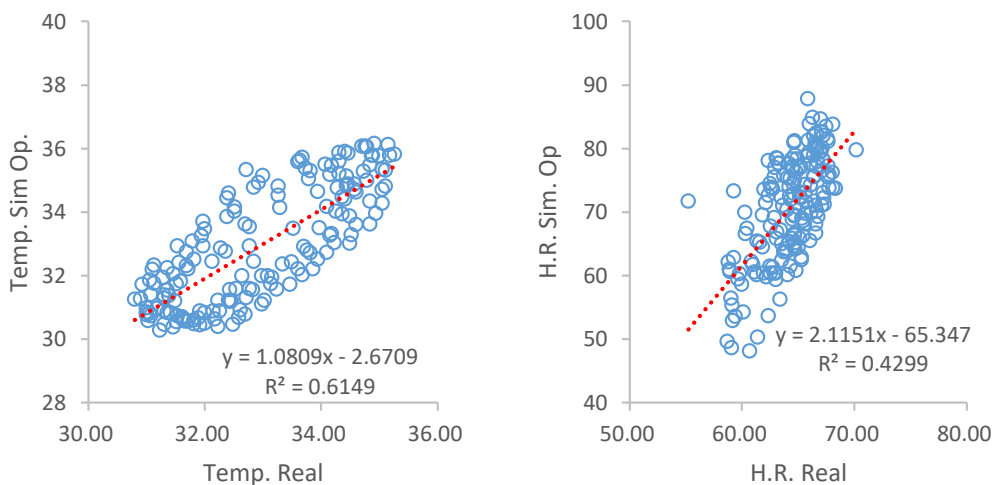


Figura 28. Regresión lineal: Comedor-cocina

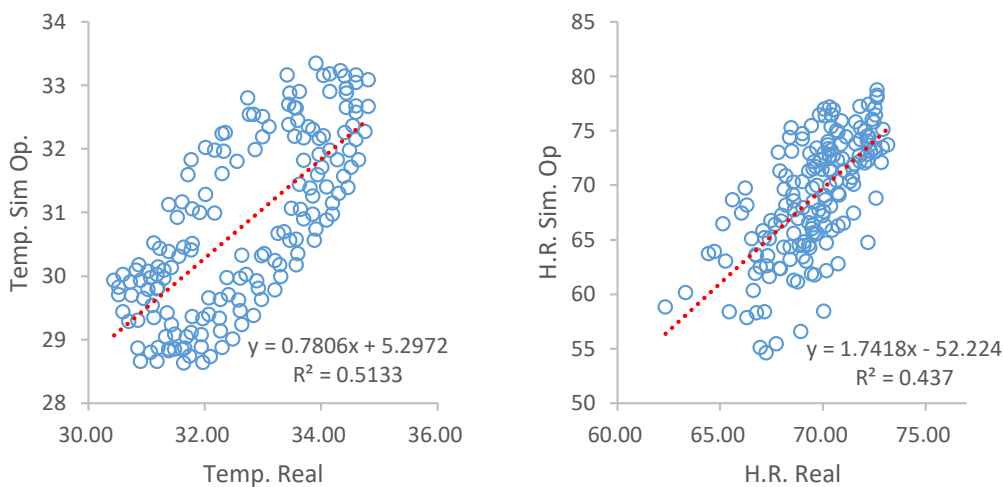


Figura 29. Regresión lineal: Recámara/bodega

En el caso de la bodega de la casa 2, el ajuste de la temperatura de mejora fue tan solo del 1.83%. Sin embargo, observando sus fluctuaciones de temperatura en las gráficas se aprecia que EnergyPlus presenta una tendencia a sub predecir la temperatura al no estar en contacto con cargas internas; ya sean de los usuarios o de aparatos eléctricos en funcionamiento.

Mientras que en la vivienda 2, los usuarios señalaron en la entrevista que durante la semana las consignas que utilizaron fueron de 16° y 23°. Los resultados de las consignas 16°, 18°, 21° y 23° arrojaron una correlación de 0.38, 0.36, 0.31 y 0.23 respectivamente. No obstante la complejidad de evaluar las consignas de aire con consignas secundarias, se decidió conservar la de 16° que conserva una relación moderada.

En el caso de la brecha de error tan significativa en los casos analizados, esta se puede asumir a tres factores principales: el primero es algún problema físico en la instalación eléctrica de la casa, también puede deberse al fenómeno denominado oscilación de armónica de frecuencia, debido a la planta de abastecimiento y circuitos usados en la instalación de red del



fraccionamiento, y por último, a una incertidumbre significativa en el reporte de uso de los equipos eléctricos, es decir, que hubieran existido mayores demandas.

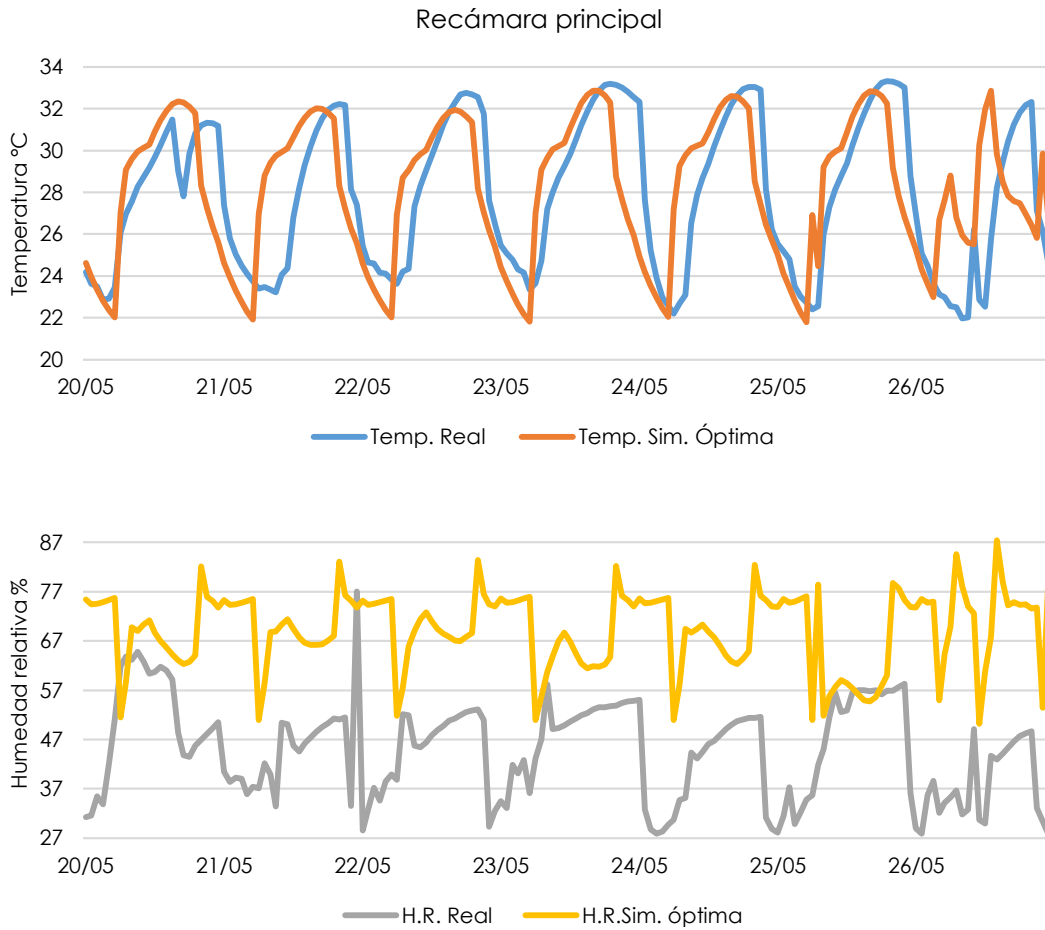
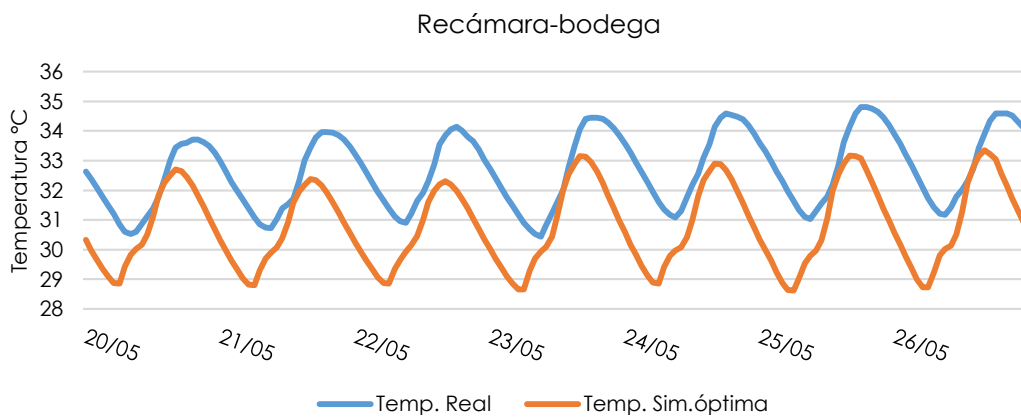


Figura 30. Comparación de parámetros interiores en Recámara principal



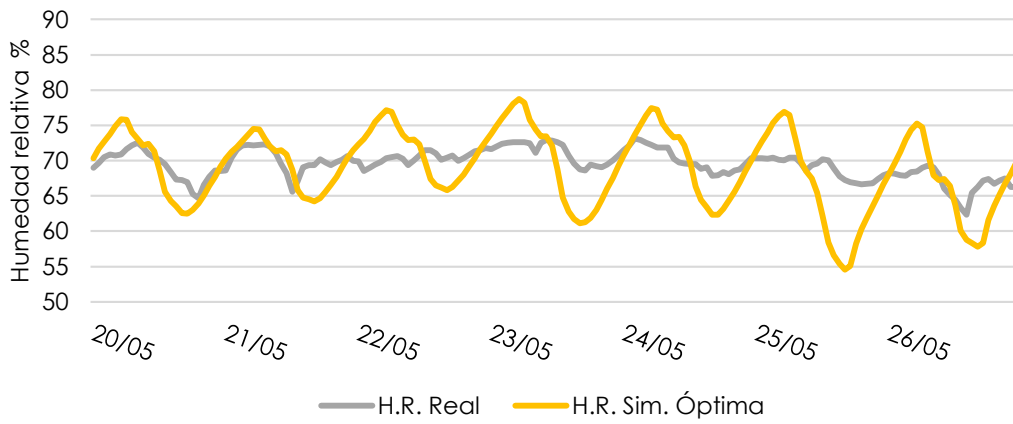


Figura 31. Comparación de parámetros interiores en Recámara-bodega

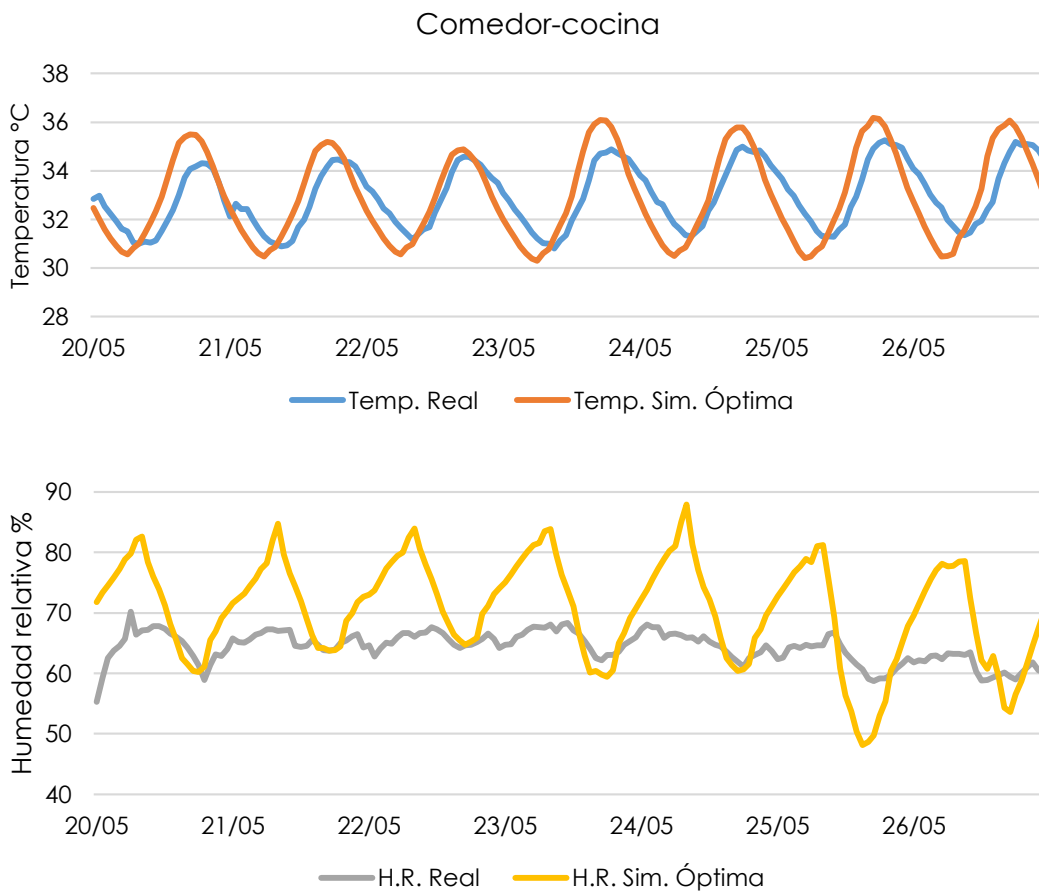


Figura 32. Comparación de parámetros interiores en Comedor-cocina

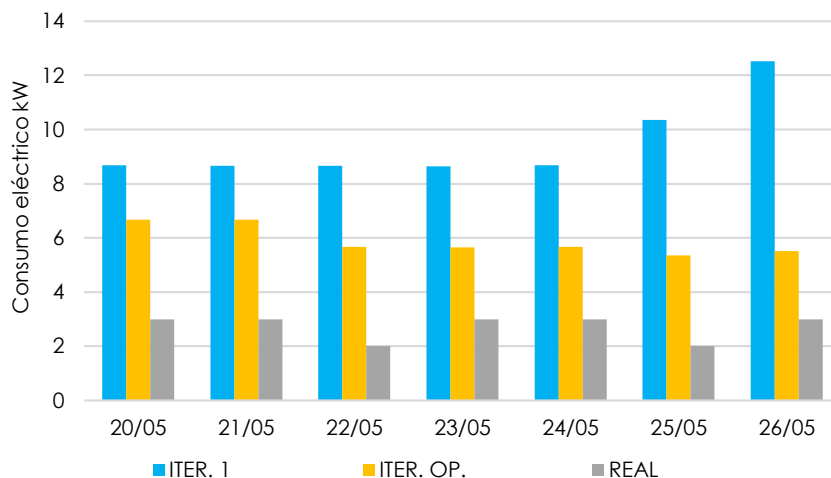


Figura 33. Comparación de demanda energética durante la semana de evaluación

#### 4.5.3 Ganancias de calor en ambos casos

En cuanto a las ganancias térmicas, es posible apreciar en la figura 34 que la vivienda 1 presenta la mayor cantidad de generación de calor pese a contar con 7.05 m<sup>2</sup> menos de superficie y orientación de fachada inversa a la de la vivienda 2. Sin embargo, apreciando cada uno de los componentes representados en la tabla se puede observar que el soleamiento en azotea es muy similar, mientras que la casa 1 presenta una mayor ganancia de calor en los muros.

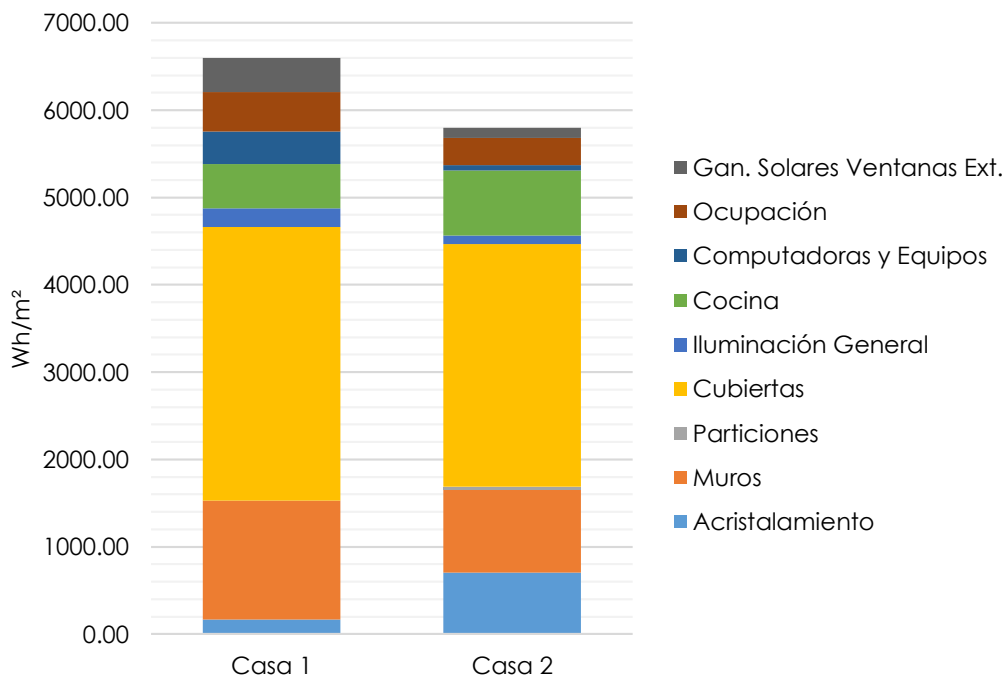


Figura 34. Comparación de ganancias térmicas en ambos casos de estudio

Pese a que ambas viviendas se encuentran configuradas por vidrios con capacidades absorbentes, la utilización de elementos que generan sombra en el caso de la vivienda 1, probó reducir los niveles de ganancia térmica en elementos como ventanas. Por su parte, las ganancias generadas en el interior resultaron representar el 20.17% 19.36% para los casos de la vivienda 1 y 2 respectivamente, con lo cual se puede asumir que en promedio, el 80% de las ganancias de calor de las viviendas en las zonas tropicales provienen de la envolvente térmica.

Tabla 16. Representación porcentual comparativa de las ganancias térmicas

	<b>Casa 1</b>	<b>Casa 2</b>	
	Ganancia (Wh/m <sup>2</sup> )	6600.49	5797.97
<b>Ganancias superficiales</b>	Muros %	20.67	16.37
	Particiones %	0.00	0.55
	Cubiertas %	47.49	47.99
	Gan. Solares Ventanas Ext. %	8.48	14.12
	Iluminación %	3.18	1.62
	Cocina %	7.68	12.86
<b>Ganancias Internas</b>	Computadoras y Equipos %	5.67	1.03
	Ocupación %	6.82	5.47
	TOTAL %	100	100

## **CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES**

## 5.1 Conclusiones

Con el desarrollo de este proyecto fue posible validar los modelos de los casos estudiados bajo parámetros ambientales interiores tales como la temperatura y humedad relativa, reduciendo la incertidumbre en tres de los factores clave en la modelación identificados previamente por varios autores (Shi, Si, Zhao, Tian, & Jin, 2018; ASHRAE Inc., 2002; Hwa Cho, 2019): descripción detallada de operación y uso de equipos y datos ambientales. No obstante, no fue posible alcanzar los mismos resultados en el desempeño energético ya que tanto en la casa 1 la simulación arrojó una diferencia final de 33% en el consumo eléctrico semanal, mientras que la vivienda 2 resultó con una sobre simulación del 117%.

Como síntesis a lo presentado anteriormente se puede concluir que:

- En la vivienda, las simulaciones por largos periodos de tiempo no son viables debido a las variables involucradas en la propagación de incertidumbre en los datos de entrada previamente mencionados, este fue el principal inconveniente en la primera campaña de evaluación durante los meses de febrero y abril. Por lo que evaluaciones durante periodos cortos que permitan normalizar una rutina de uso resultan favorables en el género de edificios habitacional.
- El estudio socio- económico no formó parte de este trabajo pero se puede apreciar la diferencia que existe entre el número de habitantes con la cantidad de horas de uso de equipo de refrigeración. Mientras que la vivienda 1 y 2 reportaron mayores horas de uso, la vivienda 3 mantuvo en promedio la mitad de horas de uso del dispositivo, contrario al uso de los misceláneo que resulto mayor en más del 20% en contraste con las primeras 2 casas. Por lo que se puede inferir la fuerte dependencia de la relación entre costo-consumo ya que la diferencia de demanda total también difiere en los tres casos.
- Se comprobó que el contexto urbano de las viviendas presenta los efectos de las islas urbanas de calor con un impacto que puede superar los 5°C de temperatura con respecto a las registradas en la zona urbana (ITCH). Esta diferencia posiblemente se deba al mayor porcentaje reflejante como el área de pavimento con respecto a las áreas verdes, así como la poca presencia de vegetación como árboles. Sin embargo, se recomienda mayor rigor en la evaluación de este fenómeno, así como las implicaciones de los porcentajes superficiales de albedo.
- En la evaluación multi-zona de cada modelo, el espacio de mayor complejidad fueron aquellos que contaban con aire acondicionado, debido a las variaciones en las consignas de temperatura ajustadas de manera manual por los usuarios.
- Como parte del proceso de validación por medio de iteraciones, se observó que las implicaciones de modificar los niveles de infiltración no genera un impacto directo en la temperatura (1.2% en el mayor de los casos), sin embargo si afecta las concentraciones de humedad relativa en el interior, llegando hasta una influencia de 23%. Por lo que se puede plantear hipotéticamente que la hermeticidad en la vivienda no promueve la mejora en el confort térmico.

## 5.2 Recomendaciones

El proyecto se realizó con un análisis cuantitativo perteneciente a la clasificación de generación de metadatos y una validación primitiva manual mediante el proceso de alteración de un parámetro a la vez, sin embargo trabajos recientes en el campo de la modelación incluyen el apoyo de la programación para correr simulaciones paramétricas mediante el uso de factores de distribución de probabilidad en los parámetros de incertidumbre. Mediante este proceso, en el que se incluye el análisis de incertidumbre y sensibilidad, es posible lograr una validación aún más precisa, sobre todo para identificar un mayor número de parámetros de entrada que generan una mayor influencia en los resultados de salida de interés: consumo energético, temperatura interior o emisiones de CO<sub>2</sub>.

Para el desarrollo de futuros trabajos se recomienda estudiar el impacto de las infiltraciones en los edificios, a partir de un estudio que permita caracterizar los valores de hermeticidad en las viviendas pues, tal como varios autores indican es uno de los parámetros de mayor incertidumbre en el análisis de desempeño de edificios.

Para el registro de consumo energético se recomienda una mayor descripción apoyada de equipos que permitan medir la potencia real consumida durante los picos horarios de mayor y menor demanda predefinidos por una entrevista previa de la rutina de los usuarios. Esto permitiría reducir la incertidumbre generada por la operación e identificar si existen factores externos a la vivienda o problemas en la instalación eléctrica que arrojen error.

También, partiendo esta validación ambiental en la vivienda aislada, sería conveniente realizar modelos comparativos en viviendas con otra configuración de envolvente térmica, tales como madera o tipo bungalow, para la evaluación evaluar la facilidad de alcanzar niveles de confort. Otra propuesta es la ampliación de este proyecto que no pudo ser desarrollada, y que consiste en la valoración de mejora del modelo calibrado mediante varias alternativas de modificación en las propiedades de la envolvente.

Otra recomendación es trasladar la investigación a la vivienda residencial y edificios público, en el que se consideren nuevos estilos formales y tecnologías que incorporan materiales como el acero: evaluando sus ganancias de calor e impacto en la temperatura interior.

Como última recomendación, un punto interesante sería trasladar este proceso a edificios que cuentan con certificaciones bajo estándares de eficiencia energética para evaluar el desempeño simulado que se proyectó durante la etapa de diseño contra el comportamiento durante la etapa de operación, también denominada de post-ocupación.

## REFERENCIAS

- A. Raja, I., J. Fergus, N., J. McCartney, K., & A. Humphreys, M. (2001). Thermal comfort: use of controls in naturally ventilated buildings. *Energy and buildings*, 235-244.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers. (2009). *ASHRAE Handbook Fundamentals SI*. Atlanta, GA, USA: ASHRAE.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc. (2002). *ASHRAE Guideline 14-2002: Measurement of Energy and Demand Savings*. Atlanta.
- ASHRAE. (2017). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal environmental conditions for human occupancy*. Atlanta: ASHRAE.
- ASHRAE Inc. (2002). *ASHRAE Guideline 14-2002: Measurement of Energy and Demand Savings*. Atlanta: ASHRAE.
- association, A. T. (2010). *ATTMA Technical standards L1 Measuring air permeability of building envelopes (dwellings)*. British Institute of non-destructive testing.
- Bahanerein Mohd Noor, K. (2008). Case study: a strategic research methodology. *American Journal of Applied Sciences*, 1602-1604.
- C. Borbón, A., E. Cabanillas, R., & B. Pérez, J. (2010). Modelación y simulación de la transferencia de calor en muros de bloque de concreto hueco. *Información tecnológica*, 27-38.
- California Energy Commission. (2000). *Guide to preparing feasibility studies for energy efficiency projects*. California: California Energy Commission CEC.
- Canadian wood council. (2004). Energy and the environment in residential construction. *Sustainable building series, N°1*, 1-16.
- Cárdenas, J., Osma, G., Merchán, A., & Ordoñez, G. (2016). Characterization of Environmental and Energy Performance of an Average Social Dwelling in a Tropical Region of Colombia. *Sustainable City*.
- Cerón-Palma, I., Sanyé Mengual, E., Oliver Solá, J., Montero, J. I., & Ponce Caballero, C. &. (2013). Towards a green sustainable strategy for social neighbourhoods in Latin America: Case from social housing in Merida, Yucatan, Mexico. *Habitat international*(38), 47-56.
- Climático, I. N. (2016). *Evolución del comportamiento de las concentraciones de contaminantes atmosféricos en un sitio en Salamanca, Guanajuato*. Ciudad de México: INECC. Obtenido de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/250911/ReporteSalamancaAO\\_lab\\_movil.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/250911/ReporteSalamancaAO_lab_movil.pdf)
- Coakley, D., Raftery, P., & Keane, M. (2014). A Review of Methods to Match Building Energy Simulation Models to Measured Data. *Renewable and Suitable Energy Reviews*, 37, 123-141.
- Crawley, D., Hand, J. W., Kummert, M., & Griffith, B. T. (2008). Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs. *Building and Environment*, 43, 661-673.
- Eguía Oller, P., Alonso Rodríguez, J. M., Saavedra González, Á., Arce Fariña, E., & Granada Álvarez, E. (2018). Improving the Calibration of Building Simulation with Interpolated Weather Datasets. *Renewable Energy*, 122, 608-618.
- Eisenhower, B., O'Neil, Z., & Mezie, I. (2012). Uncertainty and sensibility decomposition of building energy models. *Journal Of Building Performance Simulation*, 171-184.



- Eleftheriadis, G. &. (2018). The impact of insulation and HVAC degradation on overall building energy performance: a case study. *Buildings*, 8(23), 1-11.
- EnergyPlus. (2015). *Engineering reference The reference to EnergyPls calculations*. Retrieved April 20, 2019, from [energyplus.net/sites/default/files/pdfs\\_v8.3.0/EngineeringReference.pdf](http://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/EngineeringReference.pdf)
- Enriquez, R., & Jiménez, M. J. (2017). Towards non-intrusive thermal load monitoring of buildings: BES calibration. *Applied energy*(191), 44-54.
- G. Patterson, M. (1996). What is energy efficiency? *Energy Policy*, 377-390.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación Köppen*. Cd. de México: UNAM.
- García, Y., Cuadrado, J., & M. Blanco, J. &. (2018). Optimizing the indoor thermal behaviour of housing units in hot humid climates: Analysis and modelling of sustainable constructive alternatives. *Indoor and built environment*, 1-19.
- GIZ/INFONAVIT. (2011). *Study of optimization of energy efficiency in low-income housing*. INFONAVIT.
- Gobierno de México. (11 de Diciembre de 2016). *Gobierno de México*. Obtenido de [gob.mx: http://www.gob.mx/semarnat/articulos/protocolo-de-kioto-cambio-climatico?idiom=es](http://www.gob.mx/semarnat/articulos/protocolo-de-kioto-cambio-climatico?idiom=es)
- Gregorio Atem, C. (2012). *La influencia de distintos muros exteriores en el confort térmico de viviendas en un clima subtropical húmedo*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Griego, D., Krarti, M., & Hernandez-Guerrero, A. (2012). Optimization of energy efficiency and thermal confort measures for residential buildings in Salamanca, México. *Energy and buildings*, 54, 540-549.
- Guillermo Aguilar, A. &. (2011). Informal settlements' needs and environmental conservation in Mexico city: an unsolved challenge land use-policy. *Land use policy*, 4(28), 649-662.
- Guitierrez González, V., Alvarez Comendares, L., López Fidalgo, J. F., & Ramos Ruiz, G. &. (2019). Uncertainty's indices assessment for calibrated energy models. *Energies*, 1-18.
- H. Ayuntamiento de Othon P. Blanco, Q. R. (2018). *Programa de Desarrollo Urbano del Municipio de Othon P. Blanco, Quintana Roo*. Chetumal.
- Hwa Cho, K. &. (2019). Energy performance assesment acording to data acquisition levels of existing buildings. *Energies*, 12(1149), 1-17.
- INEGI. (2015). *Encuesta Intercensal 2015*. Mexico: INEGI.
- INEGI. (2017). *Anuario Estadístico y Geográfico de Quintana Roo 2017*. México: INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). *Encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares 2018*. México: INEGI.
- Instituto nacional de geografía y estadística. (26 de marzo de 2019). *INEGI*. Obtenido de [inegi.org.mx: https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/pxweb/inicio.html?rxid=2a7423ff-cf36-4e8f-8cec-f04faba3b2a3&db=Hogares&px=Hogares\\_04](https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/pxweb/inicio.html?rxid=2a7423ff-cf36-4e8f-8cec-f04faba3b2a3&db=Hogares&px=Hogares_04)
- Jakeman, A., & Letcher, R. &. (2006). Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. *Environmental Modelling & Software*, 602-614.
- Martínez-Montejo, S. A.-P. (2016). The impact of energy efficiency standards on residential electricity consumption in Mexico. *Energy for sustainable development*(32), 50-61.

Materials and environment. (2013). En M. F. Ashby, *Chapter 11- Sustainability: living within our means* (págs. 319-347). Elsevier.

Mendoza García, G. (2018). *Caracterización físico-mecánica y térmica de materiales tradicionales y alternativos para la envolvente de una edificación*. Chetumal: ITCH.

Miño Rodríguez, I., & Naranjo Mendoza, C. &. (2016). Thermal assesment of low-cost rural housing- a case of study in the Ecuadorian Andes. *Buildings*, 6(36).

Mustafaraj, G., Marini, D., Costa, A., & Keane, M. (2014). Model Calibration for Building Energy Efficiency Simulation. *Applied Energy*, 130, 72-85.

OECD. (2015). *OECD Urban Policy Reviews: Mexico 2015 transforming urban policy and housing finance*. París: OECD Publishing.

Ordoñez García, A. (2014). *Manual de ayuda DesignBuilder en español*. DesignBuilder Ltd.

Paliouras, P., Matzaflaras, N., & Peuhkuri, R. &. (2015). Using indoor environment parameters for calibration of building simulation model - a passive house case study. *Energy Procedia*(78), 1227-1232.

Partida Bush, V. (2008). *Proyecciones de los hogares y las viviendas de México y de las entidades federativas, 2005-2050*. México: Comisión nacional de población.

Pérez, J., E. Cabanillas, R., F. Hinojosa, J., & C. Borbón, A. (2011). Estudio numérico de la resistencia térmica en muros de bloques de concreto hueco con aislamiento térmico. *Información tecnológica*, 27-38.

Ramos Ruíz, G., & Fernández Bandera, C. (2017). Validation of calibrated energy models: common errors. *Energies*(Open access), 1-19.

Ratner, B. (2009). The correlation coefficient: its values range between +1/-1, or do they? *Journal of targeting, measurement and analysis for marketing*, 17(2), 139-142.

Roberti, F., Filippi Oberegger, U., & Gasparella, A. (2015). Calibrating historic building energy models to hourly indoor air and surface temperaures: methodology and case study. *Energy and buildings*(108), 236-243.

Rosas-Flores, J. A., Rosas-Flores, D., & Morillón Gálvez, D. (2011). Saturation, Energy Consumption, CO2 Emission and Energy Efficiency from Urban and Rural Households Appliances in Mexico. *Energy and Buildings*, 43, 10-18.

Royapoor, M., & Roskilly, T. (2015). Building Model Calibration Using Energy and Enviromental Data. *Energy and Buildings*(94), 109-120.

Sanchez Zapata, I. A., Vega Azamar, R. E., Cruz Argüello, J. C., Ávila López, A., & Chan Juárez, M. &. (2018). Desempeño ambiental de diferentes tipos de vivienda en Chetumal. *Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Chetumal 2018* (págs. 2929-2934). Chetumal, Quintana Roo: Academia Journals.

Santoyo-Castelazo, E., Guijba, H., & Azapagic, A. (2011). Life cycle assesment of electricity generation in Mexico. *Energy*(36), 1488-1499.

Secretaría de Gobernación. (2014, Abril 30). *Diario Oficial de la Federación*. Retrieved from [www.dof.gob.mx](http://www.dof.gob.mx):

[http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5342865&fecha=30/04/2014](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5342865&fecha=30/04/2014)

SENER. (2015). *Norma Oficial Mexicana NOM-026-ENER-2015, Eficiencia energética en acondicionadores de aire tipo dividido con flujo de refrigerante variabl, descarga libre y sin conductos de aire. Límites, métodos de prueba y etiquetado*. México: SENER.

SENER. (2017). <http://sie.energia.gob.mx>. Retrieved 03 15, 2019, from <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas>

Sharma, A., Saxena, A. S., Shree, V., & Varun. (2011). Life Cycle Assessment of Buildings: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(15), 871-875.

Shi, X., Si, B., Zhao, J., Tian, Z. W., & Jin, X. &. (2018). Magnitude, causes, and solutions of the performance gap of buildings: a review. *Sustainability*, 11(937), 1-21.

Sistema nacional de información e indicadores de vivienda. (26 de marzo de 2019). SEDATU, CONAVI. Obtenido de [sniiv.conavi.gob.mx](http://sniiv.conavi.gob.mx): [http://sniiv.conavi.gob.mx/Reports/Conapo/Proy\\_Hog.aspx](http://sniiv.conavi.gob.mx/Reports/Conapo/Proy_Hog.aspx)

Taha, H., Akbari, H., Rosenfeld, A., & Huang, J. (1988). Residential cooling loads and the urban heat Island- the effects of albedo. *Buildings and enviroment*, 24(4), 271-283.

Tisov, A., Siroky, J., & Kolarik, J. (2016). Key figures for joint assesment of indoor enviromental quality (IEQ) and energy consumption in modern buildings- a literature review. *Proceedings of the 12th REHVA World Congress*. Aalborg, Denmark.

Zhao, H.-x., & Magoules, F. (2012). A review on the prediction of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 3586-3592.








Article

## Indoor Temperature Validation of Low-Income Detached Dwellings under Tropical Weather Conditions

R. Alexis Barrientos-González<sup>1</sup>, Ricardo E. Vega-Azamar<sup>1,\*</sup> , Julio C. Cruz-Argüello<sup>1</sup>, Norma A. Oropeza-García<sup>2</sup>, Maritza Chan-Juárez<sup>1</sup> and Danna L. Trejo-Arroyo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México/I.T. Chetumal. Insurgentes 330, Chetumal 77013, Mexico

<sup>2</sup> División de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Quintana Roo. Boulevard Bahía s/n esq. I. Comonfort, Chetumal 77019, Mexico

<sup>3</sup> CONACYT-Tecnológico Nacional de México/I.T. Chetumal. Insurgentes 330, Chetumal 77013, Mexico

\* Correspondence: revega@itchetumal.edu.mx; Tel.: +52-983-832-1019 (ext. 147)

Received: 6 July 2019; Accepted: 23 July 2019; Published: 2 August 2019



**Abstract:** Urban territorial expansion generated in the last decades has brought a series of consequences, such as the variation between urban and suburban weather conditions affecting indoor temperature and increasing electricity consumption derived from the use of cooling systems. Current approaches of simulation models in residential buildings use indoor environmental data for carrying out validations to propose hygrothermal comfort alternatives for the mitigation of the effects of the external environmental conditions on the interior spaces of dwellings. In this work, an hourly evaluation of both indoor and outdoor environmental parameters of two case studies in a tropical climate was carried out, by means of a whole-building simulation approach tool during a week representative of the warmest period of the year. The integration of the collected environmental data in the theoretical model allowed us to reduce the error range of the estimated indoor temperature with results in normalized mean bias error between 7.10% and −0.74% and in coefficient of variation of the root mean square error between 16.72% and 2.62%, in the different indoor zones of the case studies. At the same time, the energy assessment showed a difference of 33% in Case 1 and −217% in Case 2 for final electricity consumption.

**Keywords:** indoor temperature; simulation model; performance gap; low-income detached dwelling; tropical weather; urban heat island

### 1. Introduction

Between 1995 and 2015, private housing in Mexico registered a growth of 39.2% [1], mainly due to policies promoting the acquisition of private housing through labor and social credit systems [2], while detached dwellings represent 84% of total social housing in cities with a population greater than 100,000 inhabitants [3]. Low-income housing development has led to urban problems, such as territorial expansion towards the peripheries, infrastructure deficiency [4], greater mobility rates, increased electricity consumption and modification of the urban microenvironment. Although the latter may be attributed to global warming to a greater extent, it has been recorded that temperature variations within urban settlements can reach an additional 4 °C between urban and rural and peri-urban areas; this phenomenon has been widely studied under the name of urban heat islands (UHIs) [5] which derives from being detrimental for outdoor comfort and building energy impacts [6]. In addition, massive construction of housing in countries like Mexico is characterized by the indiscriminate repetition of design patterns throughout the territory, regardless of the conditions of each climate zone, with warm regions being the most affected by higher energy consumption derived from the conditioning of

indoor spaces by cooling equipment, which represents 19.6% of the energy used [7]. Mexico’s National Meteorological Service points out that the country is composed of four main climatic regions: arid, dry tropic, temperate and humid tropic; where both the arid and the humid tropic present the highest percentages of air-conditioning equipment use for housing with 51.9% and 21.2%, respectively [8]. For its part, the National Housing Commission has implemented recommendations included in the National Appropriate Mitigation Actions (NAMA) for Sustainable Housing [9], mainly focused on energy efficiency as the optimization parameter; however, indoor temperature is also one of the most important indicators to understand a house’s thermal performance, which takes into account the influence of the external environment, the internal loads and the dwellers, allowing the study of hygrothermal comfort and optimization measures to counteract radiation and heat conduction effects on the building envelope, and the calculation of the cooling systems capacity. Table 1 shows the main acronyms used throughout the work.

**Table 1.** Nomenclature.

UHI	Urban Heat Island
NAMA	National Appropriate Mitigation Actions
EER	Energy Efficiency Ratio
NMBE	Nominal Mean Bias Error
CV(RMSE)	Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
U-value	Thermal Transmittance

Building simulation models are tools used to evaluate overall performance, whose use at the initial design stage is focused primarily on evaluating the lowest final consumption: electricity, gas and water [10]. In recent years, indoor temperature has been considered an evaluation parameter in law-driven simulation models and, as it occurs with energy models, they present a documented gap error when compared to real performance during the post-occupation period [11,12] due to several factors, mostly identifying as key parameters the temperature variation in the region and the occupants’ behavior at the dwelling operation stage. This has led to the adoption of a validation approach of simulation models whose main objective is the reproduction of the overall performance of the building to evaluate its evolution throughout its life cycle or to compare the outcomes that would be obtained by different constructive alternatives.

Therefore, in order to compare improvement proposals for thermal performance in low-income housing under tropical weather conditions, the main objective of this research was to assess the magnitude of the influence of microenvironment conditions for the creation of a theoretical model that keeps a real approximation of the thermal performance at the dwelling multi-zone level of two occupied detached social houses through a whole building simulation approach, validated at an hourly basis for indoor temperature. The present study is divided into three parts: the first part presents a brief review of the literature on model validation with environmental data, a second part describes the methodological process, as well as the tools and equipment used for data collection, and the third part presents the results of the monitoring campaign processed data and the discussion of the results.

**2. Literature Review**

A large number of studies have been conducted through the validated simulation approach focusing, primarily, on a detailed record of energy consumption data including those from heating, cooling and other internal loads, and taking into account indoor temperature monitoring as the “final tune” parameter [13,14]. On the one hand, UHIs have been identified as a mayor phenomenon affecting urban areas, in which air temperature variation is the most relevant factor affecting both thermal comfort and building energy use [15], where decrease of precipitation and a large number of days without rain tend to intensify temperature rising in tropical weather cities [16].

On the other hand, Tisov et al. refer to indoor air quality evaluation, in which temperature and relative humidity play a central role, as barely studied due to the amount of data required and the process for the analysis [10]. Although there is no specific standard procedure or guidelines to validate indoor temperature, several authors have chosen to take the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) guidelines 14-2002 as a reference for energy consumption criteria to perform environmental assessments [17].

As a general criterion to reduce the gap in model simulation, several authors recommend the incorporation of environmental data from the specific study site by installing a weather station, in order to create an actual meteorological year file or a customized weather file [12]. In cases where this is not possible, other authors propose to start from historical meteorological files to predict the increase in temperature or obtain reliable data by interpolating with data from nearby stations [18]. For the case of housing, it has been documented that models validated through environmental data gathered on site have been executed with good results, without limiting its application to just one single type of climate. In Denmark, Paliouras et al. carried out a theoretical model calibration of a house under passive ventilation and heating standards in a post-occupancy period, recording hourly data in a 30-day period in each zone of the dwelling [19]. The study took the minimum and maximum average of daily temperature of each studied zone which was contrasted against the simulated averages. For the calibration of the model, six iterations were carried out manually, modifying input parameters obtained from detailed interviews regarding the operational activities during the monitoring campaign. On the other hand, in Bolzano Italy, an energy validation of a 13th-century dwelling was conducted, incorporating input data obtained from the study site, such as real envelope conductivity, air permeability and external environment [20]. By performing the calibration processes for different seasons, a root means square error (RMSE) of 0.96 K was achieved in the initial model, while in the first calibration, these authors reached 0.66 K and 0.62 K for summer and winter data accuracy, respectively. In America, Osma-Pinto carried out a housing model validation in Bucarama, Colombia, taking as reference the indoor temperature registered in different spaces of an unoccupied house in periods with and without natural ventilation in each zone in order to identify the closest one to the actual registered data. It turned out that the closest benchmark occurred when considering natural ventilation (windows and doors open) with a mean square error temperature value of 0.21 °C, while for no ventilation conditions, a maximum difference of 0.82 °C was obtained for the bedroom. Then, this information was used to evaluate the best orientation scenario [21]. In Ecuador [22], Miño and Naranjo conducted a comparative evaluation between two rural dwellings with different envelope materials such as walls and slabs. In addition to the comparison between outdoor temperature impact to that recorded indoors, the model's accuracy was evaluated with hourly data from the monitoring at two levels of evaluation; in a last level the correlation error was reduced by iterations varying the levels of infiltration, identifying the correlation between observed and predicted data as 0.89 for compressed earth block and 0.94 for hollow concrete block, with a RMSE close to 1.1 °C in both studied dwellings. On the other hand, in the Dominican Republic the validation of a dwelling model during the warmest week in June was conducted through the use of indoor environmental sensors, including wall temperature, in order to evaluate different improvement alternatives such as orientation, eave lengths and roof isolation alternatives to improve of thermal comfort [23].

### 3. Methodology

The procedure chosen to carry out the model validation was based on the Hwa Cho and Sook Kim methodology [24] simplified in Figure 1. The process started with dwelling selection to continue with a detailed description through an audit evaluation that allowed the creation of the theoretical model (TM). Environmental data (temperature and relative humidity) were recorded in sub-hourly periods by data-acquisition devices in each of the houses different zones, which was the actual performance (AP). Then, all records were compared with the TM output data taking into account the operating temperature, because that includes both air temperature and radiant temperature of the walls. The

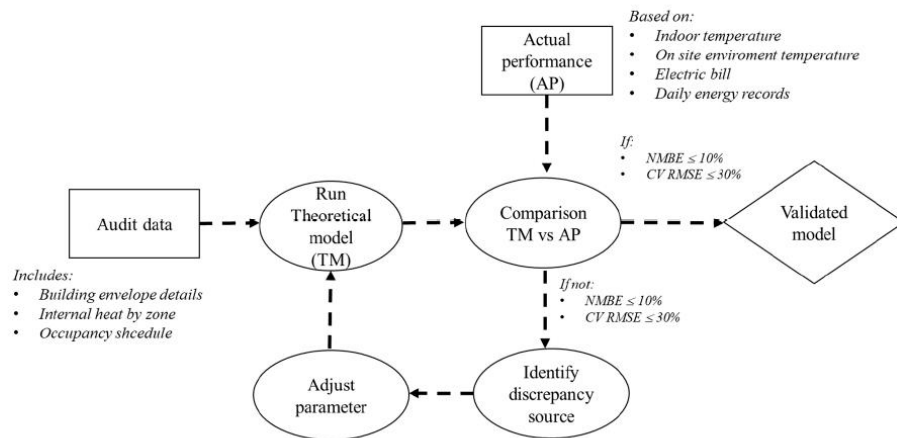


calibration process consisted in the integration of the environmental data through a customized meteorological file and the running of several iterations until achieving the compliance range of the ASHRAE 14–2002, which, based on the statistical analysis, recommends a nominal mean bias error (NMBE)  $\leq 10\%$  and a coefficient of variation of the root mean square error (CV RMSE)  $\leq 30\%$ . The formulas of both indices are expressed in Equations (1) and (2):

$$NMBE\% = \frac{1}{m_{av}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n ((m_i - s_i))}{n} \times 100 \tag{1}$$

$$CV(RMSE)\% = \frac{1}{m_{av}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{n}} \times 100 \tag{2}$$

where,  $n$  is the amount of data in hours;  $m_{av}$  is the mean of the actual recorded data;  $m_i$  is the actual data and  $s_i$  is the simulated data [25].



**Figure 1.** Framework of model validation (based on Hwa Cho and Sook Kim evaluation and American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) 14–2002 whole building calibrated approach).

3.1. Case Studies

The selected case studies were two dwellings in the city of Chetumal, located south of the Mexican Caribbean state of Quintana Roo, under the coordinates 18°28' to 18°34' North latitude and 88°14' to 88°29' West longitude, with an average elevation of 9 m.a.s.l. [26]. According to its geographical location, the Köppen classification groups the region within the sub-humid warm zone [27], having an average annual temperature of 26.7 °C [28]. Moreover, the selected dwellings are situated Northeast of the city in a high-density area. Table 2 condenses the characteristics of each case study, while Figure 2 shows the studied dwellings with the spaces comprising them.

**Table 2.** Design properties of each case of study.

	Case 1	Case 2
<b>Orientation</b>	Northeast	Southwest
<b>Total Ocupancy</b>	2	2
<b>Area (m<sup>2</sup>)</b>	35.45	42.5
<b>Zones</b>	Living room/dinner	Kitchen/dinner

Table 2. Cont.

	Case 1	Case 2
<b>Air conditioning Capacity kW</b>	Kitchen Bathroom Bedroom 1.85	Bathroom Bedroom(storage) Main bedroom 1.30
<b>Energy efficiency ratio</b>	4.10	3.52



Figure 2. Case study #1 (left) and case study #2 (right).

Given that both cases have two occupants, the average metabolic factor used was 0.90 [29]. In both cases, the dwellings have an air-conditioning system (mini-split type) with the same cooling capacity; however, for Case 1, it was assigned a power of 1.85 kW since the equipment has been in use for more than five years [30]. Regarding the envelope thermal values, these were identified by the visit to the site, assuming constant thermal properties, as represented in Table 3. With reference to the internal loads, these were calculated by the absolute demand per area proportion, which for Case 1 was 145 W and 310 W in the room and the kitchen/dining room and in the main chamber, respectively, while in Case 2, they were 165 W and 450 W [31]. Also, for the kitchen, the latent fraction was 0.30 for both cases. As for the occupation activities, this was the result of interviews to the occupants and a simplified scheme was made, due to the detailed description. Therefore, at a first stage, dwelling 1 reported unoccupied periods during the week (Monday to Friday) from 8:30 am to 7:00 pm, on Saturdays, it was reported an unoccupied period from 12:00 pm to 9:00 pm. On the other hand, dwelling 2 reported unoccupied periods between 8:00 am to 8:00 pm on weekdays, with unoccupied periods from 10:00 am to 8:00 pm on Saturday. In both cases, Sundays were the days with the maximum occupation period: for Case 1, they reported and absence from 9:00 am to 6:00 pm, while in Case 2, from 12:00 pm to

3:00 pm. In terms of air-conditioning (heating, ventilation, and air conditioning, HVAC), the period of utilization was defined with a total of 44 hours of operation for Case 1, while Case 2 reported a total of 41 hours. Furthermore, for Case 1, the living room/dining room window reported opened 24 hours a day during the 7 days of the week, contrary to Case 2, which reported not opening the windows, not even during the occupation period.

**Table 3.** Thermal envelope characteristics of each case studies.

Envelope element	Characteristics	U-value (W/m <sup>2</sup> K)	Case 1	Case 2
Floor	100 mm concrete slab	4.73	YES	YES
External/Internal walls	15mm exterior mortar, 150 mm concrete hollow block, 15 mm interior mortar	2.66	YES	YES
Roof	30mm concrete slab, 150 mm joist and concrete hollow brick, 15 mm interior mortar	3.377	YES	YES
Glazing	Absorbent green 6 mm	5.808	YES	NO
	Absorbent grey 6 mm	5.812	NO	YES
Window awning	1.5 mm galvanized steel sheet	8.33	YES	NO

### 3.2. Equipment and Data Recording

The geometric model configuration was made with DesignBuilder™ software integrated with the EnergyPlus™ calculation engine, developed for the U.S. Energy Department, which has become one of the most reliable tools for estimating indoor temperature, energy use and environmental performance.

For the registration of indoor environmental data, HOBO Onset MX1101 sensors were used. For the placement of the devices, the recommendations of ASHRAE 55-2017 were taken as reference [32], except for the common areas, where these were placed 80cm below the roof level, while in the particular areas it was decided to place them on the partitions, away from direct solar radiation and air-conditioning equipment outputs. All this, in order to not obstruct the occupants activities and avoid damage to the sensors [33]. Two reference monitoring campaigns were performed. First, outdoor environmental parameters were monitored by using a HOBO MX2300 data logger, to obtain both relative humidity and temperature, which are a set of parameters for the microenvironment assessment. The logger was placed inside a high-density polyethylene (HDPE) sunscreen, and located on the dwellings roof during the evaluation week. At the same time, as a part of the macro-environment campaign assessment, records were taken from the meteorological station Davis Vantage Pro installed at the Technologic Institute of Chetumal, which is located 4.5 km from dwellings. The records from campaigns, both the sensor and the meteorological station, were made at intervals of 15 min that were then averaged to obtain the hourly measurement. In addition, the integration of these data allowed the creation of a customized meteorological file, integrated by the temperature, relative humidity, global horizontal radiation, dew point, wind speed and wind direction data recorded by the station.

## 4. Results and Discussion

### 4.1. First Evaluation

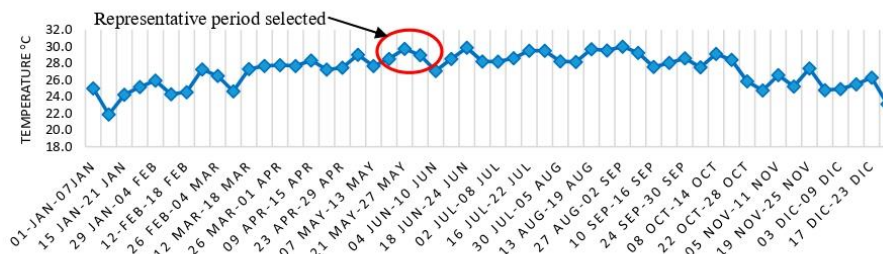
As a part of a preliminary evaluation, a simulation of the TM, created from the audit description, was run and evaluated against the results of a first indoor temperature monitoring campaign in the bedrooms of both dwellings: for Case 1, the campaign lasted from 9 February to 30 April 2019 (a total of 1944 hours) and for Case 2, it lasted from 10 February to 30 April 2019 (1920 hours). At this stage, the evaluation of the simulations was carried out with the city's historical meteorological file obtained through Meteororm. As for the overall energy consumed in both houses, this was obtained by the electric bill issued bimonthly. Since the analysis period did not match with the bill period and the

study was conducted during three months, it was necessary to calculate daily consumption through the daily average of energy consumption. Based on that, the first simulation period led to the results presented in Table 4.

**Table 4.** Preliminary analysis run simulation in both bedrooms from February to April, 2019, expressed as actual data (A) and simulated data (S).

	TEMPERATURE				RELATIVE HUMIDITY				ENERGY CONSUMPTION kW		
	Mean A. °C	Mean S. °C	NMBE%	CV RMSE%	Mean A. %	Mean S. %	NMBE%	CV RMSE%	AP	TM	% ERROR
Case 1	28.63	26.66	6.89	10.85	63.13	65.29	-3.43	20.58	711.70	754.39	-5.99
Case 2	25.74	27.12	-5.36	10.48	53.14	64.41	-21.20	33.66	202.60	541.41	-167.18

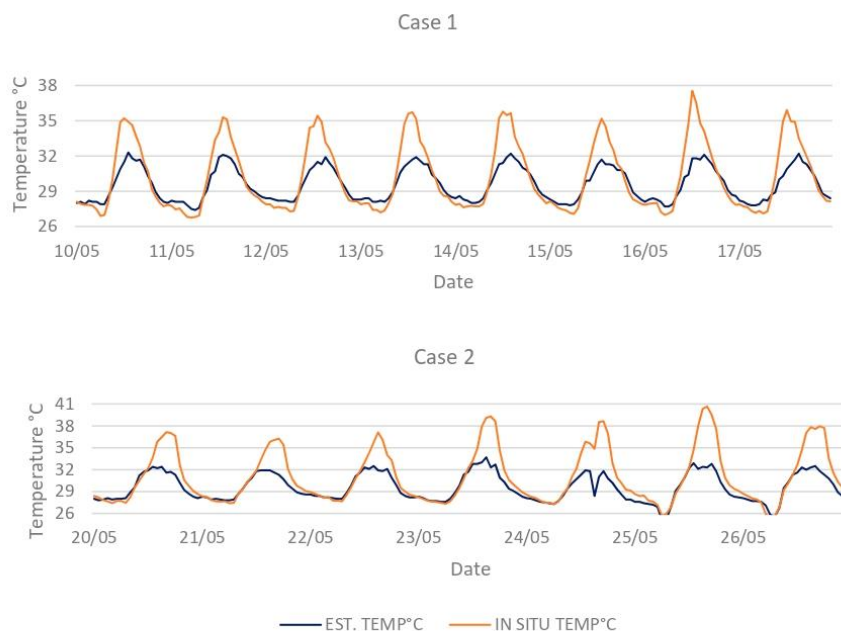
Preliminary results, during the first level study, showed a difference in temperature averages simulated at a first level. Taking into account the ASHRAE criteria for the monthly period, where ranges for NMBE and CVRMSE must comply with an index of <5% and <10%, respectively, it can be seen that relative humidity parameter in Case 1 was within the established criteria. As for energy consumption, the theoretical model tended to overestimate energy output data, where Case 2 was identified with the highest gap of 167% over the actual consumption. Due to this difference in the estimations, a second level of assessment was carried out, this time including the environmental results of the remaining zones of the dwellings. The selection of the representative week was made based on a random run of the historical temperature of the city to determine the warmest period. Figure 3 shows the average weekly temperature during a typical year. It can be appreciated that from March to September there is a relative uniformity in temperature, being the months of May, August and September those that report critical values, these months also share the highest electricity consumption, based on the electric bill records.



**Figure 3.** Average temperature of the year based on the typical meteorological year (TMY) file.

4.2. Second Evaluation

For Case 1, the monitoring campaign was carried out from May 10 to 17, 2019; for Case 2, the evaluated period comprised from 20 to 26 May 2019. Results from the environmental parameters monitoring are shown in Table 5, while a graphical comparison of outdoor temperature can be seen in Figure 4, where the highest temperatures of the microenvironment were recorded, with a maximum difference registered of 5.24 °C and 6.97 °C for Case 1 and Case 2, respectively. On the other hand, the constant maximum relative humidity records are presented for the macro-environment, with a percentage difference of 5.19% for dwelling 1, and 8.07% for dwelling 2.



**Figure 4.** Graphical comparison between macro-environment (est. temp. °C) and micro-environment (in situ temp. °C) data in a week period. Above, Case 1; below, Case 2.

**Table 5.** Comparison between macro-environment data and micro-environment data.

		Temperature °C			Relative Humidity %		
		MIN. WEEK	MAX. WEEK	MEAN	MIN. WEEK	MAX. WEEK	MEAN
Case 1	Macro- environment	27.40	32.30	29.54	67.00	88.00	78.65
	Micro-environment	26.77	37.54	30.16	55.01	85.95	73.46
Case 2	Macro- environment	25.10	33.70	29.55	50.00	92.00	73.98
	Micro-environment	25.31	40.67	31.03	36.89	85.10	65.91

#### 4.3. Indoor Temperature Model Calibration

To achieve the theoretical model calibration, the data came from a second run of simulations replacing the historical meteorological file with the one corresponding to the current meteorological file. On the other hand, a second round of interviews with the dwellers was carried out to define the day-by-day activities during the period of overall dwelling monitoring. In this level, the occupants of Case 1 reported occupation periods of two more hours during Monday and Friday in relation to the first interview. While on Saturdays, unoccupied period extended from 9:00 am to 8:00 pm, and on Sundays they reported an unoccupied period from 10:00 am to 4:00 pm. Through the same interview, it was found that air conditioning was turned off on average at 6:00 am during weekdays, and at 4:00 am on both Saturday and Sunday, which translates into an increase of 24 hours in air-conditioning.

In Case 2, occupancy remained constant except for air-conditioning time schedule which also reported an increase of 31 more hours per week in contrast to the evaluation in February. In addition, dwelling 2 reported a reduction in the set point temperature to 16 °C during the first 3 hours of ignition, eventually returning to the set point of 23 °C once the room was at a “pleasant” temperature. Results of the model calibration are shown in Table 6.

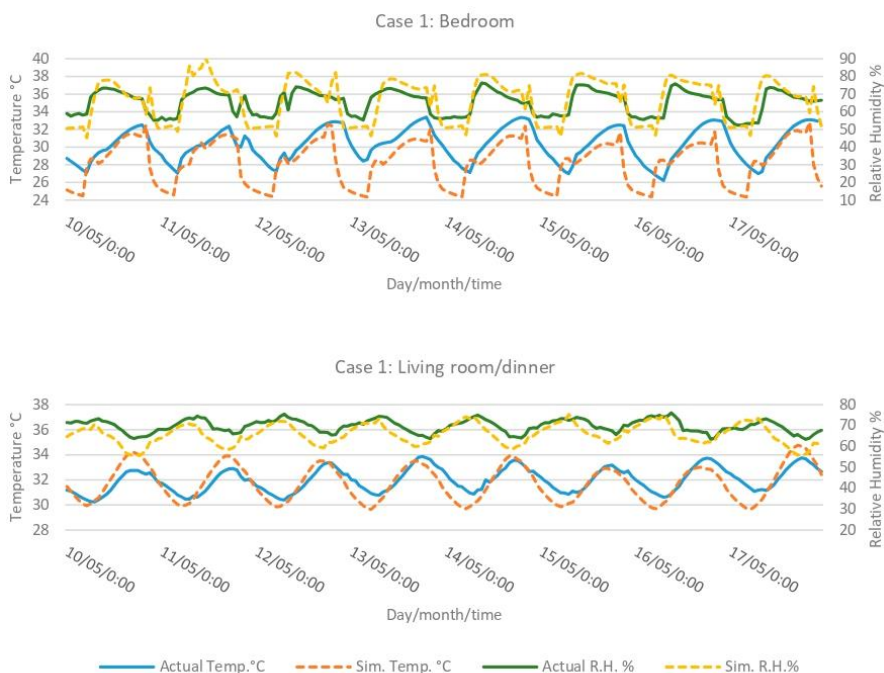
**Table 6.** Final comparison of level of compliance through checked uncertainty parameters between first iteration (ITER. 1), and optimized iteration (ITER. Op.)

		Temperature					Relative Humidity				
		R <sup>2</sup>	MEAN °C	NMBE%	CV (RMSE)%	R <sup>2</sup>	MEAN %	NMBE%	CV (RMSE)%		
Case 1	Bedroom	ITER. 1	0.25	26.11	16.03	18.17	0.41	60.85	7.26	13.25	
		ITER. Op.	0.37	28.29	7.10	16.72	0.68	66.52	-1.88	11.27	
	Living room	ITER. 1	0.67	28.41	12.57	12.97	0.36	74.86	-6.79	10.70	
		ITER. Op.	0.68	31.76	0.68	2.62	0.64	65.85	5.96	7.44	
Case 2	Main Bedroom	ITER. 1	0.09	29.35	-5.01	13.77	0.06	63.86	-29.58	38.51	
		ITER. Op.	0.38	28.09	-0.74	11.01	0.05	69.20	-35.01	40.49	
	Dinner/kitchen	ITER. 1	0.54	31.16	5.73	6.95	0.40	64.27	-9.55	14.72	
		ITER. Op.	0.62	32.94	0.02	3.42	0.43	70.58	-8.94	13.24	
	Bedroom (storage)	ITER. 1	0.47	30.27	7.92	8.70	0.43	73.14	-4.86	9.79	
		ITER. Op.	0.51	30.80	6.07	6.87	0.44	68.97	0.88	6.39	

Infiltration is one of the most complex parameters to measure that may lead to uncertainty. Three infiltration values were evaluated in the second level of iterations for each zone taking as reference the ranges set by the Air Tightness Testing and Measurement Association (ATTMA) Technical Standard, to determine the permeability of the dwellings [34], expressed randomly as 0.20 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup> at 50 Pa, 0.60 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup> at 50 Pa, 0.80 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup> at 50 Pa, for optimal, medium and poor tightness, respectively. The modifications of the infiltration entailed a lesser impact on the simulated indoor temperature, however, greater variations presented for humidity, where the difference between the simulated relative humidity and the actual one came to present a differential error of up to 33%. At the same time, for the case of relative humidity, positive linear correlation values, classified within the moderate to good range (0.3–0.7) [35], were obtained in all the analyzed areas, in particular, for the three spaces without air conditioning.

Regarding indoor temperature, a weak dependence (0–0.30) was observed in the first iteration. However, it should be noted that all relative humidity measures values registered indoors were higher than 60%. The main reason for this is the lack of natural ventilation in the spaces preventing air renewal. For the living/dining room in Case 1, that was the only space reported to keep the windows open, corresponding to an average of 2 ren/hr. A graphical representation of the hourly temperature oscillations during the warmer analysis period between actual measured data and results from the optimized iterations is presented by zones for Case 1 in Figure 5.

In Case 2, the average humidity levels differed by 4.73% and 3.12% in the dining room and storage, respectively, which reported windows closed for 6 days a week; this minor variation may be due to the orientation (northeast) of dwelling 2. A graphical representation of the hourly temperature oscillations during the warmer analysis period between actual measured data and results from the optimized iterations is presented by zones for Case 2 in Figure 6. The evaluation allowed the achievement of closer values in those spaces without cooling equipment, reporting differential values and error below compliance since the beginning. From the results obtained in both rooms, it can be seen that, with the second iteration, percentage errors close to 0 were obtained. For the storage in Case 2, the final improvement of indoor temperature achieved only 1.83%. However, from the temperature fluctuations in the graphs, it can be appreciated that EnergyPlus™ tends to underestimate the temperature when considering the internal loads, either from the dwellers or from electrical appliances in operation.

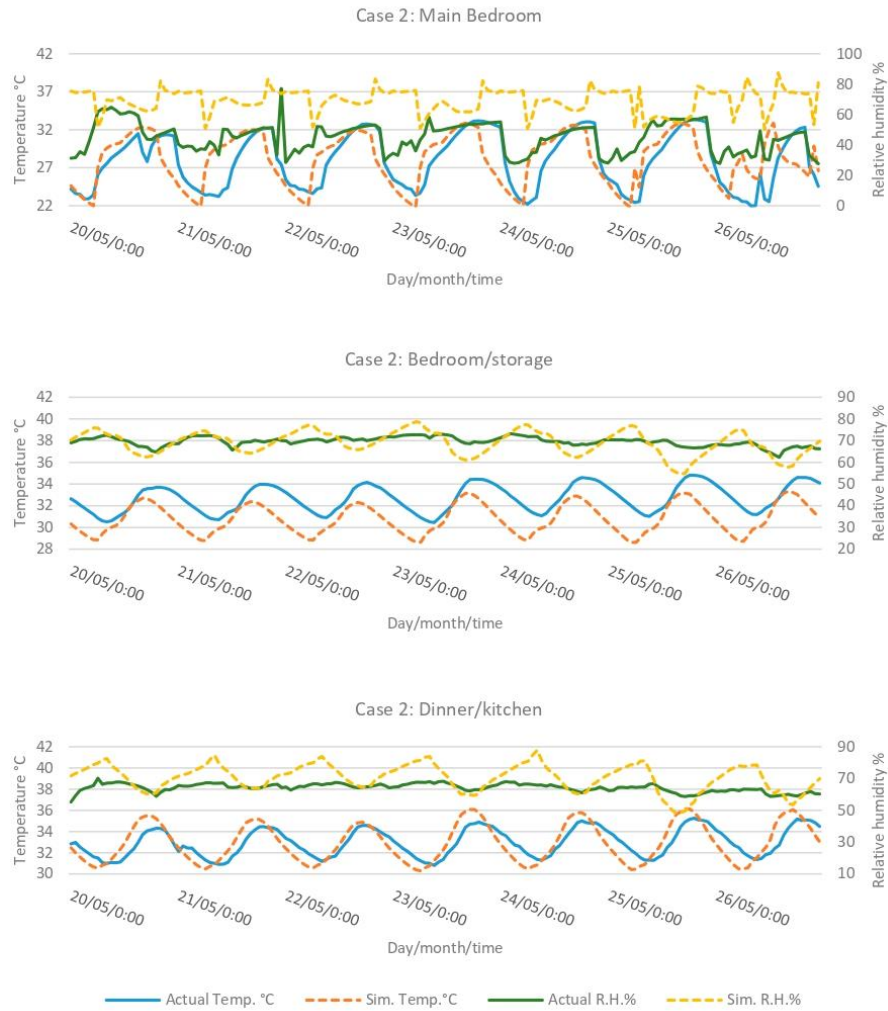


**Figure 5.** Graphical temperature and relative humidity comparison between actual and simulated data in each zone for Case 1.

As for the spaces with air conditioning, the coefficients of variation presented an improvement in the prediction of both indoor temperature and relative humidity. In the bedroom of Case 1, the air set-point temperature presenting the best correlation was that corresponding to the iteration with 20 °C which resulted in a value of 0.37, compared to 0.33 and 0.28 obtained with the set-points at 18 °C and 22 °C, respectively. This difference may be caused by the deterioration of the cooling equipment due to the fact that it has more than four years of operation [36]. In the bedroom of Case 2, the dwellers pointed that, during the week, the set-point temperatures used were 16 °C and 23 °C. Results for different set-point values iterations such as 16 °C, 18 °C, 21 °C and 23 °C showed correlation values of 0.38, 0.36, 0.31 and 0.23 respectively. Despite the complexity of evaluating air set-point temperature, it was decided to keep the 16 °C due to the moderate relationship value achieved.

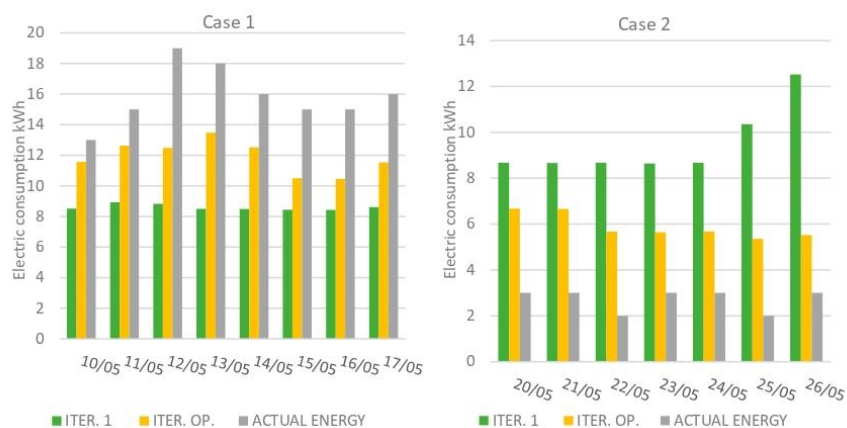
Finally, as a complementary parameter for this work, energy consumption derived from the schedule defined by the dwellers during the first and second evaluation levels allowed the identification of two aspects: a sub-prediction in Case 1 and an over-prediction in Case 2. Figure 7 shows the comparison of daily consumption, which for dwelling 1 presented in the first and in the optimized iteration a difference of 46% and 33%, respectively, with total values of 68.17 kWh and 95.16 kWh, compared to the 127.0 kWh recorded on site. In contrast, in dwelling 2, the weekly electricity consumption was over-predicted when compared to the 19.0 kWh recorded on site; the first iteration was 3.48 times greater than the actual one and, in the second iteration, the gap was reduced to 2.17 times the actual, with absolute values of 66.19 kWh and 41.35 kWh. The electricity bill turned out to be a reference value for the consumption that did not allow the comparison on a daily basis. The daily reading of the electricity consumption meter, complemented with the descriptive reports of home appliances use by dwellers, also failed to satisfactorily approximate the simulated results, since the difference may also be attributed to different causes, ranging from errors in programming and use

to electrical interference or physical problems in the installation. Therefore, this evaluation requires the use of adequate sensors for the electric frequency in periods assumed with greater demands or in representative days.



**Figure 6.** Graphical temperature and relative humidity comparison between actual and simulated data in each zone for Case 2.





**Figure 7.** Electric consumption comparison in three levels: iteration 1, optimized iteration and actual energy reading.

## 5. Conclusions

By means of a preliminary evaluation, it was found that there is a temperature difference in the microclimate of the case studies that can be 5 °C higher than the temperature recorded 4.5 km away from the urban center.

On the other hand, by applying the calibrated simulation approach in buildings, focused on indoor temperature of dwellings, it was possible to configure a theoretical model with validation in compliance according to ASHRAE's indexes, based on keeping a close thermal behavior in the analyzed zones indoors considering the internal loads, schedule of use of home appliances by dwellers and actual measures of the environmental parameters outdoors.

Despite this, of course, the final results reflect that reality cannot be fully represented by the calculation engines due to the non-deterministic characteristics of the models. However, it can be stated that, considering indoor temperature and its fluctuation at the hourly level, studied during a critical period, it is possible to reduce the error gap when this is measured based on nominal error rates and coefficient of variation, but not for the  $R^2$  value; in this case, in none of the areas it was possible to reach a strong correlation level.

Moreover, the gap can be reduced through data from comprehensive monitoring with a meteorological station placed on the study site (in this work, this was not possible for equipment safety and dwellers permission issues for the station set-up). Contrary to environmental performance, the measurement of energy consumption by daily readings, and schedules of home appliances use, detailed by dwellers reports, proved not to provide accurate information to reduce the energy gap prediction generated in both case studies.

As most authors have suggested, the use or operation factor is the one that presents the greatest uncertainty, especially for the case of residential buildings, due to the high variability in the patterns of use and consumption. In this sense, the installation of devices that allow measurement of the electricity consumption at different times is recommended, also to rule out possible physical deficiencies in the installation.

With the results obtained in this work, based on a calibrated model for each component zone of the dwelling, and the environmental monitoring of the site, the results of the implementation of different design proposals can be assessed, considering both the shape and distribution of the areas and the characteristics of the envelope, mainly focused on the dehumidification of the spaces as well as on the reduction and conservation of indoor temperature, so that, it remains within hygrothermal comfort ranges.

**Author Contributions:** R.A.B.-G. carried out the installation of the equipment, collected the data, performed the statistical analyzes and wrote the first draft. R.E.V.-A. provided the original idea for the work, supervised the collection and analysis of the data and corrected the manuscript. J.C.C.-A. designed the experimental campaign and supervised the analyzes. N.A.O.-G. designed the experimental campaign and supervised the installation of the equipment and the data acquisition. M.C.-J. supervised the installation of the equipment and the data acquisition. D.L.T.-A. supervised the data acquisition and collaborated in the analyzes.

**Acknowledgments:** The authors would like to thank Mexico's National Council of Science and Technology (CONACYT) for the financial support through the project number PDCPN-2015-1622.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. National Institute of Statistics and Geography. *Intercensal Survey 2015*; INEGI: Aguascalientes, Mexico, 2015.
2. Cerón-Palma, I.; Sanyé-Mengual, E.; Oliver-Solá, J.; Montero, J.I.; Ponce-Caballero, C.; Rieradevall, J. Towards a green sustainable strategy for social neighbourhoods in Latin America: Case from social housing in Merida, Yucatan, Mexico. *Habitat Int.* **2013**, *38*, 47–56.
3. OECD. *OECD Urban Policy Reviews: Mexico 2015 Transforming Urban Policy and Housing*; OECD Publishing: Paris, France, 2015.
4. Aguilar, G.A.; Santos, C. Informal settlements' needs and environmental conservation in Mexico City: An unsolved challenge land use-policy. *Land Use Policy* **2011**, *4*, 649–662. [[CrossRef](#)]
5. Taha, H.; Akbari, H.; Rosenfeld, A.; Huang, J. Residential cooling loads and the urban heat Island- the effects of albedo. *Build. Environ.* **1988**, *24*, 271–283. [[CrossRef](#)]
6. Fox, J.; Osmond, P. The effect of building facades on outdoor microclimate -reflectance recovery from terrestrial multispectral images using a robust empirical line method. *Climate* **2018**, *6*, 56. [[CrossRef](#)]
7. Oropeza-Pérez, I.; Ostergaard, P.A. Energy Saving Potential of Utilizing Natural Ventilation Under Warm Conditions- A case study of México. *Appl. Energy* **2014**, *130*, 20–32. [[CrossRef](#)]
8. Oropeza-Pérez, I. Comparative economic assessment of the energy performance of air-conditioning within the Mexican residential sector. *Energy Rep.* **2016**, *2*, 147–154. [[CrossRef](#)]
9. GIZ/INFONAVIT. *Study of Optimization of Energy Efficiency in Low-Income Housing*; INFONAVIT: Mexico City, Mexico, 2011.
10. Tisov, A.; Siroky, J.; Kolarik, J. Key figures for joint assesment of indoor environmental quality (IEQ) and energy consumption in modern buildings—A literature review. In Proceedings of the 12th REHVA World Congress, Aalborg, Denmark, 22–25 May 2016.
11. De Wilde, P. The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation. *Autom. Constr.* **2014**, *41*, 40–49. [[CrossRef](#)]
12. Shi, X.; Si, B.H.; Zhao, J.S.; Tian, Z.C.; Wang, C.; Jin, X.; Zhou, X. Magnitude, causes, and solutions of the performance gap of buildings: A review. *Sustainability* **2018**, *11*, 937. [[CrossRef](#)]
13. Mustafaraj, G.; Marini, D.; Costa, A.; Keane, M. Model calibration for building energy efficiency simulation. *Appl. Energy* **2014**, *130*, 72–85. [[CrossRef](#)]
14. Royapoor, M.; Roskilly, T. Building model calibration using energy and environmental data. *Energy Build.* **2015**, *94*, 109–120. [[CrossRef](#)]
15. Mohegh, A.; Levison, R.; Taha, H.; Gilbert, H.; Zhang, J.; Li, Y.; Tang, T.; Ban-Weiss, G.A. Observational evidence of neighborhood scale reductions in air temperature associated with increases in roof albedo. *Climate* **2018**, *6*, 98. [[CrossRef](#)]
16. Amorim, M.C.C.T.; Dubreuil, V. Intensity of Urban Heat Islands in tropical and temperate climates. *Climate* **2017**, *5*, 91. [[CrossRef](#)]
17. ASHRAE Inc. *ASHRAE Guideline 14-2002: Measurement of Energy and Demand Savings*; ASHRAE: Atlanta, GA, USA, 2002.
18. Eguía Oller, P.; Alonso Rodríguez, J.M.; Saavedra González, Á.; Arce Fariña, E.; Granada Álvarez, E. Improving the Calibration of Building Simulation with Interpolated Weather Datasets. *Renew. Energy* **2018**, *122*, 608–618. [[CrossRef](#)]
19. Paliouras, P.; Matzaflaras, N.; Peuhkuri, R.H.; Kolarik, J. Using indoor environment parameters for calibration of building simulation model—A passive house case study. *Energy Procedia* **2015**, *78*, 1227–1232. [[CrossRef](#)]

20. Roberti, F.; Oberegger, U.F.; Gasparella, A. Calibrating historic building energy models to hourly indoor air and surface temperatures: Methodology and case study. *Energy Build.* **2015**, *108*, 236–243. [CrossRef]
21. Cárdenas, J.; Osma, G.; Merchian, A.; Ordoñez, G. Characterization of Environmental and Energy Performance of an Average Social Dwelling in a Tropical Region of Colombia. *WIT Trans. Ecol. Environ.* **2016**, *204*, 859–870.
22. Miño-Rodríguez, I.; Naranjo-Mendoza, C.; Korolija, I. Thermal assesment of low-cost rural housing—A case of study in the Ecuadorian Andes. *Buildings* **2016**, *6*, 36. [CrossRef]
23. García, Y.; Cuadrado, J.; Blanco, J.M.; Roji, E. Optimizing the indoor thermal behaviour of housing units in hot humid climates: Analysis and modelling of sustainable constructive alternatives. *Indoor Built Environ.* **2018**, 1–19. [CrossRef]
24. Cho, K.H.; Kim, S.S. Energy performance assesment according to data acquisition levels of existing buildings. *Energies* **2019**, *12*, 1149. [CrossRef]
25. Ruíz, G.R.; Bandera, C.F. Validation of calibrated energy models: Common errors. *Energies* **2017**, *10*, 1587. [CrossRef]
26. Municipality of Othón P. Blanco. *Urban Development Program of Othón P. Blanco, Quintana Roo*; Municipality of Othón P. Blanco: Chetumal, Mexico, 2018.
27. García, E. *Modification to Köppen's System Classification*; UNAM: Mexico City, Mexico, 2004.
28. National Institute of Statistics and Geography. *Statistical and Geographyc Yearbook of Quintana Roo 2017*; INEGI: Aguascalientes, Mexico, 2017.
29. EnergyPlus™. Enineering Reference. *The Refernce to EnergyPlus Calculations*. 2015. Available online: [https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs\\_v8.3.0/EngineeringReference.pdf](https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/EngineeringReference.pdf) (accessed on 20 April 2019).
30. Secretary of Energy. *Mexican Official Standard NOM-026-ENER-2015, Energy Efficiency in Split Type Air Conditioners with Variable Refrigerant Flow, Free Discharge and without Air Constrictors*. Boundaries, Testing and Labeling Methods; SENER: Mexico City, Mexico, 2015.
31. American Society of Heating. *Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE Handbook Fundamentals SI*; ASHRAE: Atlanta, GA, USA, 2009.
32. ASHRAE. *ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*; ASHRAE: Atlanta, GA, USA, 2017.
33. Enriquez, R.; Jiménez, M.J.; Heras, M.R. Towards non-intrusive thermal load monitoring of buildings: BES calibration. *Appl. Energy* **2017**, *191*, 44–54. [CrossRef]
34. Association of the Air Tightness Testing & Measurement. *ATTMA Technical Starndards L1 Measuring Air Permeability of Building Envelopes (Dwellings)*; British Institute of Non-Destructive Testing: Northampton, UK, 2010.
35. Ratner, B. The correlation coefficient: Its values range between +1/-1, or do they? *J. Target. Meas. Anal. Mark.* **2009**, *17*, 139–142. [CrossRef]
36. Eleftheriadis, G.; Hamdy, M. The impact of insulation and HVAC degradation on overall building energy performance: A case study. *Buildings* **2018**, *8*, 23. [CrossRef]



© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).