



Tesis.

# **Emisiones de CO<sub>2</sub>e y uso de energía relacionadas a las propiedades térmicas de ladrillos regionales bajo escenarios de cambio climático**

Presenta:

Luis Roberto Hernández Nájera

Directora de tesis:

Dra. Norma Alejandra Rodríguez Muñoz

Codirectora de tesis:

Dra. Ana Cecilia Borbón Almada

Durango, Dgo.

Febrero, 2025

# Índice

---

## 1

1.1 Introducción .....	7
1.2 Estado del arte .....	9
1.3 Justificación .....	12

---

## 2

2.1 Hipótesis .....	14
2.2 Objetivo general .....	14
2.2.1 Objetivos específicos .....	14
2.3 Marco teórico .....	15
2.3.1 Cambio climático .....	15
2.3.10 Propiedades de los ladrillos .....	23
2.3.10.1 Absorción de agua .....	23
2.3.10.2 Resistencia a la compresión .....	23
2.3.10.3 Propiedades termofísicas de los ladrillos.....	24
2.3.11 Herramienta de Simulación de Sistemas Transitorios (TRNSYS) .....	24
2.3.2 Emisiones .....	16
2.3.3 Cambio climático en México .....	17
2.3.4 Panel intergubernamental de expertos sobre el cambio climático .....	18
2.3.5 Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs).....	18
2.3.6 Impacto del uso de energía .....	20
2.3.7 Vivienda en México .....	20
2.3.7.1 Organismos que regulan la vivienda .....	21
2.3.7.2 Tipos de viviendas .....	21
2.3.7.3 Construcción de vivienda y normativa .....	22
2.3.8 Envoltorio térmico.....	22
2.3.9 Transferencia de calor a través de muros .....	22

---

## 3

3. Metodología .....	25
3.1 Diseño de experimento.....	26
3.2 Recolección y adecuación de muestras.....	27

---

3.3 Determinación de propiedades .....	28
3.3.1 Porcentaje de absorción y resistencia a la compresión.....	28
3.3.2 Pruebas termofísicas.....	29
3.4 Simulación .....	33
3.4.1 Selección de viviendas .....	33
3.4.2 Selección de envolvente .....	40
3.4.3 Parámetros para simulación .....	43
3.4.3.1 Ganancias de calor de la vivienda .....	43
3.4.3.2 Infiltración .....	45
3.4.3.3 Rangos de confort .....	45
3.4.4 Casos de estudio .....	45

---

## 4

4. Resultados .....	48
4.1 Determinación de propiedades .....	48
4.2 Simulación .....	53
4.2.1 Análisis de temperaturas .....	53
4.2.2 Análisis de demanda de energía .....	57
4.2.2 Análisis de emisiones .....	63

---

## 5

5 Conclusiones .....	66
----------------------	----

---

## 6

6 Referencias bibliográficas .....	69
------------------------------------	----

---

## A

a.1 Calibración de equipos .....	72
a.2 Temperatura confort .....	77
a.3 Propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos .....	79
a.4 Propiedades térmicas de los ladrillos .....	81
Apéndices .....	72

# Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1. EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR UNIDAD ELÉCTRICA GENERADA. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE: UNECE (2021) LIFE CYCLE ASSESSMENT OF ELECTRICITY GENERATION OPTIONS. UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE CC BY	12
ILUSTRACIÓN 2 PANORAMAS DE TEMPERATURA MEDIA PARA 2050 Y 2100 CON LAS DISTINTAS RCP. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS EXTRAÍDOS DE METEONORM.	19
ILUSTRACIÓN 3 METODOLOGÍA DEL PROYECTO	25
ILUSTRACIÓN 4 ZONAS DE PRODUCCIÓN DE LADRILLO SELECCIONADAS	26
ILUSTRACIÓN 5 EQUIPO FOX 200	30
ILUSTRACIÓN 6 EQUIPO TEMPOS CON SONDA SH3	31
ILUSTRACIÓN 7 A) PLANTA ARQUITECTÓNICA Y B) PLANTA DE AZOTEA DE VIVIENDA 1	34
ILUSTRACIÓN 8 A) DISTRIBUCIÓN DE MUROS EN VIVIENDA 1 B) DISTRIBUCIÓN DE ÁREAS TÉRMICAS	35
ILUSTRACIÓN 9 MODELO SKETCHUP DE VIVIENDA 1 A) FACHADA FRONTAL B) FACHADA POSTERIOR	36
ILUSTRACIÓN 10 PLANTAS ARQUITECTÓNICAS DE VIVIENDA 2 A) PLANTA BAJA B) PLANTA ALTA Y C) PLANTA DE AZOTEA	37
ILUSTRACIÓN 11 PLANTA BAJA VIVIENDA 2 A) DISTRIBUCIÓN DE MUROS Y B) ÁREAS TÉRMICAS EN DISTRIBUCIÓN DE MUROS Y ÁREAS TÉRMICAS	38
ILUSTRACIÓN 12 PLANTA ALTA VIVIENDA 2 A) DISTRIBUCIÓN DE MUROS Y B) ÁREAS TÉRMICAS EN DISTRIBUCIÓN DE MUROS Y ÁREAS TÉRMICAS	39
ILUSTRACIÓN 13 MODELO SKETCHUP DE VIVIENDA 2 A) FACHADA FRONTAL B) FACHADA POSTERIOR	40
ILUSTRACIÓN 14 VISTAS EN SECCIÓN DE MUROS A Y B	41
ILUSTRACIÓN 15 VISTAS EN SECCIÓN DE LOSAS	42
ILUSTRACIÓN 16 CASOS DE ESTUDIO PLANTEADOS PARA EL PROYECTO	47
ILUSTRACIÓN 17 PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	49
ILUSTRACIÓN 18 PRUEBAS DE ABSORCIÓN INICIAL Y PORCENTAJE DE ABSORCIÓN	49
ILUSTRACIÓN 19 DESARROLLO DE MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	50
ILUSTRACIÓN 20 DESARROLLO DE MEDICIÓN DE CALOR ESPECÍFICO	51
ILUSTRACIÓN 21 DIAGRAMA BOXPLOT DE MUESTRAS ANALIZADAS A) RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, B) DENSIDAD, C) CALOR ESPECÍFICO Y D) CONDUCTIVIDAD TÉRMICA <b>4.2 SIMULACIÓN</b>	52
ILUSTRACIÓN 22 DIAGRAMA BOXPLOT TEMPERATURAS EN A) VIVIENDA 1 Y B) VIVIENDA 2	54
ILUSTRACIÓN 23 DIAGRAMA BOXPLOT Y VIOLÍN DE TEMPERATURAS EN ÁREA COMÚN DE CASA 2 EN LOS PANORAMAS ANALIZADOS.	56
ILUSTRACIÓN 24 COMPARACIÓN DE ENERGÍA REQUERIDA PARA MANTENER CONDICIONES DE CONFORT TÉRMICO EN A) VIVIENDA 1 Y B) VIVIENDA 2, BAJO ESCENARIO BASE, KWH/AÑO	57
ILUSTRACIÓN 25 COMPARATIVO DE ENERGÍA BASE CONTRA ENERGÍA DE PANORAMA RCP 8.5 2100, A) VIVIENDA 1 Y B) VIVIENDA 2, KWH/AÑO	58
ILUSTRACIÓN 26 ENERGÍA DE CALEFACCIÓN REQUERIDA, A. CONTEMPORÁNEO VIVIENDA 1, B. RCPS VIVIENDA 1, C. CONTEMPORÁNEO VIVIENDA 2, D. RCPS VIVIENDA 2, KWH/AÑO.	59
ILUSTRACIÓN 27 ENERGÍA DE ENFRIAMIENTO REQUERIDA, A. CONTEMPORÁNEO VIVIENDA 1, B. RCPS VIVIENDA 1, C. CONTEMPORÁNEO VIVIENDA 2, D. RCPS VIVIENDA 2, KWH/AÑO.	60
ILUSTRACIÓN 28 DIAGRAMA DE ENERGÍA REQUERIDA SEGÚN SU FIN EN CASA 1 EN LOS PANORAMAS ANALIZADOS, A) CONSUMO TOTAL, KWH/AÑO; B) CONSUMO POR METRO CUADRADO, KWH/AÑO M <sup>2</sup> ; C) CONSUMO POR METRO CUBICO, KWH/AÑO M <sup>3</sup> .	61
ILUSTRACIÓN 29 DIAGRAMA DE ENERGÍA REQUERIDA SEGÚN SU FIN EN CASA 2 EN LOS PANORAMAS ANALIZADOS, A) CONSUMO TOTAL, KWH/AÑO; B) CONSUMO POR METRO CUADRADO, KWH/AÑO M <sup>2</sup> ; C) CONSUMO POR METRO CUBICO, KWH/AÑO M <sup>3</sup> .	62
ILUSTRACIÓN 30 EMISIONES ACUMULADAS EN VIVIENDA 1 Y 2 EN KGCO <sub>2</sub> E	64
ILUSTRACIÓN 31 COMPARACIÓN DE EMISIONES REQUERIDAS PARA MANTENER CONDICIONES DE CONFORT TÉRMICO EN A) VIVIENDA 1 Y B) VIVIENDA 2, KGCO <sub>2</sub> E/M <sup>2</sup>	65

# Tablas

TABLA 1 ESTADO DEL ARTE .....	11
TABLA 2 PROTOCOLOS Y CONVENIOS AMBIENTALES .....	15
TABLA 3 PRINCIPALES GASES DE EFECTO INVERNADERO.....	16
TABLA 4 TABLA DE EFECTOS EN CAMBIO DE TEMPERATURA Y NIVEL DEL MAR PARA CADA RCP. ("REPRESENTATIVE CONCENTRATION PATHWAY," 2021) .....	19
TABLA 5 CLASIFICACIÓN DE VIVIENDAS SEGÚN SU VALOR (REGISTRO UNICO DE VIVIENDA, 2019) .....	21
TABLA 6 MATERIALES SELECCIONADOS .....	40
TABLA 7 EQUIPOS CONSIDERADOS .....	43
TABLA 8 GANANCIAS DE CALOR DEBIDO A LA OCUPACIÓN DE ÁREA COMÚN .....	44
TABLA 9 GANANCIAS DE CALOR DEBIDO A LA OCUPACIÓN DE HABITACIÓN PRINCIPAL.....	44
TABLA 10 GANANCIAS DE CALOR DEBIDO A LA OCUPACIÓN DE HABITACIÓN.....	44
TABLA 11 DESCRIPCIÓN DE VIVIENDAS 1 Y 2.....	46
TABLA 12 PRODUCTORES SELECCIONADOS PARA ANÁLISIS DE LADRILLOS.....	48
TABLA 13 RESULTADOS DE PRUEBAS FÍSICAS Y MECÁNICAS.....	51
TABLA 14 DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DE TEMPERATURA EN VIVIENDA 1 ( °C) .....	55
TABLA 15 DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DE TEMPERATURA EN VIVIENDA 2 ( °C) .....	55

# Apéndices

APÉNDICE 1 ESTÁNDAR DE CALIBRACIÓN.....	72
APÉNDICE 2 PRUEBA DE CALIBRACIÓN DE EQUIPO FOX 200 A 22°C .....	73
APÉNDICE 3 PRUEBA DE CALIBRACIÓN DE EQUIPO FOX 200 A 24°C .....	74
APÉNDICE 4 CALIBRACIÓN DE TEMPOS.....	76
APÉNDICE 5 TEMPERATURAS DE CONFORT PARA RCP 4.5 2050 .....	77
APÉNDICE 6 TEMPERATURAS DE CONFORT PARA RCP 4.5 2100 .....	77
APÉNDICE 7 TEMPERATURAS DE CONFORT PARA RCP 8.5 2050 .....	77
APÉNDICE 8 TEMPERATURAS DE CONFORT PARA RCP 8.5 2100 .....	78
APÉNDICE 9 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LADRILLOS ANALIZADOS .....	79
APÉNDICE 10 ABSORCIÓN INICIAL Y PORCENTAJE DE ABSORCIÓN DE LADRILLOS ANALIZADOS .....	80
APÉNDICE 11 PROPIEDADES TÉRMICAS DE LADRILLOS ANALIZADOS .....	81

# Resumen

En esta tesis se consideró a la vivienda como fuente de emisiones, puesto que la Agencia Internacional de Energía (IEA) reporta que una cuarta parte de las emisiones mundiales relacionadas con energía provienen del sector residencial; además, la mayor parte de esta energía es por equipos de refrigeración o calefacción para mantener temperaturas de confort térmico. En unión a esto, México está en una situación complicada puesto que se encuentra con un déficit de 14 millones de viviendas, además, un tercio de las viviendas que actualmente son ocupadas se encuentran en malas condiciones, por lo que requieren trabajos de modernización o mantenimiento. Por tanto, es importante continuar la investigación en el sector de la construcción con el fin de brindar vivienda adecuada a la población.

De acuerdo con INEGI, más del 90% de las viviendas en México cuentan con muros de algún material resistente como ladrillo o bloque, por esta razón se determinaron las propiedades termofísicas de este tipo de materiales para apoyar a la modernización y diseño de viviendas en México.

Para conocer las emisiones relacionadas al uso de energía en las viviendas y su comportamiento a futuro, se han tomado en cuenta las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), gracias a las cuales podemos representar aumentos en la temperatura, así como otras variables ambientales, en función de diferentes niveles de concentración de gases invernadero.

En este trabajo, se inició con el establecimiento de las zonas de producción de ladrillo rojo recocido de la Ciudad de Durango, la cual de acuerdo a la literatura concentra la mayor parte de sus productores en el sureste de la ciudad. En esta zona se seleccionaron tres productores que de acuerdo con las entrevistas desarrolladas cuentan con métodos de producción similares y se abastecen del mismo banco de material. De manera paralela se seleccionaron dos productores que utilizan métodos diferentes, uno con una producción mecanizada en la ciudad de Monterrey y otro que comercializa sus ladrillos bajo el nombre de "térmicos", elaborados sin un proceso de cocción y secados al sol con un proceso similar al de los adobes.

Se recolectaron muestras de tamaño suficiente para satisfacer la normativa aplicable a cada prueba: absorción de agua y resistencia a la compresión, o a los cálculos del tamaño mínimo de una muestra para análisis de varianza de medias de una vía para las propiedades a determinar que carecen de normativa: conductividad térmica y calor específico. A continuación, se procedió a determinar las propiedades de interés a una temperatura media de 24 °C; de las cuales se obtuvo, a través del análisis de varianza de medias, que entre los productores de ladrillo locales no existe una diferencia significativa en los valores arrojados en la determinación de la conductividad térmica. Además, los valores arrojados se encuentran en el límite inferior del rango establecido para este tipo de material, con valores más cercanos a los reportados sobre ladrillos modificados para mejorar su comportamiento termodinámico que a los de ladrillos tradicionales reportados

en la literatura, por tanto, se puede suponer que es un elemento que beneficia el comportamiento térmico de las viviendas locales y, en consecuencia, su consumo energético.

Para la selección de viviendas se tomó en cuenta la información disponible sobre el desarrollo inmobiliario, así como la situación de vivienda en México, por lo que se decidió por una vivienda unifamiliar de dos habitaciones y un baño, en un terreno de 6m x 16m, muy similar a las viviendas típicas desarrollada en el tipo popular. También se seleccionó una vivienda de dos plantas con cuatro habitaciones y dos y medio baños, desplantada en un terreno de 10m x 20m, que por sus características se podría establecer como una vivienda de tipo medio o tradicional, la cual fue seleccionada por pertenecer a una de las tipologías con mayor consumo de recursos energéticos.

Las viviendas fueron simuladas en los panoramas RCP 4.5 y RCP 8.5 para los años 2050 y 2100, a fin de considerar la mayor parte de la vida útil de estas y su comportamiento antes los panoramas más desfavorables de cambio climático. Con las variables antes mencionadas se establecieron los casos de estudio que fueron analizados utilizando equipos de aire acondicionado y sin ellos, con el fin de conocer la diferencia en la demanda energética y poder comparar las temperaturas al interior de las viviendas. Gracias a esto se estableció una comparativa del rango de temperaturas en las que se encontrarían las viviendas. Por otra parte, se obtuvo la energía necesaria para mantener las viviendas en rangos de confort y con ello establecer las emisiones operativas que se generarían derivadas del uso de estas viviendas.

Las simulaciones muestran un cambio en las emisiones dentro de los escenarios de los panoramas de cambio climático, en aquellos con los mayores aumentos en la temperatura ambiente se pudo observar una disminución de emisiones producto de la calefacción y un aumento de emisiones producto del enfriamiento; estos cambios son función de las características arquitectónicas y estructura de las viviendas, puesto que la vivienda popular muestra una disminución en sus emisiones por metro cuadrado conforme los escenarios presentaban temperatura ambiente más altas; por su parte, la vivienda tradicional muestra un aumento en sus emisiones ante los mismos escenarios. Ante los resultados obtenidos se destaca la importancia del análisis de la vivienda ante los escenarios de cambio climático y las condiciones actuales para poder brindar confort a los usuarios y disminuir las emisiones del sector residencial.

# 1.1 Introducción

El desarrollo de la sociedad va de la mano con el crecimiento demográfico, el cual trae consigo la necesidad de viviendas que den protección a los habitantes. Estas viviendas son las células de nuestras ciudades ya que son el punto de partida para el desarrollo de las actividades diarias y en ellas pasamos gran parte de nuestras vidas. Es por esto que la vivienda es reconocida como un derecho humano, expresado en lo establecido en el Artículo 4 de la Constitución de los Estados Unidos Mexicanos como “Toda familia tiene derecho a disfrutar de vivienda digna y decorosa. La Ley establecerá los instrumentos y apoyos necesarios a fin de alcanzar tal objetivo” (Secretaría de Salud, 2015). En ellas crecemos, descansamos, nos alimentamos y desarrollamos, al realizar una gran variedad de actividades en ellas representan un punto focal para el análisis de confort térmico, consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero.

Si consideramos la situación actual en México, el análisis y diagnóstico de la vivienda, puede resultar en una medida de remediación, tanto como de prevención. Esto debido a que en México al 2019 existían 34.1 millones de viviendas habitadas, de las cuales la Sociedad Hipotecaria Federal estimó que 9.41 millones se encuentran en malas condiciones (Topelson, 2020). A esto podemos agregar lo presentado por Albert Saiz, que menciona que es necesario que se construyan 814 mil viviendas nuevas cada año hasta 2042, para atender el déficit de vivienda actual y lo proyectado de acuerdo al crecimiento poblacional (Saiz et al., 2022). En contraste a esto se encuentran los datos presentados por el Registro Único de Vivienda (RUV), donde en los últimos 5 años se tiene una media de 168 mil viviendas nuevas por año. Existiendo un cambio en la tendencia donde las viviendas de bajo costo (valor máximo de \$405,823<sup>1</sup>) cada vez se construyen en menor medida, pasando de 33% a 5% y la vivienda tradicional (valor máximo de \$898,975<sup>1</sup>) presenta un aumento de 25% a 47%.

Ante esto se puede reconocer que existe un área de oportunidad en la construcción de viviendas, de acuerdo a Hábitat para la Humanidad México, actualmente existen 14 millones de familias que no tienen acceso a una vivienda digna (Habitat para la Humanidad México, 2019). Esta necesidad debe ser subsanada considerando los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y 7 (Energía asequible y no contaminante), así como buscar disminuir el impacto ambiental de estas viviendas, lo cual se menciona en el ODS 13: Acción por el clima. (Naciones Unidas, 2015). Esta meta se vuelve crucial si consideramos que en el 2021 el 23% de las emisiones globales pueden ser imputadas a las viviendas (International Energy Agency, 2023c), estas emisiones son generadas al llevar a cabo diferentes actividades o procesos, pero la mayor parte de esta energía es utilizada en la calefacción y la refrigeración de los espacios. Las emisiones equivalentes provocadas por el enfriamiento de espacios se pueden estimar en 1.02 GtCO<sub>2</sub> (International Energy Agency, 2023e), aumentando aproximadamente un 2% anualmente, mientras que

---

<sup>1</sup> En 2023

las provocadas en 2022 por la calefacción se estima en 4.2 GtCO<sub>2</sub> (International Energy Agency, 2023d), presentando muy poca variación en los últimos 10 años.

Este panorama presenta al menos dos opciones viables, una es el uso de equipos de calefacción y refrigeración con una eficiencia más alta y la otra el análisis térmico y la mejora de los espacios construidos para buscar el mayor aprovechamiento de la energía utilizada para estos dos fines.

Para desarrollar la segunda opción, que es la que se abordó en este proyecto, es necesario reconocer que las propiedades de los materiales que componen los muros y techos de las viviendas son de especial importancia, puesto que, a partir de sus propiedades térmicas, podremos conocer: ¿cuál es la capacidad aislante de los mismos?, ¿cuánto calor se gana o cede dentro de las viviendas? y ¿cómo se refleja esto en la temperatura interior de la misma? Para esto debemos entender que los muros no son sistemas de un solo material, sino que son un elemento compuesto por diferentes materiales, con propiedades y espesores distintos, que darán como resultado una envolvente térmica, que caracterizará al sistema.

## 1.2 Estado del arte

La composición de los muros tiene un alto impacto sobre las propiedades térmicas de una edificación, por tanto, ha recibido la atención de especialistas tanto del área de diseño de materiales como de los que evalúan el desempeño energético de las edificaciones. A continuación, se destacan algunas investigaciones relacionadas con la composición de los ladrillos, los muros y a la simulación de estructuras residenciales; las cuales son pertinentes para este trabajo de investigación (Tabla 1).

En el trabajo desarrollado por Salleh et al. se realizó una combinación de diversos modelos de regresión lineal para proporcionar un análisis integral de los factores que afectan la temperatura interior de una edificación. En la investigación se observó que el elemento que presentaba la mayor correlación con la temperatura al interior de las edificaciones son los muros, tanto en temporada caliente como fría. El análisis se realizó en edificios tradicionales y pasivos, además mediante el desarrollo de una regresión lineal se pudo comprobar que la temperatura de los muros es una variable estadísticamente significativa para la determinación de la temperatura al interior de la vivienda y por tanto del confort térmico (Salleh et al., 2023).

En diversos trabajos realizados por varios autores (Abohelal et al., 2023; Buratti et al., 2022; Mawra et al., 2023; Venkatesan et al., 2022), se han analizado variaciones en la composición de los muros y ladrillos, para conocer el cambio en el consumo de energía. En los estudios desarrollados por Venkatesan et al., se modificó la configuración de los ladrillos dentro del muro creando espacios vacíos, disminuyendo con esto el consumo de energía hasta un 26% (Venkatesan et al., 2022). Otro enfoque es el abordado por Abohelal et al. quienes模拟aron edificios escolares con muros compuestos por dos tipos de ladrillo, el primero siendo ladrillo rojo local y el segundo ladrillo elaborado con material de reúso, esto resultando en que la cantidad de energía necesaria para brindar el confort térmico disminuiría en 35% (Abohelal et al., 2023). Por su parte Buratti et al. y Mawra et al., modificaron los ladrillos aumentando la cantidad de vacíos dentro del mismo, agregando aerogel y fibras respectivamente. Buratti et al., obtuvieron una disminución de la conductividad de 0.310 W/m·K a 0.212 W/m·K representando una disminución del 31% (Buratti et al., 2022), mientras que Mawra llegó a estimar una conductividad de 0.29 W/m·K al agregar fibras de cáscara de coco en el proceso de elaboración de los ladrillos (Mawra et al., 2023).

En otros trabajos podemos encontrar valores de conductividad y calor específico como lo elaborado por A. Borbón et al. donde se reporta un valor de 0.814 W/m·K y 921 J/kg·K para la conductividad y el calor específico respectivamente, de ladrillo común (Borbón Almada et al., 2019). Por su parte J. Sánchez et al. reportan un valor de 0.691 W/m·°C en los ladrillos de arcilla analizados (Sánchez Molina et al., 2020) y M. Villaquirán presenta valores de 0.5352 W/m·K y 1562 J/m<sup>3</sup>·K para conductividad térmica y calor específico, respectivamente (Villaquirán-Caicedo et al., 2023).

Por su parte, el uso de las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) para la predicción de escenarios futuros ha sido utilizada en diversos trabajos. Attia y Gobin, donde se utilizaron los RCP 4.5 y 8, para estimar las horas de desconfort térmico dentro los edificios de cero emisiones, resultando en la necesidad de aumentar las medidas de diseño amigable con el medio ambiente debido a un aumento previsto en la temperatura al interior de las viviendas (Attia & Gobin, 2020). Por su parte Jiménez Torres et al. desarrollaron un análisis de los consumos previstos para 2050 y 2100 en viviendas unifamiliares en México, estimando que el consumo eléctrico, relacionado con la ventilación en México se duplicará en menos de 80 años y estableciendo una correlación entre la humedad relativa y el consumo promedio de las viviendas (Jiménez Torres et al., 2023). A propósito de esto D. Evin y A. Ucar desarrollaron el cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub>e generadas bajo diferentes combinaciones de aislantes en edificios en diferentes climas de Turquía a fin de encontrar el de mejor propiedades y espesor óptimo para cada zona climática (Evin & Ucar, 2019).

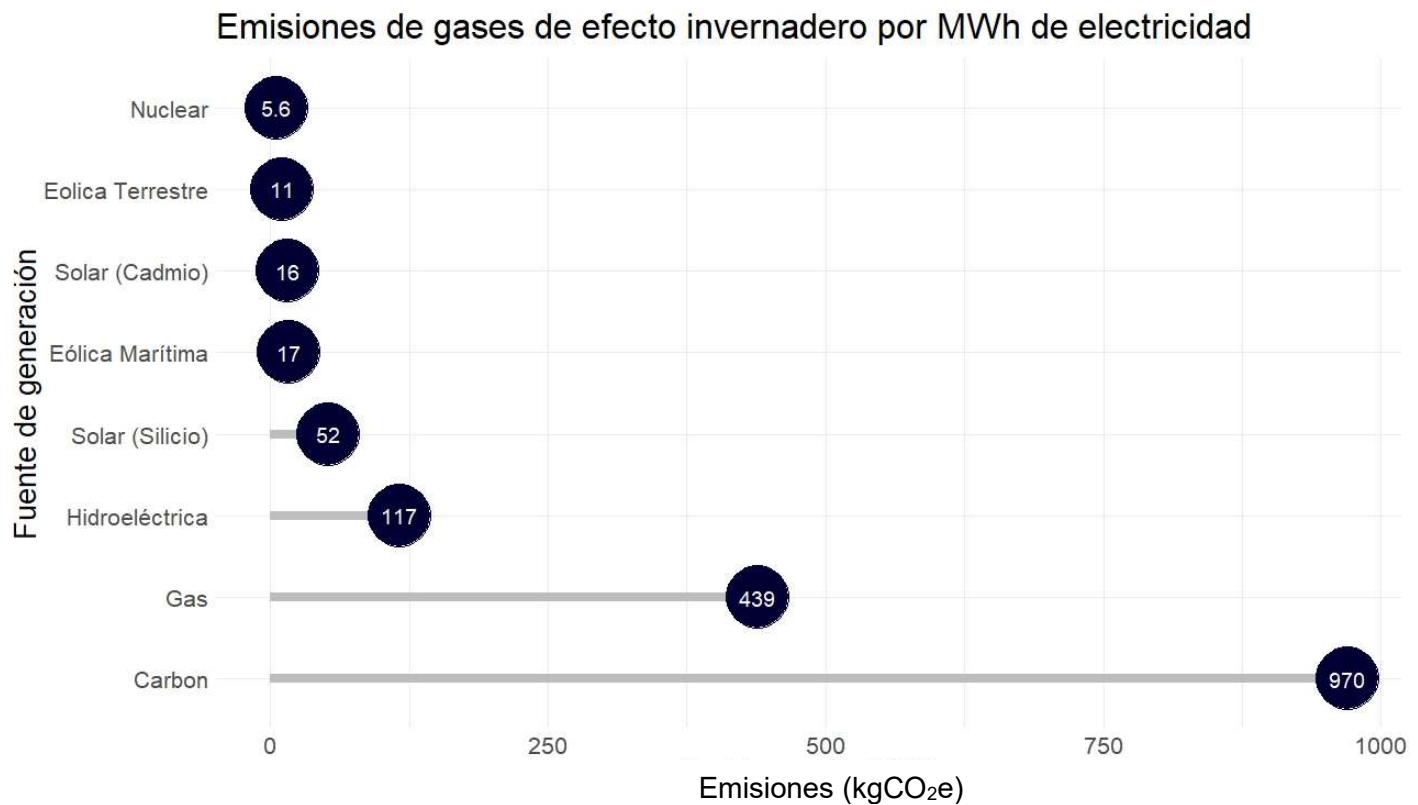
A través de estos artículos podemos darnos cuenta de la importancia que tienen para la investigación, el estudio de las propiedades térmicas de las edificaciones y por tanto de los muros y sus componentes. De igual manera podemos reconocer que el uso de la simulación, con el fin de pronosticar escenarios posibles, resulta en una herramienta útil para el análisis y diagnóstico de nuestras necesidades energéticas futuras.

Tabla 1 Estado del Arte

Año	Título del artículo	Autores
2019	Materiales reciclados aligerados y su influencia en el consumo de energía eléctrica en viviendas económicas (Borbón Almada et al., 2019).	A. Borbón, M. Alpuche, I. Miranda, I. Marincic, J. Ochoa.
2019	Energy impact and eco-efficiency of the envelope insulation in residential buildings in Turkey (Evin & Ucar, 2019).	D. Evin, A. Ucar
2020	Developing a Ceramic Construction Product under Bioclimatic and Sustainable Architecture Principles (Sánchez Molina et al., 2020).	J. Sánchez, J. Sánchez, C. Díaz.
2020	Climate Change Effects on Belgian Households: A Case Study of a Nearly Zero Energy Building (Attia & Gobin, 2020).	S. Attia, C. Gobin
2021	Evaluación del desempeño térmico de ladrillos ecoamigables con incorporación de residuos de mullita (Villaquirán-Caicedo et al., 2023).	M. Villaquirán, E. Hernández, K. Agudelo, J. Arias, M. Viera, D. Carvajal
2021	Experimental study of heat transfer coefficients on red clay brick wall (Venkatesan et al., 2022).	M. Venkatesan, M. Raja, S. Sivalakshmi, S. Suresh
2022	Thermal and acoustic performance of additive aerogel-clay bricks (Buratti et al., 2022).	C. Buratti, F. Merli, E. Belloni, F. Spaccini
2023	Thermo-physical and energy performance of building envelope modified by natural fiber through building information modelling (Mawra et al., 2023).	K. Mawra, K. Rashid, Min Ju, F. K. Alqahtani, I. Zafar
2023	Effect of Recycled Brick Mixture on Energy Efficiency in Building Exteriors (Abohelal et al., 2023).	M. Abohelal, W. Nour, I. Eldarwish, H. Dewer
2023	Tropically Adapted Passive Building: A Descriptive-Analytical Approach Using Multiple Linear Regression and Probability Models to Predict Indoor Temperature (Salleh et al., 2023).	S. Salleh, A. Suleiman, H. Daud, M. Othman, R. Sokkalingam, K. Wagner
2023	Assessment of climate change's impact on energy demand in Mexican buildings: Projection in single-family houses based on Representative Concentration Pathways (Jiménez Torres et al., 2023)	M. Jiménez Torres, D. Bienvenido-Huertas, O. May Tzuc, A. Bassam, L. J. Ricalde Castellanos, M. Flota-Bañuelos

# 1.3 Justificación

Dentro del sector energético, el uso de calor y electricidad generaron 14.8 GtCO<sub>2</sub> en 2021, de las cuales la generación de electricidad representa el 90%. Actualmente se busca efectuar una transición energética, a pesar de esto entre las fuentes de generación de energía eléctrica, el carbón representa un tercio de la generación global y el gas natural aproximadamente un 20% (International Energy Agency, 2023b). Por esta razón las emisiones generadas por cada MWh generado son un elemento a tener en cuenta.



*Ilustración 1. Emisión de gases de efecto invernadero por unidad eléctrica generada. Elaboración propia con datos de: UNECE (2021) Life cycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations Economic Commission for Europe CC BY*

Se sabe que las emisiones de gases de efecto invernadero en uso residencial y comercial, en países como Estados Unidos pueden llegar a representar hasta un 30% de las emisiones totales (United States Environmental Protection Agency, 2023), consecuentemente la mayor parte del uso doméstico de energía, responde a la búsqueda de mantener temperaturas de confort térmico dentro de las viviendas, esto se logra a través del uso de sistemas de climatización, ventiladores, extractores, etc. Lo que resulta en un ciclo donde nuestra demanda energética va en aumento, al aumentar las horas de operación y el número de equipos, lo cual trae consigo mayores emisiones que provocan un aumento de la temperatura global. Ante este panorama las opciones de mejora se basan en buscar la transición a energías con emisiones contaminantes

menores y realizar mejoras en el tejido habitacional, buscando mejorar la eficiencia energética del mismo y de los sistemas de ventilación, calefacción y aire acondicionado (HVAC).

La demanda de energía irá en aumento no solo debido a las tendencias actuales, donde se utilizan cada vez más equipos; sino que, si analizamos las condiciones del cambio climático y calentamiento global, las temperaturas se volverán extremas y fenómenos meteorológicos como sequías y olas de calor irán en aumento, será fácil prever que nuestra demanda energética aumentará, pues tendremos que enfrentarnos a situaciones cada vez más adversas. Conocer de qué magnitud será este aumento resulta complicado, pues estará en función de muchas y muy distintas variables tanto arquitectónicas, sociales y tecnológicas, como de factores climáticos y topográficos poco controlables.

Este proyecto pretende realizar un diagnóstico para conocer en qué medida las propiedades térmicas de un material de alta distribución en nuestra zona, como lo es el ladrillo recocido, pueden afectar al comportamiento de las viviendas en función a su confort térmico, y cómo se verá reflejado en el requerimiento energético de la vivienda, y finalmente en las emisiones operativas de la misma, este diagnóstico se ve como una labor de mayor impacto si consideramos lo presentado en el documento Estado y perspectiva del cambio climático, el estado de Durango excederá el umbral de 2 °C de incremento de temperatura en 2032 con el RCP 8.5 y 2045 con el RCP 4.5 (Porrua et al., 2023).

A través de este proyecto se realizará un análisis de las propiedades térmicas de ladrillos locales, para conocer el comportamiento térmico del mismo en el contexto de las condiciones climáticas de la zona; además, se analizará una estructura habitacional típica, a través de la cual se simularán condiciones climáticas con distintas trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés), las cuales fueron definidas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), con el fin de conocer el comportamiento térmico y energético de la vivienda.

El análisis y simulación del comportamiento de los materiales de construcción y por tanto de las viviendas ante posibles escenarios, nos dará la posibilidad de realizar mejoras en el dimensionamiento y planeación de las viviendas, en búsqueda de que estas tengan el mejor comportamiento posible, en función a su eficiencia energética y habitabilidad, lo cual se reflejará en una disminución en las emisiones operativas a causa del uso de equipos de aire acondicionado y una mejor calidad de vida para las familias.

## **2.1 Hipótesis**

A través del estudio de las propiedades termofísicas de los ladrillos regionales y su incorporación en viviendas típicas será posible estimar la diferencia en las emisiones de CO<sub>2</sub>e producto de mantener condiciones de confort térmico bajo las Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs) al 2050 y 2100.

## **2.2 Objetivo general**

Establecer las emisiones de CO<sub>2</sub>e generadas al aplicar ladrillos regionales en viviendas típicas bajo escenarios de cambio climático.

### **2.2.1 Objetivos específicos**

- Identificar zonas de producción de ladrillo rojo recocido y sus características principales.
- Conocer las propiedades térmicas y mecánicas de ladrillos de producción local.
- Establecer modelos de vivienda típicos para estimar por medio de la simulación el requerimiento energético y emisiones al 2050 y 2100.

## 2.3 Marco teórico

### 2.3.1 Cambio climático

El cambio climático de acuerdo a lo establecido por la Organización de las Naciones Unidas, en el Artículo 1 de la Convención en torno al cambio climático, se puede definir como el cambio en las temperaturas medias del planeta por causa antropogénica con respecto a las medias históricas (United Nations, 1992), este fenómeno ha sido documentado ampliamente en las últimas décadas. De acuerdo a lo presentado en el Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas existe un aumento en la temperatura al 2019 de 1.07 °C (0.8 °C a 1.3 °C) (Lee et al., 2022), el cual en casi su totalidad puede ser atribuido a nuestras actividades.

Se tiene por objetivo que este aumento en la temperatura no llegue a ser mayor a 1.5 °C para el año 2050, esta medida se ha tomado porque se ha documentado que un aumento en la temperatura global de esa magnitud traería consigo efectos difíciles de controlar como son menores períodos entre variabilidades climáticas, aumento del nivel del mar, sequías, pérdida de las coberturas polares, entre otros (Lee et al., 2022). Debido a la preocupación causada por este cambio la humanidad ha realizado diversas cumbres, acuerdos y protocolos con el fin de contrarrestar este fenómeno. Entre los de mayor importancia encontramos:

Tabla 2 Protocolos y convenios ambientales

Protocolos y Convenios	Año	Objetivo
Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Flora y Fauna Silvestres (CITES)	1975	A través de este se buscaba regular el comercio y distribución de 36.000 plantas y animales en peligro de extinción.
(Lee et al., 2022) Convención del Patrimonio Mundial	1975	Establece las ubicaciones de los patrimonios mundiales y naturales, los cuales a partir de su declaración son susceptibles a recibir apoyos financieros para su conservación.
Protocolo de Montreal	1989	Busca reducir las emisiones de las sustancias que degradan la capa de ozono.
Convenio sobre la Diversidad Biológica (CBD)	1993	Promueve la conservación ambiental y la sostenibilidad enfocándose en un sistema de costo beneficio.
Protocolo de Kioto	1997	Propone las metas de reducción a las emisiones de gases de efecto invernadero, en el participan 197 países.
Acuerdo de París	2016	Busca controlar y desacelerar el aumento de la temperatura promedio global. Control de emisiones

## 2.3.2 Emisiones

Este es el término utilizado para hacer referencia a algún contaminante que se encuentra en el ambiente en estado gaseoso o en forma de vapor, debido a su presencia la primera capa que se ve afectada es la atmósfera (Center for Climate and Energy Solutions, 2016). En este caso centraremos nuestra atención a aquellos que aumentan el llamado efecto invernadero, en otras palabras, estos son contaminantes que por sus propiedades impiden que el calor escape de nuestra atmósfera, provocando con esto un aumento en la temperatura global, ejemplos de estos son mencionados en la tabla 3, así como su potencial de calentamiento global y su vida atmosférica.

Tabla 3 Principales gases de efecto invernadero

Gas de efecto invernadero	Fórmula química	Potencial de calentamiento global (kgCO <sub>2</sub> e)	Vida atmosférica (años)
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	1	100
Metano	CH <sub>4</sub>	25	12
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	265	121
Clorofluorocarbono 12	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	10,200	100
Hidrofluorocarbono 23	CHF <sub>3</sub>	12,400	222
Hexafluoruro de azufre	SF <sub>6</sub>	23,500	3,200
Trifluoruro de nitrógeno	NF <sub>3</sub>	16,100	500

Las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con el sector de los edificios son aproximadamente un tercio de las emisiones totales anuales, generando 3 Gt de CO<sub>2</sub> de manera directa durante el uso de los edificios. Se generan 6.8 Gt de CO<sub>2</sub> de manera indirecta a través de la generación de la energía demandada en los mismos y 2.5 Gt de CO<sub>2</sub> relacionadas con la construcción de estos (International Energy Agency, 2023a). Estas emisiones antes mencionadas se pueden dividir en dos categorías principales, operativas e incorporadas, las emisiones operativas son aquellas que resultan de la fase de uso de la edificación y están relacionadas a los bienes y servicios utilizados durante esta fase, por su parte las emisiones incorporadas son aquellas generadas durante el ciclo de vida de la edificación para la obtención de materias primas, la construcción de la edificación y la disposición de la misma.

Es debido a esta gran cantidad de emisiones asociadas al sector de los edificios que se vuelve necesario replantear y estudiar los métodos constructivos actuales, así como el diseño y planeación de los edificios. Los materiales utilizados para la construcción requieren ser analizados en función de las emisiones que generan en su ciclo de vida y sus propiedades para generar envolventes que permitan disminuir el requerimiento energético de las estructuras durante su funcionamiento.

## 2.3.3 Cambio climático en México

Debido a sus características físicas, culturales y sociales, México se puede establecer como vulnerable ante el cambio climático, México tiene una megadiversidad desarrollada en 1,960 millones de kilómetros cuadrados y una distribución del capital desigual, lo cual propicia que el impacto del cambio climático sea variable de región a región. Dentro del territorio nacional se pueden identificar como áridos dos tercios de la superficie y húmedo en el tercio restante.

El clima se ve regido por la accidentada topografía, los cinturones latitudinales de circulación atmosférica, fenómenos como huracanes en las costas del Caribe y Pacífico y los monzones generados en el verano.

El aumento en fenómenos de variabilidad climática tiene un gran efecto sobre la población. Esto es debido a que existe una gran variedad de servicios ambientales que tienen impacto sobre la economía del país y calidad de vida (calidad del aire, calidad y suministro de agua, el uso de suelo, conservación de cadenas tróficas), mismos que presentan grandes cambios conforme se agudiza el cambio climático (Rodríguez Moreno et al., 2021).

Cómo parte de los parámetros que se han medido para dimensionar el impacto del cambio climático se encuentra la temperatura media anual; la cual presenta un aumento de entre 1.59 °C y 1.81 °C con respecto de la del siglo XX. Por si sola, esta es una razón para considerar alarmante el aumento en México ya que este se encuentra sobre el aumento global que es de 1.23 °C para el mismo periodo de tiempo. Este cambio no es homogéneo sobre todo el territorio, ni durante todo el año; siendo mayor el aumento en el norte del país. Otro parámetro de interés del cual se ha medida su variación con respecto al siglo pasado es la precipitación la cual presenta un aumento si la analizamos de manera nacional, pero con la peculiaridad de que disminuyó en la región norte y aumentó en el sur del país (Rodríguez Moreno et al., 2021).

México cuenta con una Política Nacional de Cambio Climático; misma que tiene por objetivos disminuir la vulnerabilidad ante el cambio climático en el enfoque social, aumentar la resiliencia de la infraestructura y los sistemas de producción y desarrollar una política de conservación de los ecosistemas. Esta política fue evaluada por primera y última vez en 2018, en esta evaluación se reportó que el 43% de las líneas de acción se encontraban en funcionamiento, 28% tiene rezagos y el resto no contaban con datos de su existencia o avances en las mismas.

## **2.3.4 Panel intergubernamental de expertos sobre el cambio climático**

Es un órgano internacional formado en 1988 por iniciativa del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la Organización de las Naciones Unidas (ONU), que tiene como objetivo evaluar las producciones científicas, técnicas y socioeconómicas relacionadas con el cambio climático. En la actualidad cuenta con 195 países miembros, así como ONGs y organismos internacionales que actúan como observadores.

A pesar de ser una organización científica no desarrolla investigaciones ni supervisa los datos relativos al clima, su labor principal es la de elaborar informes sobre el cambio climático, los cuales se desarrollan a través de periodos largos (5 a 6 años), dichos informes tienen relevancia al proporcionar información tomando en cuenta los diversos puntos de vista científicos, siendo objetivos, plurales y transparentes; para el desarrollo de cada informe se aprueba un esquema del contenido del informe, posteriormente se nomina a elementos de la comunidad científica que destaque en los temas a tratar para ser autores de este, quienes desarrollan borradores del informe que son sometidos a rigurosas y numerosas revisiones por pares y gobiernos, hasta obtener la aprobación formal del mismo (Intergovernmental panel on climate change, n.d.).

El IPCC cuenta con tres grupos de trabajo y un equipo especial, los cuales están enfocados a diferentes temas relacionados al cambio climático.

- Aspectos físicos y científicos del sistema climático.
- Vulnerabilidad de los sistemas socioeconómicos y naturales.
- Opciones para mitigar el cambio climático.
- Equipo especial, se encarga del programa de inventario de emisiones de gases de efecto invernadero.

## **2.3.5 Trayectorias de Concentración**

### **Representativas (RCPs)**

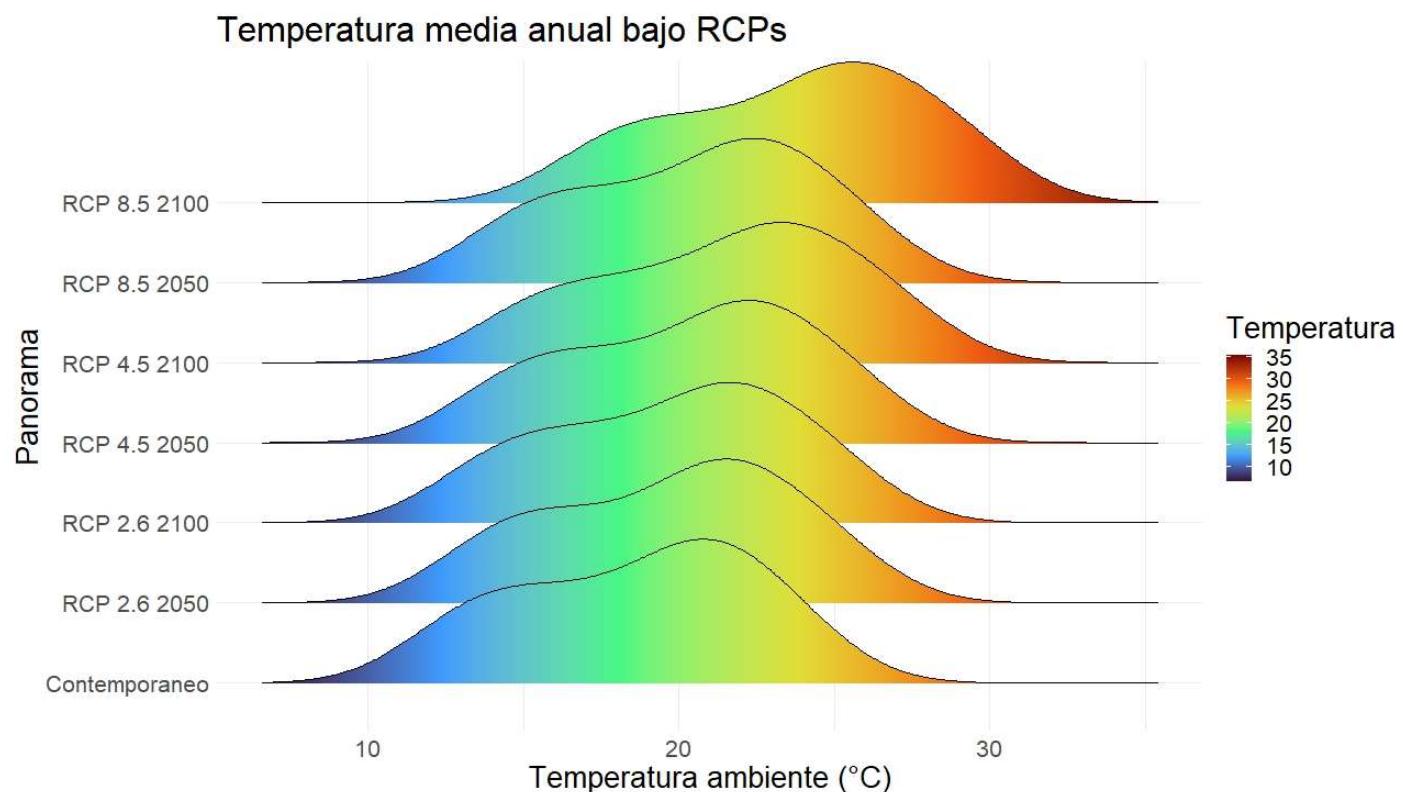
Con el fin de encontrar una guía de lo que sucederá en lo referente al cambio climático, se realizaron diferentes escenarios que se reflejaron en las trayectorias de concentración representativas (RCP), las cuales engloban diversas suposiciones, con respecto a nuestro actuar sobre nuestras emisiones. Las RCP hacen

referencia a la concentración de gases de efecto invernadero y que cambios posiblemente causarán en el clima.

Existen cuatro RCP iniciales 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5. Donde los números hacen referencia al forzamiento climático ejercido por los gases de efecto invernadero, que es la cantidad de energía absorbida por la tierra que no es reflejada al espacio y se manifiesta como un aumento en la temperatura, teniendo por unidades el W/m<sup>2</sup>.

*Tabla 4 Tabla de efectos en cambio de temperatura y nivel del mar para cada RCP. (“Representative Concentration Pathway,” 2021)*

RCP	Cambio en temperatura (°C)		Aumento en el nivel del mar (m)	
	2046-2065	2081-2100	2046-2065	2081-2100
2.6	1.0 (0.4-1.6)	1.0 (0.3-1.7)	0.24 (0.17-0.32)	0.40 (0.25-0.55)
4.5	1.4 (0.9-2.0)	1.8 (1.1-2.6)	0.26 (0.19-0.33)	0.47 (0.32-0.63)
6.0	1.3 (0.8-1.8)	2.2 (1.4-3.1)	0.25 (0.18-0.32)	0.48 (0.33-0.63)
8.5	2.0 (1.4-2.4)	3.7 (2.6-4.8)	0.30 (0.22-0.38)	0.63 (0.45-0.82)



*Ilustración 2 Panoramas de temperatura media para 2050 y 2100 con las distintas RCP. Elaboración propia con datos extraídos de Meteonorm.*

## **2.3.6 Impacto del uso de energía**

Las viviendas son uno de los espacios donde se consume una gran cantidad de energía, el uso habitacional cuenta para aproximadamente el 30% del consumo final de la energía producida y el 26% de las emisiones globales relacionadas con energía (International Energy Agency, 2023a), teniendo también una distribución poco normal, puesto que el 10% de las viviendas con mayores emisiones contribuye con aproximadamente del 34-45% de estas emisiones y siendo las ciudades donde se concentra entre 67-72% de estas emisiones (UN-Habitat, 2022). Con esto podemos inferir una baja democratización en el uso de energías, además de que nos podemos dar cuenta que los sectores de mayor ingreso son también aquellos de mayor demanda.

## **2.3.7 Vivienda en México**

México cuenta con más de 35 millones de viviendas habitadas, de las cuales más del 90% de ellas cuentan con acceso a electricidad, saneamiento y agua de acuerdo con el INEGI en el 2020. En contraparte a esto, también 9.41 millones de viviendas se encontraban con rezago habitacional en 2018 (INEGI, n.d.).

Por lo que existe una necesidad de mantenimiento o modernización de la vivienda en México. Este problema tiene una de sus causas en la cantidad de asentamientos irregulares, entre 6.3 millones y 7.5 millones de personas se encuentran en esta situación (Pedro Kumamoto, 2024), lo cual es a su vez producido en buena parte por el sector económico informal en México. A través de la política en vivienda ejercida entre 2013 a 2018 podemos ver que el sector de la autoconstrucción, ampliación y modernización se encuentra desfavorecido, puesto que el 66% de los apoyos brindados en este periodo fueron a vivienda nueva formal (Pablo Ampudia, 2020).

Asimismo, existe un déficit entre el número de viviendas requeridas y las producidas, además de que, debido a factores económicos y políticos, la producción migró de la construcción de casas para la población de bajos recursos a aquella destinadas a un nivel de ingresos medio o alto.

De acuerdo con UN Hábitat 14 millones de familias carecen de vivienda y en el reporte “Enfrentar el Desafío de la Vivienda en América Latina”, se menciona que se necesitan 2.2 millones de viviendas accesibles para la población de bajos recursos. El acceso a una vivienda en México se va complicando debido al aumento de los costos de estas, esto se ve provocado por un aumento en la demanda debido al crecimiento demográfico y una producción deficiente, de acuerdo al Sistema Nacional de Información e Indicadores de Vivienda (SNIIIV), el registro de viviendas en México disminuyó 24.45% del 2019 al 2022 (Samanta Escobar, 2024)

## 2.3.7.1 Organismos que regulan la vivienda

En México existen instituciones gubernamentales que facilitan la adquisición de viviendas por parte de la población, como lo son INFONAVIT, FOVISSSTE y CONAVI. Estas instituciones son las encargadas de suministrar y administrar créditos hipotecarios de sus derechohabientes, es por esto que antes de gestionar los créditos, se verifica que las viviendas cumplan con estándares y normativas para su habitabilidad. En contraparte a esto, la vigilancia de que los proyectos de edificación sean realizados de acuerdo con los códigos y normativas vigentes, es menester de las autoridades municipales de cada localidad, pues son ellos quienes expiden los permisos de construcción requeridos, además de monitorear activamente la ciudad a fin de evitar construcciones fuera de los reglamentos de construcción.

## 2.3.7.2 Tipos de viviendas

La clasificación que se utiliza con mayor frecuencia es la desarrollada por el INFONAVIT y utilizada en las métricas de Registro Único de Viviendas, que a partir de 2018 clasifica las viviendas según su valor y de acuerdo con las Unidades Medias de Actualización en 8 categorías.

Tabla 5 Clasificación de viviendas según su valor (*Registro Único de Vivienda, 2019*)

Clase	Valor (UMAS)
Económica	0-118
Popular B1	118-128
Popular B2	128-158
Popular B3	158-200
Tradicional	200-350
Media	350-750
Residencial	750-1500
Residencial plus	más de 1500

## **2.3.7.3 Construcción de vivienda y normativa**

Existen en México un conjunto de normas enfocadas a la eficiencia energética en edificaciones, las cuales son elaboradas por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), esta normativa se puede resumir como:

- NOM-018-ENER-2011- Aislantes térmicos para edificaciones: Establece la metodología para medir las propiedades de aislantes térmicos usados en México (Gobierno de México, 2017).
- NOM-020-ENER-2011- Eficiencia energética en edificaciones, Envolvente de edificios para uso habitacional: Tiene por objetivo disminuir las ganancias de calor y con ello la energía requerida para acondicionar los espacios a un confort térmico (Gobierno de México, 2017).

## **2.3.8 Envolvente térmica**

La envolvente térmica de una edificación hace referencia a los elementos que forman un límite entre el ambiente exterior y los espacios habitables, por tanto está conformada losas, muros, cubiertas, columnas, puertas, ventanas, balcones, huecos, lucernarios y otros; la principal función de la envolvente térmica es ser una protección de las condiciones ambientales, por tanto debe ser una barrera ante la entrada de agua, controlar los flujos de calor con el ambiente y la salida de vapor, evitar las corrientes de aire y proveer de aislamiento acústico a la edificación (Sisternes García, 2022).

## **2.3.9 Transferencia de calor a través de muros**

Los materiales que constituyen un muro se vuelven de vital importancia cuando se busca determinar la transferencia de calor global de un edificio. El coeficiente general de transferencia de calor ( $U$ ) se puede utilizar para describir su rendimiento térmico de forma simplificada. La ecuación para calcular la transferencia de calor es  $Q=UA(T_1-T_0)$  (Cengel, Yunus, Ghajar, 2023), donde  $Q$  es la tasa de transferencia de calor,  $A$  es el área,  $T_1$  y  $T_0$  son las temperaturas interior y exterior, y  $U$  es coeficiente de transferencia total; el cual se determina como la inversa de la resistencia térmica  $R$ . Cuando se analiza la resistencia térmica de un muro, se suma la resistencia de las diferentes capas de las paredes que la integran para determinar el valor  $R$  de la pared, pero cuando una capa está compuesta por más de un material se vuelve necesario suponer planos isotérmicos normales al flujo de calor.

El valor U se ve afectado principalmente por el ancho del material (L) y la conductividad térmica del mismo ( $\lambda$ ), los cuales son los principales factores para determinar la transferencia de calor por conducción. Por su parte, la transferencia de calor por convección y radiación en las superficies expuestas se puede incorporar en la conductancia de la superficie interna y externa ( $h_i$  y  $h_o$ ). Las conductancias se pueden determinar mediante experimentación o se pueden seleccionar de la literatura. Por ejemplo, del Manual de Fundamentos de ASHRAE (ASHRAE, 2017), donde se pueden recuperar valores para superficies ordinarias y reflectantes.

## **2.3.10 Propiedades de los ladrillos**

En el ámbito de la construcción las propiedades que son analizadas comúnmente para la selección de un material de mampostería son las físicas y mecánicas, que hacen referencia a la resistencia a los esfuerzos de compresión y el porcentaje de absorción de agua característico para un material; características enfocadas a su comportamiento termofísico, tales como conductividad térmica y calor específico, no son determinadas usualmente.

### **2.3.10.1 Absorción de agua**

Es la propiedad que tiene un material de absorber agua en sus poros ya sea por inmersión total en relación con su masa (porcentaje de absorción) o a través de capilaridad por una de sus caras en un periodo determinado (absorción inicial). Está relacionada directamente a propiedades como la permeabilidad y retención de agua del material y tiene incidencia con factores como la durabilidad y resistencia del mismo (ONNCCE, 2013b).

### **2.3.10.2 Resistencia a la compresión**

Los ladrillos como elementos estructurales de las edificaciones deben cumplir con ciertas características mecánicas para considerarse aptos para su uso, en México estas características están especificadas en la NMX-C-404-ONNCCE-2012 Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural – especificaciones y métodos de ensayo, en la cual se establece la resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) mínima (capacidad de carga por unidad de área), que deben presentar los mismos (ONNCCE, 2012).

## **2.3.10.3 Propiedades termofísicas de los ladrillos.**

Los ladrillos al formar parte de la envolvente térmica brindan sus propiedades termofísicas a la misma, al ser aquellos que volumétricamente representan la mayor parte del muro son un elemento de vital importancia y por ello se debe estimar sus propiedades termofísicas, como los son:

- Conductividad térmica. Es la capacidad de transmitir el calor a través de sus moléculas de un material ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ).
- Calor específico. Es la energía necesaria para elevar en un grado Kelvin la temperatura de un kg de un material ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ).

## **2.3.11 Herramienta de Simulación de Sistemas Transitorios (TRNSYS)**

Es un software desarrollado para la simulación energética, utilizado en un inicio para la evaluación de sistemas de energía solar, y que debido a su flexibilidad y gran capacidad para analizar procesos transitorios ha sido utilizado para diferentes fines tales como; simulación de edificios, procesos térmicos y eléctricos en una edificación; sistemas solares y eólicos, simulación de múltiples sistemas solares fotovoltaicos, eólicos y solares de alta temperatura; geotermia, la simulación en el proceso técnico y térmico; modelado de flujos, con lo que se puede conocer el comportamiento de fluidos como el agua y aire.

Este software trabaja con dos secciones Kernel, una que se encarga de procesar los datos ingresados y realizar los cálculos, y otra que es una biblioteca de componentes, estos componentes son aquellos que representan los procesos dentro de la simulación; además, estos componentes pueden ser agregados a través de formatos ejecutables DLL y ser programados a través de C++ y Delfi-FORTRAN (TRNSYS, 2019).

### 3. Metodología

La metodología se llevó a cabo a través de dos etapas principales, una etapa de determinación de propiedades y una de simulación. La etapa de determinación de propiedades comprende el diseño de experimentos, a través del cual fue posible establecer el tamaño de muestra adecuado; la recolección de muestras y la adecuación de estas de acuerdo a las pruebas a las que fueron sometidas. Las propiedades determinadas fueron absorción de agua, resistencia a la compresión, calor específico y conductividad térmica. Al finalizar esta etapa, se realizó un análisis de los resultados donde se contrastaron los valores de las propiedades contra materiales similares de la literatura.

Para la segunda etapa, simulación, se seleccionaron las tipologías de las viviendas y las Rutas de Concentración Representativas (RCPs). A partir de los resultados de la primera etapa, se establecieron los materiales de las envolventes térmicas de las viviendas y se desarrolló un análisis de los diversos parámetros necesarios para la simulación (ganancias de calor, infiltración y rangos de confort). Finalmente, se establecieron los casos de estudio a desarrollar, mismos que fueron simulados en el programa TRNSYS.

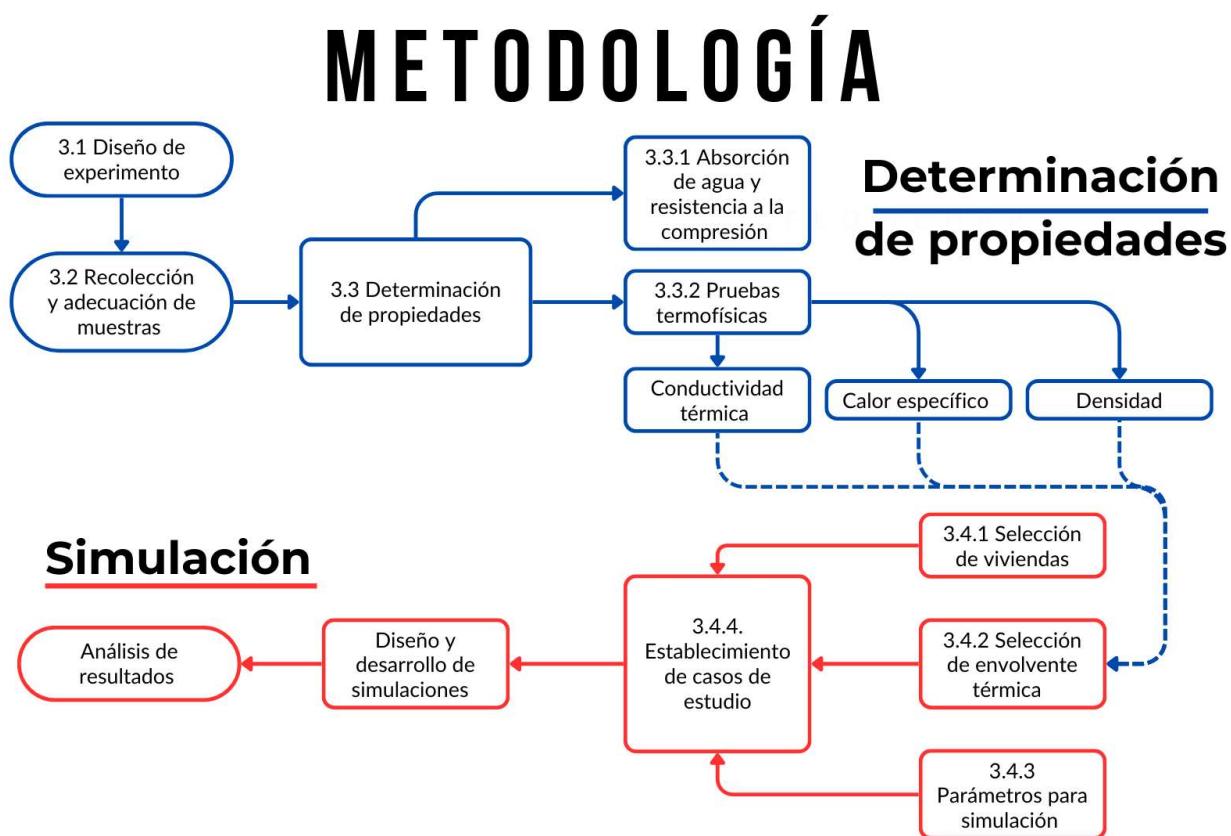


Ilustración 3 Metodología del proyecto

# 3.1 Diseño de experimento

## 3.1.1. Selección de ladrilleras

De acuerdo con información disponible de la Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente del Estado de Durango (SRNyMA), el cuadrante sureste de la ciudad de Durango cuenta con el 69% de los productores ladrilleros (Ilustración 4). Estos se concentran principalmente en las colonias Valle del Guadiana, Jardines de Cancún, San Carlos, ejido Benito Juárez, ampliación las Rosas, J. Guadalupe Rodríguez, Industrial Ladrillera y Real Victoria (Gobierno del Estado de Durango, 2006).

Al tratarse de una de las zonas de mayor concentración de ladrilleras se decidió analizar las propiedades de los materiales que se producen en esta zona. En este punto se procedió a entrevistar a los productores para conocer las características de su labor, finalmente se seleccionaron tres productores. Los tres productores fueron seleccionados debido a que se identificó que se proveían del mismo banco de material, además de contar con procesos similares de producción (proceso tradicional).

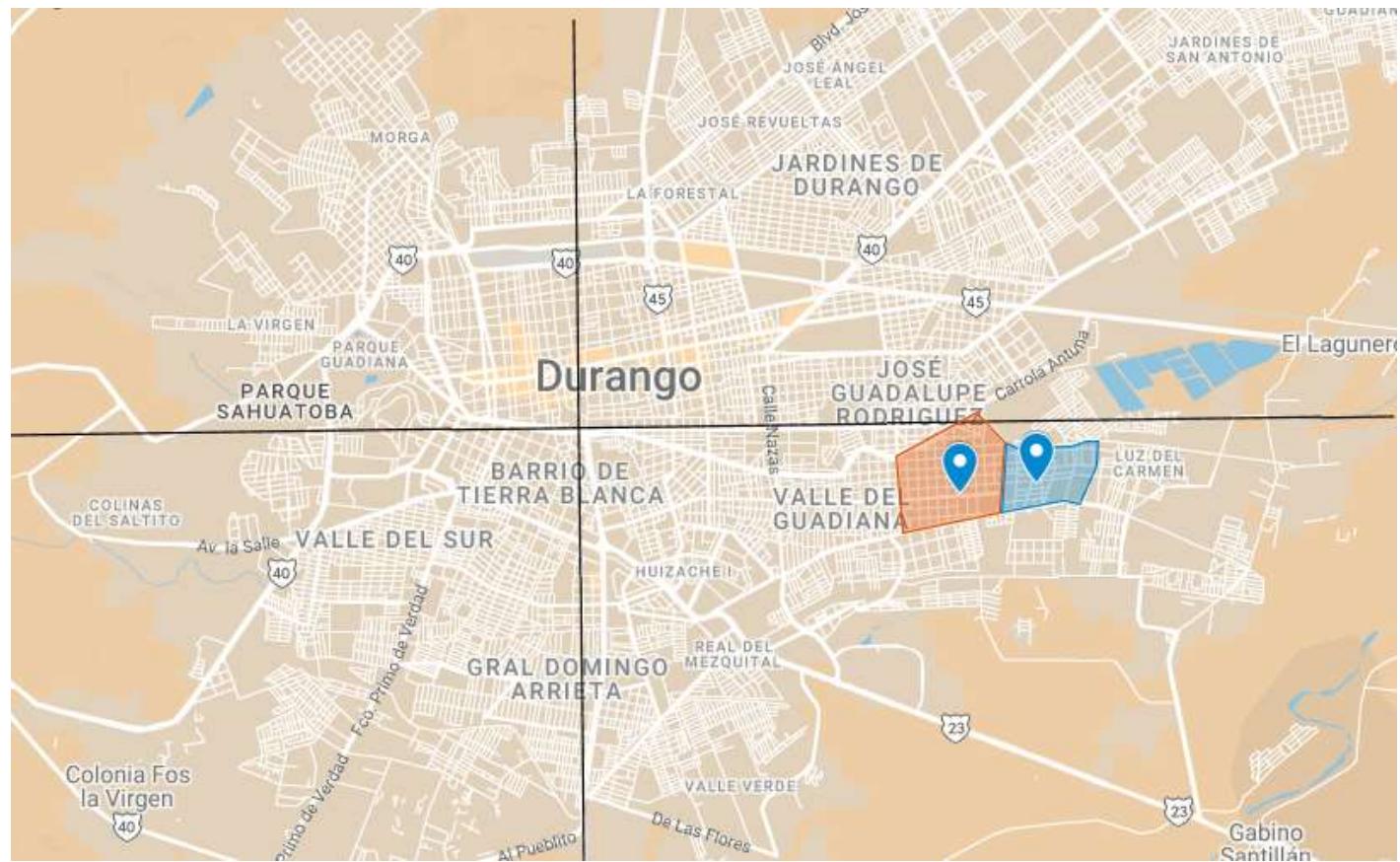


Ilustración 4 Zonas de producción de ladrillo seleccionadas

De manera adicional, se seleccionaron dos productores quienes cuentan con métodos de elaboración diferentes al tradicional. El primer material seleccionado fue uno que se comercializa de forma local y corresponde a un ladrillo producido de manera mecanizada en la ciudad de Monterrey. El segundo material corresponde a un productor local que elabora tabiques no horneados, comercializados bajo el nombre de “ladrillo térmico”.

### 3.1.2. Tamaño de muestra

Para seleccionar el tamaño de muestra adecuado para las pruebas térmicas, debido a que no existe una normativa nacional que lo indique, se decidió realizar el cálculo de un análisis de varianza de medias de una vía de la propiedad de mayor interés que es la conductividad térmica, con el fin de conocer si esta propiedad presenta una diferencia significativa entre los productores.

Esto se realizó a través del software Minitab, utilizando la metodología para establecer el tamaño mínimo de muestra para un análisis de varianza de media de una vía, en el que se estableció una potencia de prueba de 0.9 y se tomó como una diferencia significativa el valor de 0.1, esto debido a que en la revisión de literatura fue notorio que valores de 0.1 (Buratti et al., 2022), 0.18 (Borbón Almada et al., 2019) o 0.6 (Abohelal et al., 2023) representan un impacto en el consumo energético de las viviendas, para la selección de la desviación estándar se tomó en cuenta que autores reportan un valor de 0.02 (Buratti et al., 2022; Munir et al., 2018) y con la intención de ser mesurados se eligió un valor de 0.4, con estos valores se obtuvo un tamaño mínimo de muestra igual a 6, con esta información y a fin de disminuir la varianza de los datos se optó por tomar 10 piezas para cada muestra.

El tamaño de muestra para las pruebas de absorción de agua y resistencia a la compresión se hizo en concordancia con las normas NMX-C-036-ONNCCE-2013 (ONNCCE, 2013a) y NMX-C-037-ONNCCE-2013 (ONNCCE, 2013b), donde se establece un tamaño de muestra mínimo de 5 y 3 piezas respectivamente, se seleccionó un tamaño de muestra de 5 para la prueba de absorción de agua y para la prueba de resistencia a la compresión se seleccionó un tamaño de 10 para empatar con el tamaño seleccionado para las pruebas térmicas.

## 3.2 Recolección y adecuación de muestras

La recolección de muestras se llevó a cabo de manera que todas las muestras fueran extraídas de un solo lote de producción. Es común que la producción de ladrillos sea ordenada en montículos compuestos por 1000 ladrillos los cuales son dispuestos en el patio de almacén. Para la toma de muestras se seleccionaron montículos al azar, de los cuales se tomaron tres muestras, cada uno de una altura diferente dentro del

montículo y de una cara diferente. Esto con el fin de buscar que las muestras fueran lo más aleatorias posibles y procedieran de diferentes zonas en el arreglo utilizado durante el proceso de cocción.

Posteriormente se realizó un proceso de adecuación de las muestras, según las pruebas a las que sería sometida cada muestra.

Las muestras objeto de análisis de las propiedades de conductividad térmica y calor específico, se ajustaron a dimensiones menores a 15 cm x 15cm x 5 cm. Estas las dimensiones permiten que las muestras sean evaluadas primero en el equipo FOX 200, –el cual es un medidor de flujo de calor. Posteriormente estas muestras fueron perforadas para llevar a cabo la medición del calor específico en el equipo Tempos, –analizador de propiedades térmicas.

Las muestras (50), fueron llevadas a peso constante, secándose por un mínimo de 24 horas a 105 °C, verificando que la variación en masa no fuera mayor al 0.2% de la masa inicial de la muestra. Una vez que se cumplió con el criterio de secado, las muestras fueron almacenadas en bolsas selladas para evitar que ganaran humedad. De manera paralela a esto se hizo una medición y etiquetado de las muestras a fin de caracterizarlas en función a su volumen, masa y densidad.

Las muestras objeto a estimar su absorción de agua (25), fueron llevadas a peso seco por el método antes descrito y para aquellas muestras analizadas mecánicamente (47), se verificó que no contaran con fracturas y se almacenaron en un espacio a temperatura ambiente y con baja humedad.

## **3.3 Determinación de propiedades**

### **3.3.1 Porcentaje de absorción y resistencia a la compresión.**

Se siguió el procedimiento establecido en la norma NMX-C-037-ONNCCE-2013, Determinación de la absorción total y la absorción inicial de agua en bloques, tabiques o ladrillos y tabicones – Método de ensayo (ONNCCE, 2013b), con el fin de determinar los valores de absorción inicial y porcentaje de absorción de las muestras.

Se llevaron a peso constante; secándose a 105 °C, cuidando que en mediciones sucesivas la diferencia no fuera mayor al 0.2% de la masa. Se registró la masa de la muestra seca ( $M_s$ ), posteriormente fueron sumergido una de las caras de la muestra, quedando 5 mm por debajo del nivel del agua por 10 minutos, y registrado el peso ( $M_1$ ), a continuación, se aplicó la ecuación 1:

$$Cb = \frac{100(M_1 - M_s)}{S\sqrt{10}} \quad (1)$$

donde  $Cb$  es el coeficiente de absorción inicial en  $g/(cm^2 \times min^{0.5})$ ,  $M_s$  la masa seca de la muestra,  $M_1$  la masa húmeda, y  $S$  la superficie sumergida.

Para la determinación del porcentaje de absorción las muestras fueron sumergidas totalmente por 24 horas, después se pesaron y se aplicó la ecuación 2:

$$A = \frac{M_{sss} - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (2)$$

Donde  $A$  es el porcentaje de absorción de la muestra,  $M_{sss}$  la masa húmeda de la misma y  $M_s$  la masa seca.

De igual manera se realizó el ensayo de las muestras a fin de determinar su resistencia a la compresión ( $fp$ ), lo cual se desarrolló con la prensa de carga axial en el Laboratorio Ciencias Químicas Universidad Juárez del Estado de Durango.

La medición se realizó aplicando cargas entre  $84kg/cm^2/min$  a  $210kg/cm^2/min$  sobre la superficie de la pieza, hasta alcanzar la carga máxima soportada por la misma. Se registró esta medición y se calculó el esfuerzo a compresión de acuerdo con la ecuación 3, establecida en la norma NMX-C-036-ONNCCE-2013 Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines – Método de ensayo (ONNCCE, 2013a).

$$fp = \frac{P}{A} \quad (3)$$

Donde  $fp$  es la resistencia a la compresión de la muestra (MPa),  $P$  es la carga máxima (N) y  $A$  es el área de bruta transversal a la carga ( $mm^2$ ). Los valores fueron comparados con los valores mínimos establecidos para los bloques de uso estructural en la NMX-C-404-ONNCCE-2012, Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural – especificaciones y métodos de ensayo (ONNCCE, 2012).

### 3.3.2 Pruebas termofísicas

Para el desarrollo de estas pruebas se verificó que las muestras se encontrarán en peso constante y se buscó disminuir la posibilidad de que la humedad del ambiente afectara las muestras sellándose en bolsas después del proceso de secado y manteniéndose almacenadas en un espacio cerrado y a temperatura ambiente.

Se estima la densidad de las muestras como primer paso, utilizando para ellos el cálculo de sus dimensiones como lo establece la norma NMX-C-038-ONNCCE-2013 (ONNCCE, 2013a), con lo que se pudo establecer el volumen de las mismas, utilizando una báscula se estimó la masa de cada muestra y se utilizó la fórmula que se muestra a continuación:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Donde  $\rho$  es la densidad de la muestra,  $m$  es la masa y  $V$  es el volumen de la misma.

La medición de conductividad térmica de las muestras fue realizada con el instrumento de medición de conductividad térmica FOX 200 de la marca TA Instruments, mostrado en la ilustración 5. El equipo opera bajo la norma ASTM C518 (Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus) (ASTM\_Standard\_C518-15, 2015) y fue calibrado con un espécimen de 200 x 200 mm de poliestireno expandido (EPS) #17071335. (Apéndice 1, 2 y 3)



Ilustración 5 Equipo FOX 200

El equipo cuenta con una placa fría y una caliente, que se encuentran en la parte inferior y superior y se basa en la ley de Fourier en un plano, ecuación 4:

$$q = -K \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

donde  $q$  es el flujo de calor ( $\text{W/m}^2$ ),  $K$  la conductividad de la muestra ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ) y  $dT/dx$  es el gradiente de temperatura ( $\text{K/m}$ ), el cual puede ser determinado midiendo la diferencia de temperatura en la placa superior e inferior del equipo y el espesor de la muestra, debido que para este caso  $dT/dx$  es igual a  $-\Delta T/\Delta x$ .

Debido a que las mediciones de temperatura se realizan a través de transductores, es necesario calibrar el equipo con un material de conductividad térmica conocida para así establecer un factor de calibración dependiente de la temperatura ( $S_{\text{cal}}$ ) para cada uno de los transductores, mismo que se será utilizado en la ecuación de cálculo de conductividad térmica que es:

$$K_{prueba} = S_{cal} T_{prueba} Q \frac{\Delta x_{prueba}}{\Delta T_{prueba}} \quad (6)$$

Las mediciones se realizaron por triplicado a temperatura promedio de 24 °C, con una diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) de 15 °C.

La determinación del calor específico se realizó con un sensor tipo aguja (TEMPOS, Meter Group) el cual tiene una sonda de doble aguja tipo SH3, mostrado en la ilustración 6. El TEMPOS es capaz de realizar mediciones de calor específico, resistencia térmica y difusividad térmica en materiales como arcillas, concreto, alimentos, plásticos, entre otros. El sensor cumple con la ASTM 5334 (Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock by Thermal Needle Probe Procedure) (ASTM International, 2022) y la IEEE 442 (IEEE Guide for Thermal Resistivity Measurements of Soils and Backfill Materials) (IEEE 442-2017 Guide for Thermal Resistivity Measurements of Soils and Backfill Materials, 2018). El equipo puede medir la capacidad calorífica volumétrica desde 0.5 MJ/m<sup>3</sup> hasta 4.2 MJ/m<sup>3</sup>, con una exactitud de 0.1 MJ/m<sup>3</sup>, dichas mediciones fueron realizadas a temperatura ambiente. En el apéndice 4 se muestra la ficha técnica del estándar de calibración del equipo.



Ilustración 6 Equipo TEMPOS con sonda SH3

El equipo aplica calor a través de una de sus agujas por un tiempo determinado, mientras otra aguja a 6 milímetros de distancia registra la temperatura en el periodo de calentamiento y enfriamiento, con estos datos son utilizados para resolver las ecuaciones 6 y 7 por el método lineal de mínimos cuadrados para encontrar los valores de la conductividad térmica y la difusividad térmica.

$$\Delta T = \left( \frac{q}{4\pi k} \right) E_i \left( \frac{-r^2}{4Dt} \right) \quad (7)$$

$$\Delta T = \left( \frac{q}{\pi k} \right) \left[ E_i \left\{ \frac{-r^2}{4D(t-t_c)} \right\} - E_i \left( \frac{-r^2}{4D} \right) \right] \quad (8)$$

donde  $\Delta T$  es la variación de temperatura,  $q$  es el aporte de calor ( $\text{W/m}$ ),  $K$  es la conductividad térmica ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ),  $r$  es la distancia entre las agujas,  $D$  es la difusividad térmica ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $t$  es el tiempo ( $\text{s}$ ),  $t_c$  el tiempo de calentamiento ( $\text{s}$ ) y  $E_i$  es una integral exponencial (Abramowitz y Stegun 1972). Una vez obtenidos los valores de conductividad térmica y difusividad térmica el valor del calor específico volumétrico,  $C_p$  ( $\text{J/m}^3$ ) se obtiene por la ecuación (8):

$$C_p = \frac{K}{D} \quad (9)$$

## **3.4 Simulación**

### **3.4.1 Selección de viviendas**

Se seleccionaron las plantas arquitectónicas presentadas a continuación con el fin de realizar el análisis de viviendas de tipo popular (vivienda 1) y tradicional (vivienda 2) esto debido a la importancia de estudiar el comportamiento térmico de estas tipologías de vivienda en el contexto del actual déficit de vivienda en México.

De acuerdo con lo presentado por A. Sainz (Saiz et al., 2022), la vivienda de tipo popular es aquella que requiere de mayor impulso y desarrollo para cubrir la demanda, y por otra parte la tradicional se encuentra dentro de una de las tipologías que consume energía de manera más intensa, lo cual se traduce en mayores emisiones cuando no es diseñada adecuadamente. Razones por las cuales se considera que el desarrollo del análisis de las viviendas mencionadas contribuirá de manera positiva a la literatura en función de la planeación de viviendas.

La vivienda 1 (ilustración 7), consiste en una edificación de una planta con 2 habitaciones, 1 sanitario y un área común destinada a cocina y sala, con un área total de 96 m<sup>2</sup> y una superficie construida de 50 m<sup>2</sup>. la distribución y planta arquitectónica corresponde a un modelo típico de vivienda de bajo costo.

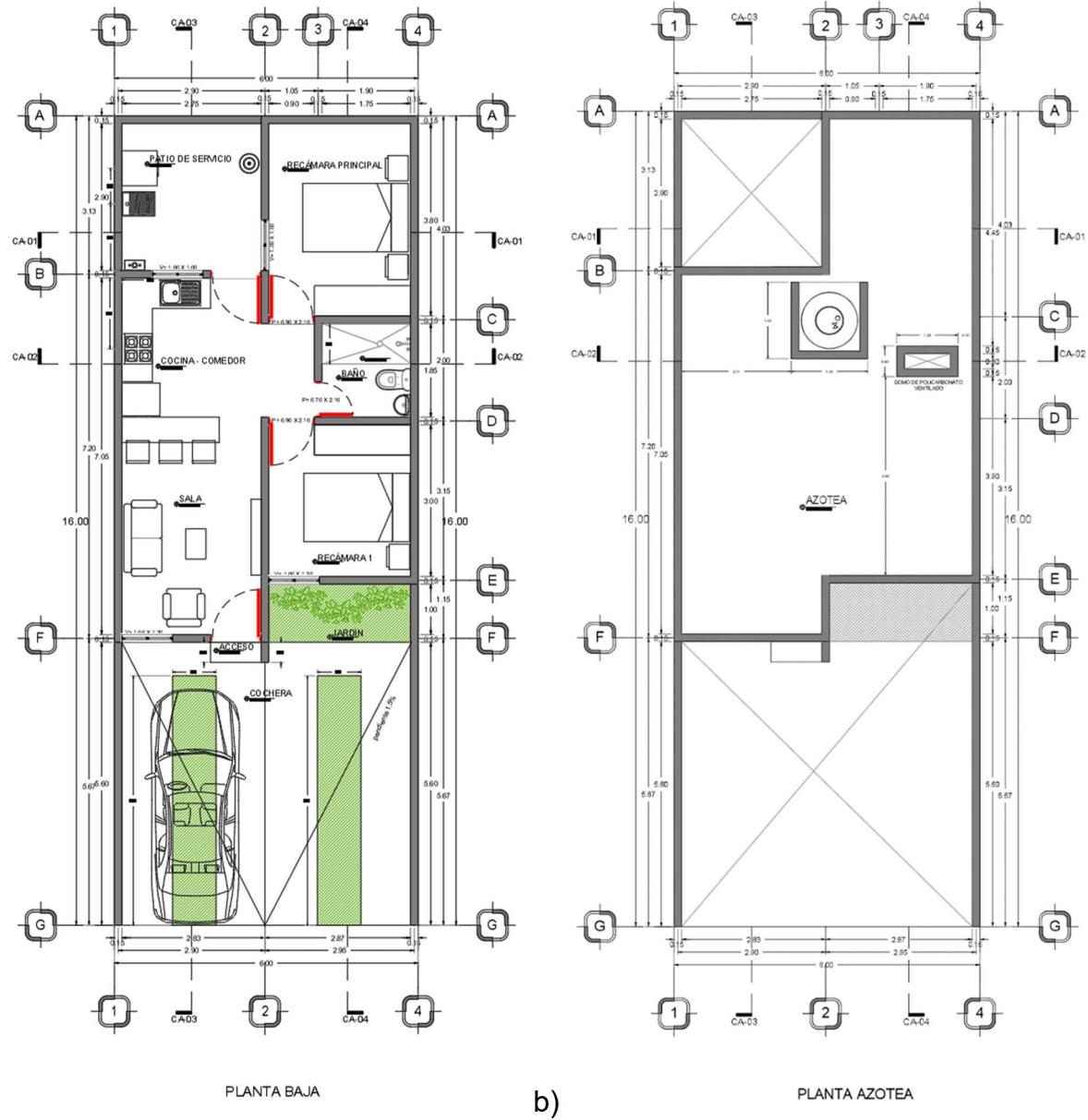


Ilustración 7 a) Planta arquitectónica y b) Planta de azotea de vivienda 1

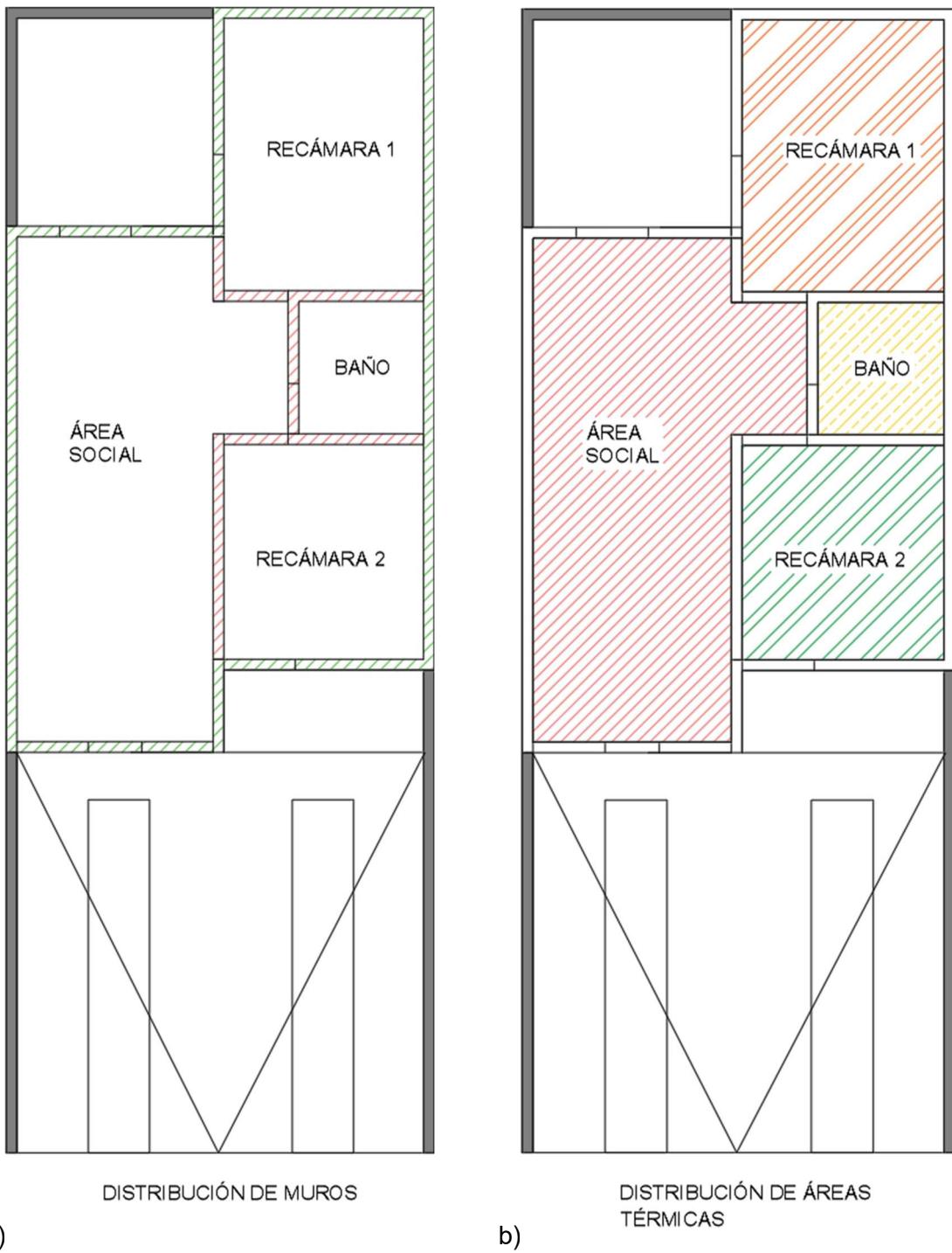


Ilustración 8 a) Distribución de muros en vivienda 1 b) Distribución de áreas térmicas

En la Ilustración 8, se observa que la vivienda 1 se compone por 4 zonas térmicas; recamara 1, recamara 2, baño y área común, las cuales cuentan con las siguientes características:

El perímetro de la recamara 1 está compuesto por 9.93 m de muro de sección tipo A, 2.9 m están expuestos al exterior, y 3.8 m de sección B, 1.8 m colinda al área común. La recamara 2 cuenta con 2 muros de 2.9 m

y 3.0 m de sección tipo A, donde el muro de 3.0 m colinda con la vivienda contigua y el muro de 2.9 m con el exterior, los dos muros restantes son de sección tipo B colindando en 3.9 m con el área común y 2.1 m con el baño. El área común cuenta con 13.9 m de muro sección A, de los cuales 6.9 m colinda a la vivienda contigua y el resto con el exterior, el resto del perímetro es contiguo a las áreas antes mencionadas.

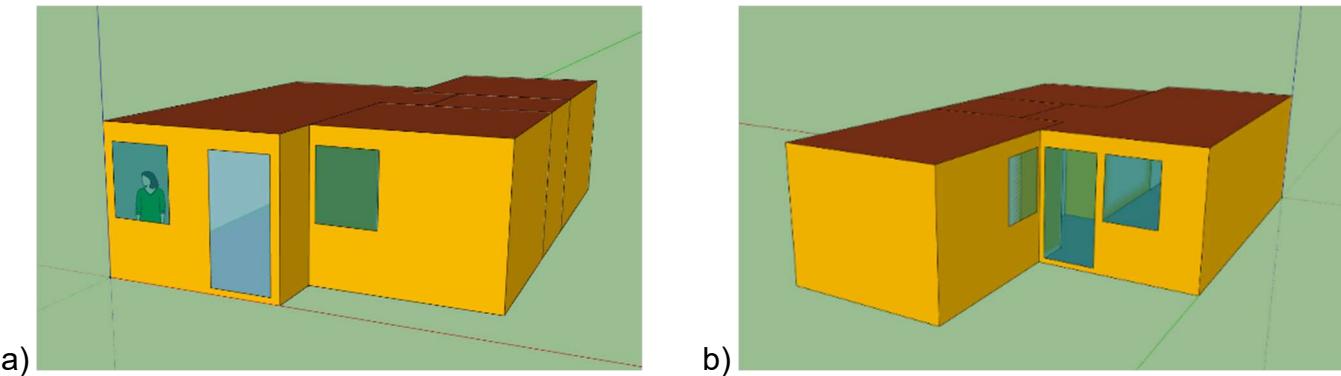
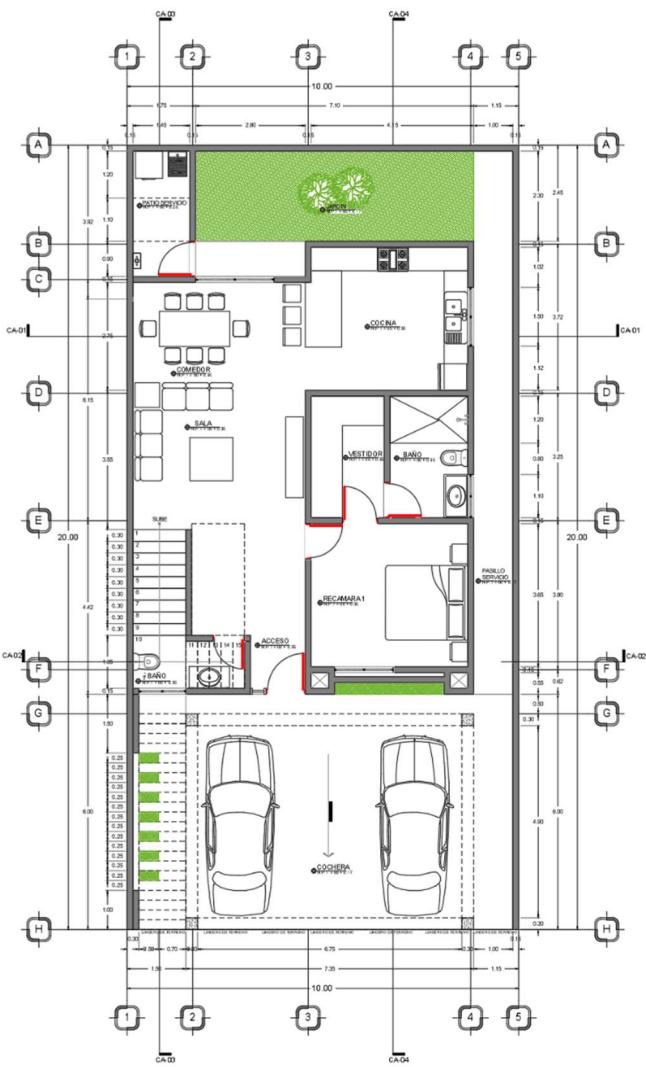


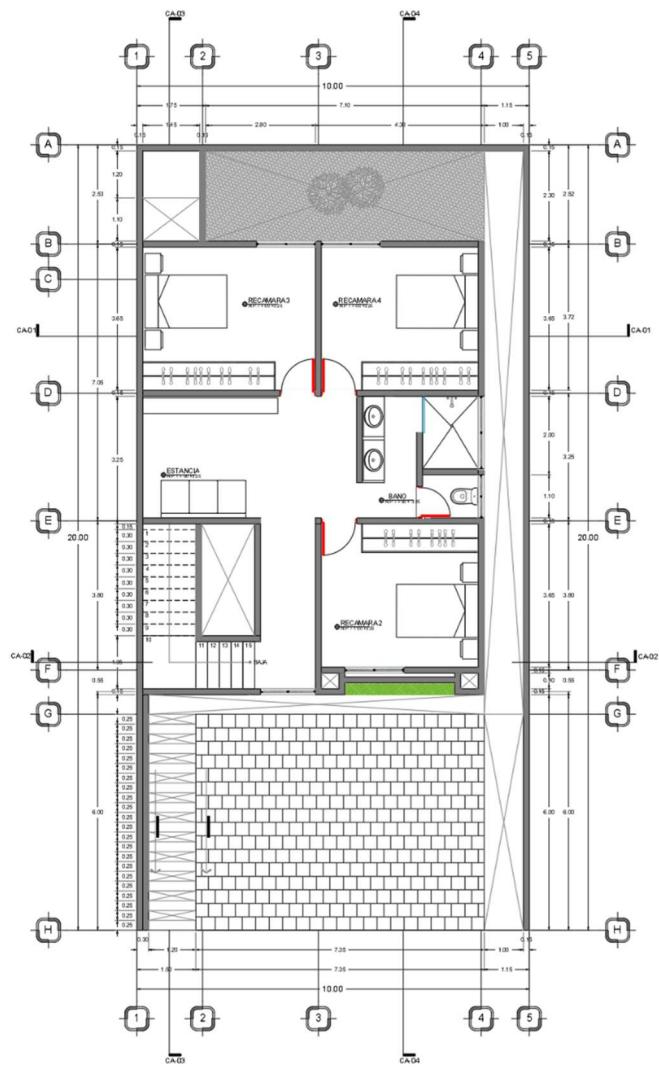
Ilustración 9 Modelo Sketchup de Vivienda 1 a) fachada frontal b) fachada posterior

La vivienda 2 (ilustración 10), consiste en una edificación de dos plantas con 4 habitaciones, 2 1/2 sanitarios, un área común en la planta baja destinada a cocina, comedor y sala, y un área destinada a ser estancia en la planta alta, la vivienda cuenta con un área total de 200 m<sup>2</sup> y una superficie construida de 195.88 m<sup>2</sup>, la distribución y planta arquitectónica se desarrollaron considerando una vivienda tradicional.



a)

b)



PLANTA ALTA

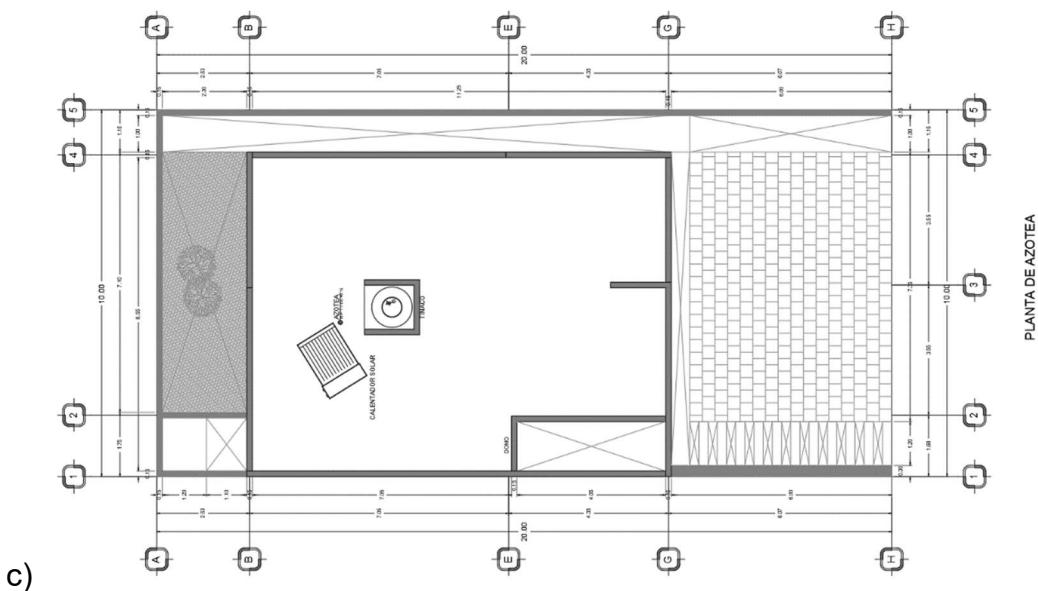
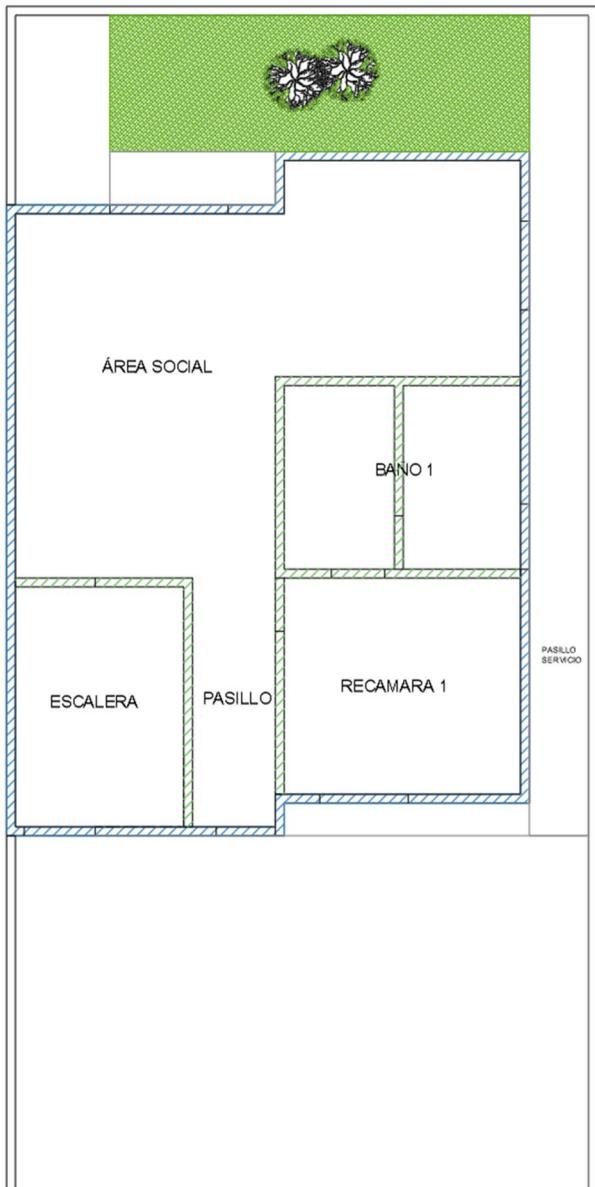


Ilustración 10 Plantas arquitectónicas de Vivienda 2 a) planta baja b) planta alta y c) planta de azotea



a)

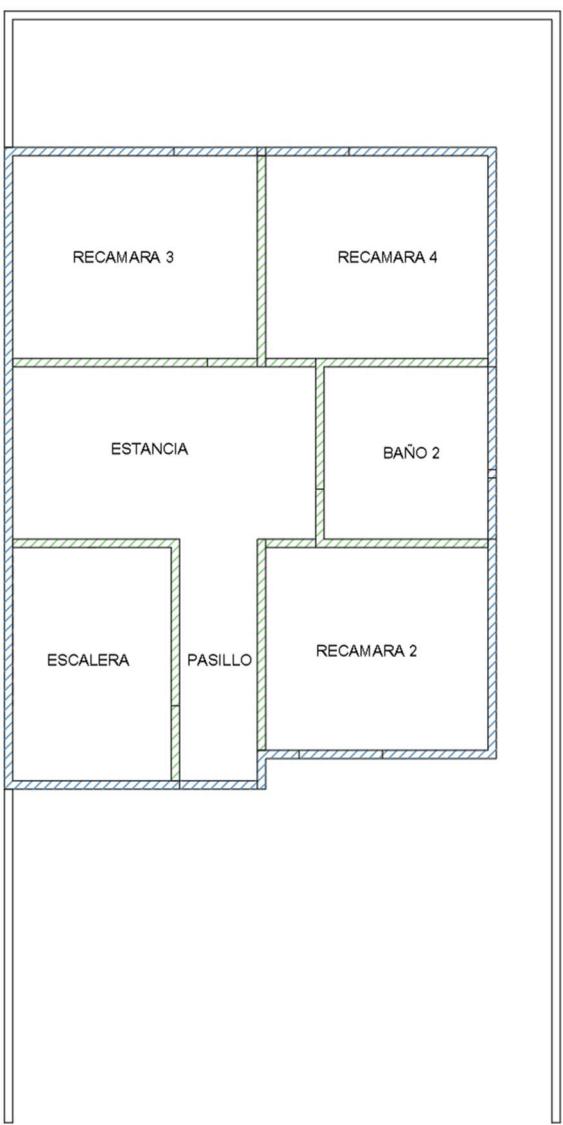
PLANTA BAJA  
DISTRIBUCIÓN DE MUROS



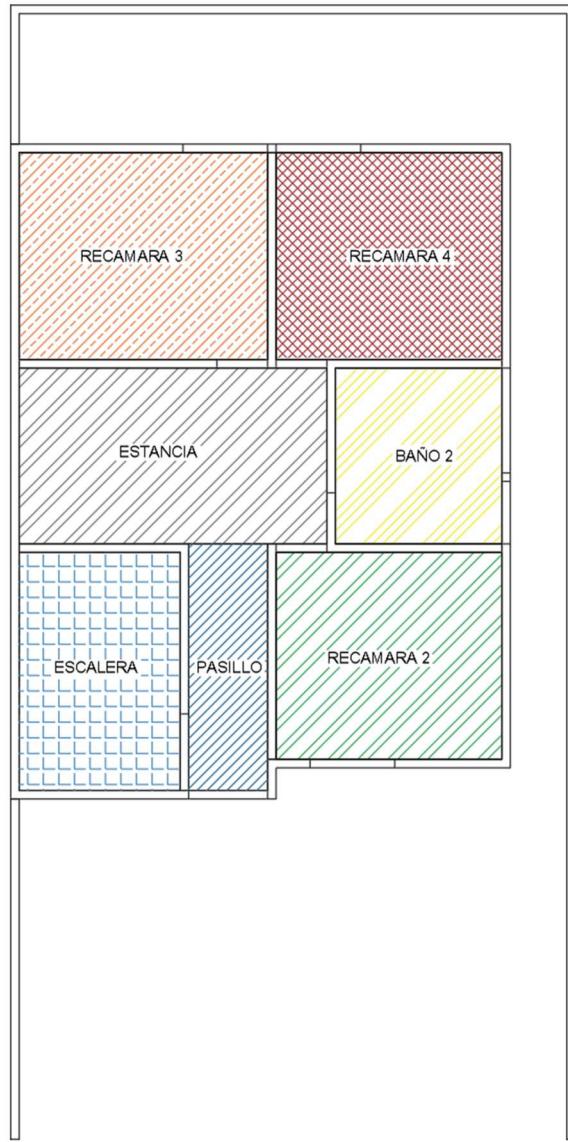
b)

PLANTA BAJA  
DISTRIBUCIÓN DE ÁREAS  
TÉRMICAS

*Ilustración 11 Planta baja Vivienda 2 a) Distribución de muros y b) Áreas térmicas en Distribución de muros y áreas térmicas*



a)



b)

PLANTA ALTA  
DISTRIBUCIÓN DE ÁREAS  
TÉRMICAS

*Ilustración 12 Planta alta Vivienda 2 a) Distribución de muros y b) Áreas térmicas en Distribución de muros y áreas térmicas*

En la ilustración 11 y 12, se observa que la vivienda 2 se compone por 11 zonas térmicas; recamara 1, recamara 2, recamara 3, recamara 4, baño 1, baño 2, pasillo p.b., pasillo p.a., estancia, área social y escalera, las cuales cuentan con las siguientes características:

La recamara 1 cuenta con 2 muros de 3.8 m y 4.0 m de sección tipo A, donde el muro ambos muros colindan con el exterior, los dos muros restantes son de sección tipo B colindando en 3.8 m con el área de pasillo p.b. y 4.0 m con el baño 1. La recamara 2 comparte la distribución con la recamara 1, al ser gemela en la planta alta con la diferencia que sus colindancias al interior son con el pasillo p.a. en 3.8 m, estancia en 0.9 m y baño 2 con 3.1 m. La recamara 3 cuenta con dos muros de 4.55 m y 3.8 m de sección A que colindan con el

exterior y la casa contigua respectivamente y dos muros de las mismas dimensiones de sección B siendo el de 4.55 m colindante a la estancia y el de 3.8 m con la recámara 4, misma que colinda en 0.9 m con la estancia y 3.1 m con el baño 2 en muros de sección B, y sus muros restantes son en sección A colindantes con el exterior. El área social cuenta con 19.8 m de muro sección A, de los cuales 6.15 m colinda con la vivienda contigua y el resto con el exterior. El perímetro de la estancia está constituido por un muro de 3.4 m de sección A y el resto en sección B.

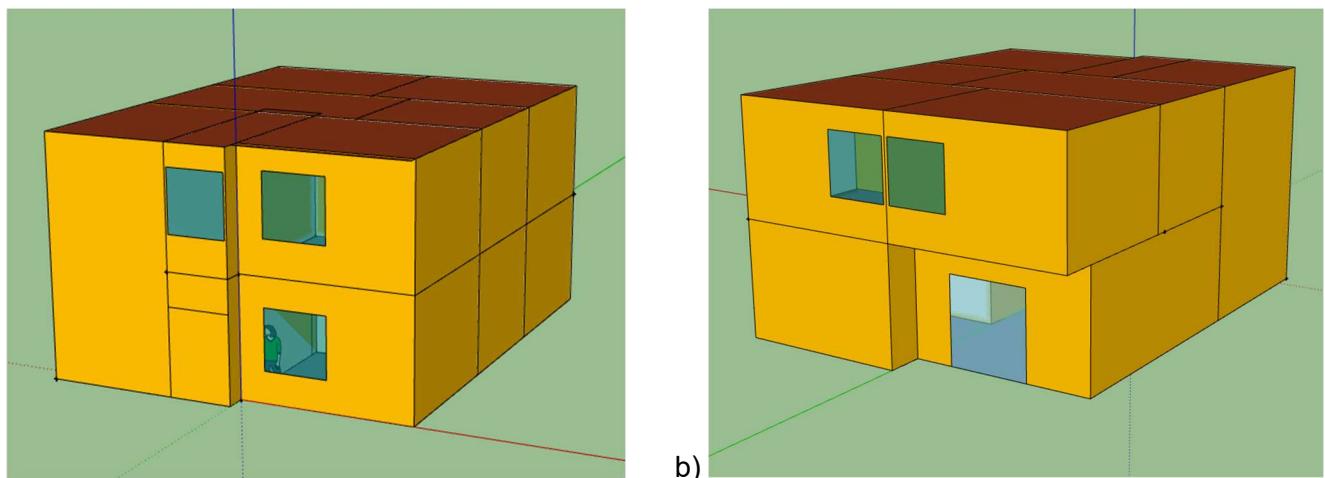


Ilustración 13 Modelo Sketchup de Vivienda 2 a) fachada frontal b) fachada posterior

### 3.4.2 Selección de envolvente

Para la selección de la envolvente, se consideraron los muros de la vivienda y las losas (entrepiso, azotea y desplante). Las propiedades de los materiales que componen las distintas envolventes se presentan a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6 Materiales seleccionados

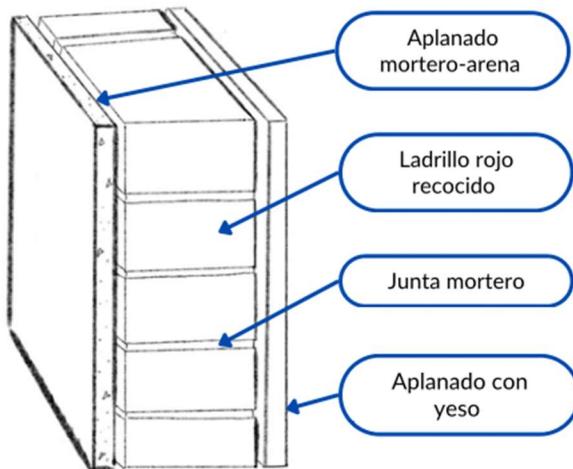
Material	Conductividad térmica (kJ/h·m·K)	Conductividad térmica (W/m·K)	Calor específico (J/kg·K)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	
Yeso	1.44	0.4	1000	1000	Design builder
Ladrillo	1.216	0.338	839.25	1381.1	Medición propia
Mortero-arena	2.592	0.72	840	1860	Design builder
Concreto reforzado	9	2.5	1000	2400	Design builder
Poliestireno	0.135	0.037	1100	12.82	FANOSA (FANOSA, 2011)
Capa mixta	1.908	0.53	1080	490.25	Calculado

Mortero pega-piso	2.88	0.8	840	1600	Design builder
Piso cerámico	2.88	0.8	850	1700	Design builder

En las viviendas se consideraron muros de acuerdo con los métodos constructivos locales, como la que se muestra en la ilustración 14. La sección A corresponde a los muros utilizados en el exterior y la sección B a aquellos al interior; se consideran juntas de mortero de 1 cm en los cantes de los ladrillos, ladrillos de 12 cm x 25 cm x 5 cm y espesores de 1.5 cm para los aplanados de mortero-arena y yeso.

# MUROS

## Sección A



## Sección B

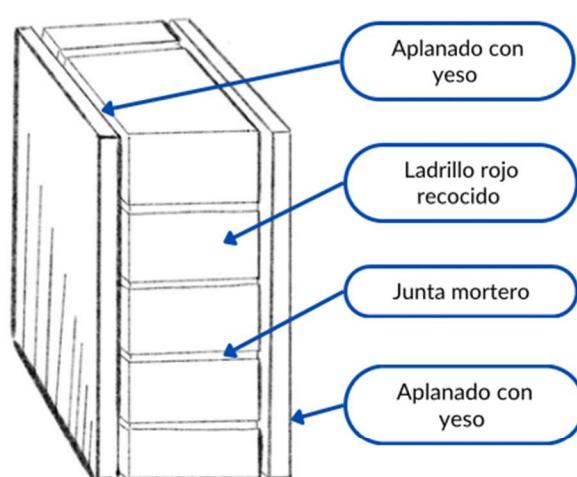


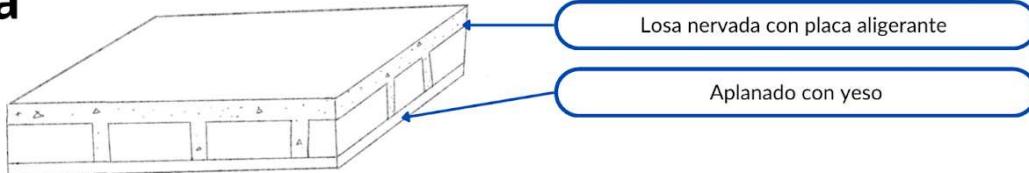
Ilustración 14 Vistas en sección de muros A y B

Por su parte, en las viviendas estudiadas se consideraron tres tipos de losas correspondientes a losas de desplante, de entrepiso y de azotea, cada una de ellas cuenta con una sección específica, mostrados en la ilustración 15.

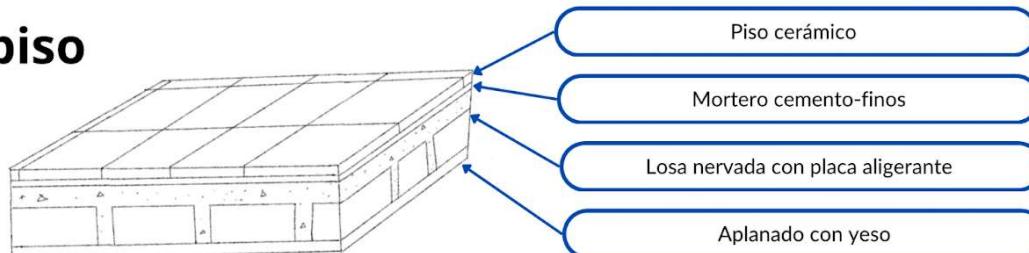
La losa de desplante está compuesta de una capa de 10 cm de concreto armado, una capa 1 cm de mortero con la función de unir el piso a la losa de concreto y una capa de 1 cm de piso cerámico. La losa de entrepiso se compone de una capa de bovedilla nervada, que a su vez se consideró con una capa de 1 cm de aplanado de yeso, seguida por una capa de 5 cm de poliestireno expandido, a continuación, una capa mixta de 15 cm con una relación en área de 20% concreto y 80% poliestireno y en su parte superior una capa de 5 cm de concreto reforzado, sobre esta estructura se encuentran una capa de 1 cm de mortero pega-piso y otra de 1 cm de piso cerámico. La losa de azotea tiene una estructura formada por una capa de bovedilla nervada con una composición igual a la que se encuentra en la losa de entrepiso.

# LOSAS DE VIVIENDA

## Azotea



## Entrepiso



## Planta baja

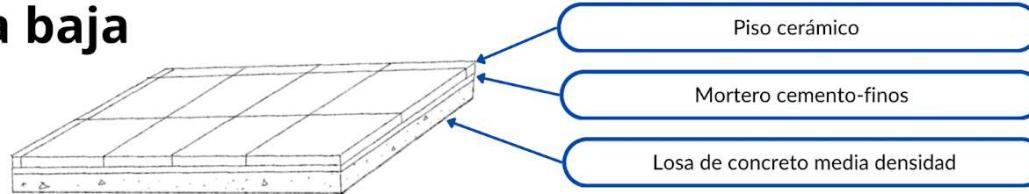


Ilustración 15 Vistas en sección de losas

## 3.4.3 Parámetros para simulación

### 3.4.3.1 Ganancias de calor de la vivienda

Las ganancias de calor al interior de la vivienda fueron analizadas en función del uso de la habitación y la ocupación común en la vivienda, tomando como referencia al manual de ASHRAE (ASHRAE, 2017). En la Tabla 7, se muestran los equipos que se tomaron en cuenta para las ganancias de calor en el interior de las viviendas.

Tabla 7 Equipos considerados

Equipo	Habitación	Consumo mensual (kWh/mes)	Ganancia convectiva (W/día)	Ganancia radiante (W/día)
Refrigerador	Área común	55.91	1407.62	1173.02
Televisor	Área común	5.63	57.6	38.4
Cafetera	Área común	13.03	58.65	29.33
Estufa	Área común	1715.54	0	4684.75
Horno	Área común	48.09	0	29.33
Televisor	Habitación	5.63	38.25	25.5
Plancha	Habitación	23.38	82.11	23.46
Computadora portátil	Habitación		99.37	33.12

Las ganancias producto de la ocupación de las áreas térmicas se consideraron de manera que la cantidad de ocupantes fuera consistente durante el día y de acuerdo con el nivel de actividad considerado, fue dividido de la siguiente manera de acuerdo con cada área de análisis. En las Tabla 8, 9 y 10, se muestran las ganancias de calor asociadas a la ocupación de cada área.

Tabla 8 Ganancias de calor debido a la ocupación de área común

Área común					
Actividad	Horarios	Horas	Ocupantes	Q con (W)	Q rad (W)
Preparación para jornada laboral	6:30-7:30	1	1	30.79	42.52
Actividad física alta	17:30-19:30	2	2	224.04	215.84
Reposo	19:30-23:00	3.5	1	107.77	148.83

Tabla 9 Ganancias de calor debido a la ocupación de habitación principal.

Habitación principal					
Actividad	Horarios	Horas	Ocupantes	Q con (W)	Q rad (W)
Dormir	23:00-6:30	7.5	2	431.08	646.63
Preparación para jornada laboral	6:30-7:30	1	1	30.79	42.52
Actividad física alta	17:30-19:30	2	0	0	0
Reposo	19:30-23:00	3.5	1	107.77	148.83

Tabla 10 Ganancias de calor debido a la ocupación de habitación

Habitación					
Actividad	Horarios	Horas	Ocupantes	Q con (W)	Q rad (W)
Dormir	23:00-6:30	7.5	1	215.54	323.31
Preparación para jornada laboral	6:30-7:30	1	1	30.79	42.52
Actividad física alta	17:30-19:30	2	1	112.02	107.92
Reposo	19:30-23:00	3.5	1	107.77	148.83

### **3.4.3.2 Infiltración**

Para la selección de la infiltración adecuada a considerar en las viviendas se tomaron en cuenta las normativas emitidas por otros países debido a la falta de normatividad nacional, después de dicha revisión se seleccionó el valor de 1.28/h emitida por las autoridades francesas para viviendas unifamiliares (Jiménez Tiberio, 2022).

### **3.4.3.3 Rangos de confort**

Se seleccionaron los rangos de confort térmico utilizando el modelo adaptativo propuesto en el 2021 ASHRAE Handbook-Fundamentals (ASHRAE, 2017), que establece la temperatura media de confort a partir de la ecuación:

$$t_c = 75.6 + 0.43(t_{out} - 71.6)exp - \left(\frac{t_{out}-71.6}{61.1}\right)^2 \quad (10)$$

Donde  $t_c$  es la temperatura de confort, y  $t_{out}$  es la temperatura media mensual, ambas en grados Fahrenheit; con esta temperatura se establece que la temperatura mínima de confort será 4 °F inferior a la temperatura de confort y la máxima 4.5 °F superior. Este modelo supone que los ocupantes son capaces de adaptarse a la temperatura realizando ajustes a través de acciones como alterar la vestimenta, postura, regímenes o niveles de actividad, ventilación, entre otros. Las temperaturas de confort calculadas se pueden consultar en el Apéndice 5, 6, 7 y 8.

### **3.4.4 Casos de estudio**

En la Tabla 11, se muestra un resumen de las dimensiones y características de las viviendas estudiadas. Se calculó el factor de forma de las viviendas, el cual hace referencia al área superficial sensible a generar intercambios de calor con el exterior, en función de la capacidad de almacenarlo. De acuerdo a la literatura (Arboit et al., 2020), se recomiendan valores bajos de factor de forma para viviendas en climas fríos y valores más altos para climas cálidos.

Las viviendas analizadas tienen un factor de forma de 0.64 (vivienda 1) y 0.58 (vivienda 2), lo cual se considera como un valor adecuado para viviendas localizadas en climas fríos.

Tabla 11 Descripción de viviendas 1 y 2

	Vivienda 1	Vivienda 2
Tipo de Vivienda	Popular	Tradicional
Superficie (m <sup>2</sup> )	96	200
Superficie construida (m <sup>2</sup> )	50	196
Áreas térmicas	4	11
Áreas térmicas de interés	3	5
Áreas térmicas habitacionales	2	4
Muro A (m)	32.9	80.3
Muro B (m)	12.1	55.95
Losa de desplante (m <sup>2</sup> )	50	94.6
Losa de entrepiso (m <sup>2</sup> )	0	101.5
Losa de azotea (m <sup>2</sup> )	50	101.5
Ventanas	2	6
Infiltración (1/h)	1.28	1.28
Volumen (m <sup>3</sup> )	125	568.4
Superficie expuesta (m <sup>2</sup> )	81	329.5
Factor de forma (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	0.648	0.580

En la Ilustración 16, se muestran los casos de estudio considerados para las simulaciones desarrolladas a través del software TRNSYS versión 18, con lo cual se estimó la cantidad de energía requerida para mantener el confort térmico de sus ocupantes y las emisiones de dióxido de carbono equivalentes (CO<sub>2</sub>e) asociadas al requerimiento energético por climatización (enfriamiento y calefacción).

# CASOS DE ESTUDIO

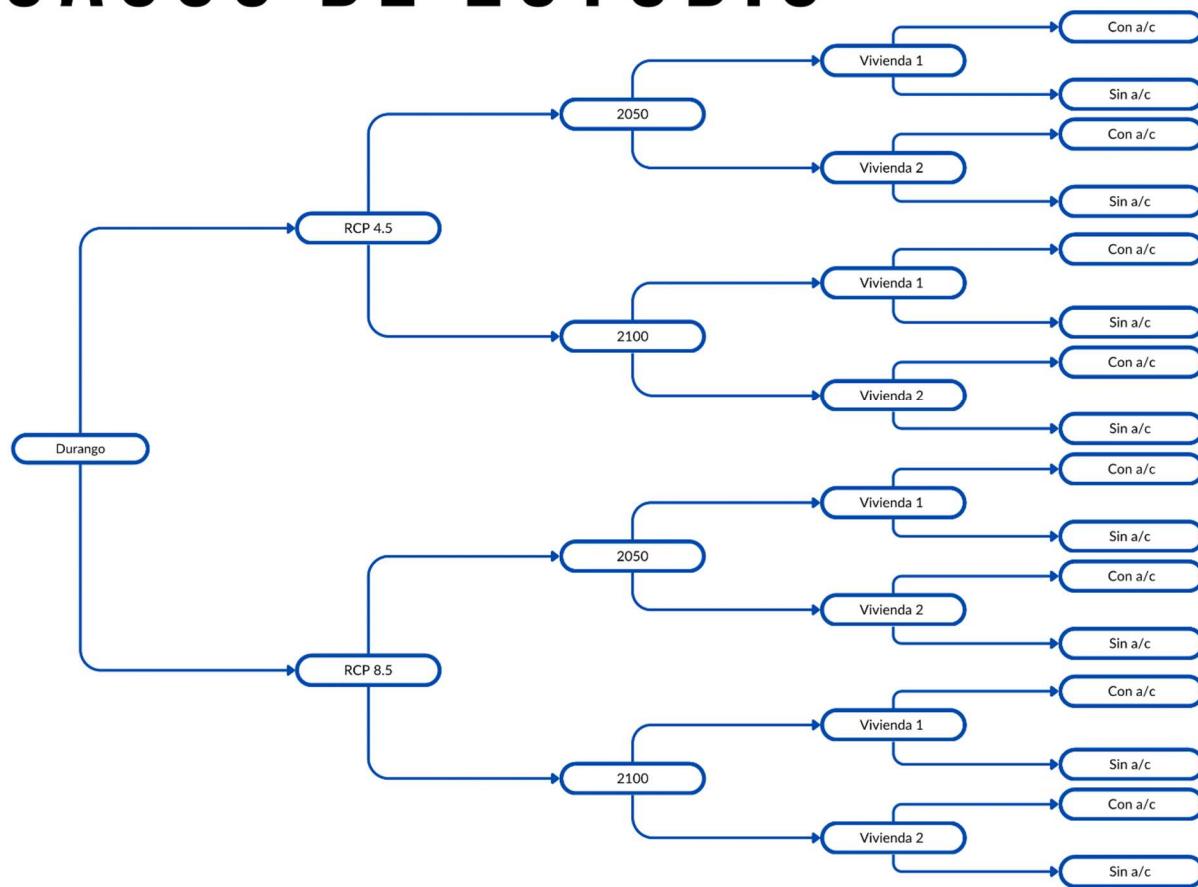


Ilustración 16 Casos de estudio planteados para el proyecto

El cálculo de la energía eléctrica requerida para establecer las temperaturas de confort térmico fue realizado usando el modelo Mirage Inverter X EMF121K, el cual de acuerdo con su ficha técnica (Mirage, n.d.) cuenta con una capacidad máxima de enfriamiento de 12,500 Btu/h y de calefacción de 13,000 Btu/h, además en la misma establece una relación de eficiencia energética estacional (SEER) de 16 W/W.

A fin de conocer como el consumo de energía extra impacta en el medio ambiente, se utilizó el factor de emisión del sistema eléctrico nacional el cual establece 0.438 tCO<sub>2</sub>e/MWh, expedido por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2024), tomando en consideración las centrales eléctricas que abastecen la red nacional.

# 4. Resultados

## 4.1 Determinación de propiedades

Dentro de los productores seleccionados se encuentran cuatro productores locales y un distribuidor, quien produce sus ladrillos en la ciudad de Monterrey bajo un proceso industrial, para después ser transportados a la ciudad de Durango, donde son comercializados. Otra distinción importante dentro de los productores locales es que el 5 comercializa sus productos bajo la insignia de “térmicos”, pues supone tienen propiedades similares a las de un adobe. La información general de los productores seleccionados se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 12 Productores seleccionados para análisis de ladrillos.

Código	1	2	3	4	5
Productor	Mecanizada	Local A	Local B	Local C	Local D
Banco de material	Monterrey, NL.	La Loma, Dgo.	La Loma/ El Nayar, Dgo,	La Loma, Dgo.	El Nayar, Dgo. / Sintético
Método	Mecanizado	Tradicional	Tradicional	Tradicional	Sin cocer
Dimensiones	10x20x6 cm	12x24x4.5 cm	12x25x5 cm	12.5x25x5 cm	12x25x6 cm
Temperatura	800 °C	N/E	N/E	N/E	N/A
Tiempo de cocción	8h	10h	12h	12h	N/A
Combustible	Gas	Leña	Leña	Leña	N/A

Las pruebas mecánicas y la estimación del porcentaje de absorción se realizaron a fin de caracterizar las muestras analizadas, en la tabla 13 podemos observar los resultados de las mismas (en el apéndice 9 y 10 se encuentran los resultados de todas las muestras analizadas) y en la ilustración 17 se muestran los equipos utilizados.



Ilustración 17 Pruebas de resistencia a la compresión



Ilustración 18 Pruebas de absorción inicial y porcentaje de absorción

En la ilustración 20 y 21 se puede observar el desarrollo de las pruebas para determinar calor específico, así como conductividad térmica, por su parte en la ilustración 19 podemos ver los resultados de las pruebas ejecutadas para resistencia a la compresión, densidad, calor específico y conductividad térmica, donde después de realizar un análisis de varianza de medias a la conductividad térmica, se puede notar que los

productores 1 y 5 son tienen una diferencia estadísticamente significativa de los productores 2, 3 y 4, que son los productores locales. Lo que se interpreta como que la diferencia que existe entre ellos es mayor que aquella que se presenta por la variación dentro de cada productor.

El análisis también muestra que el productor 3 es similar con el productor 2 y 4, pero estos estadísticamente no son similares entre sí, aunque de acuerdo con la diferencia que se establece como significativa y a la revisión de la literatura una variación de 0.04 W/m K no representa un cambio significativo en los consumos energéticos, por tanto, los productores locales se pueden considerar como similares en esta propiedad. En el apéndice 11 se muestran los resultados de todas las pruebas termofísicas realizadas.

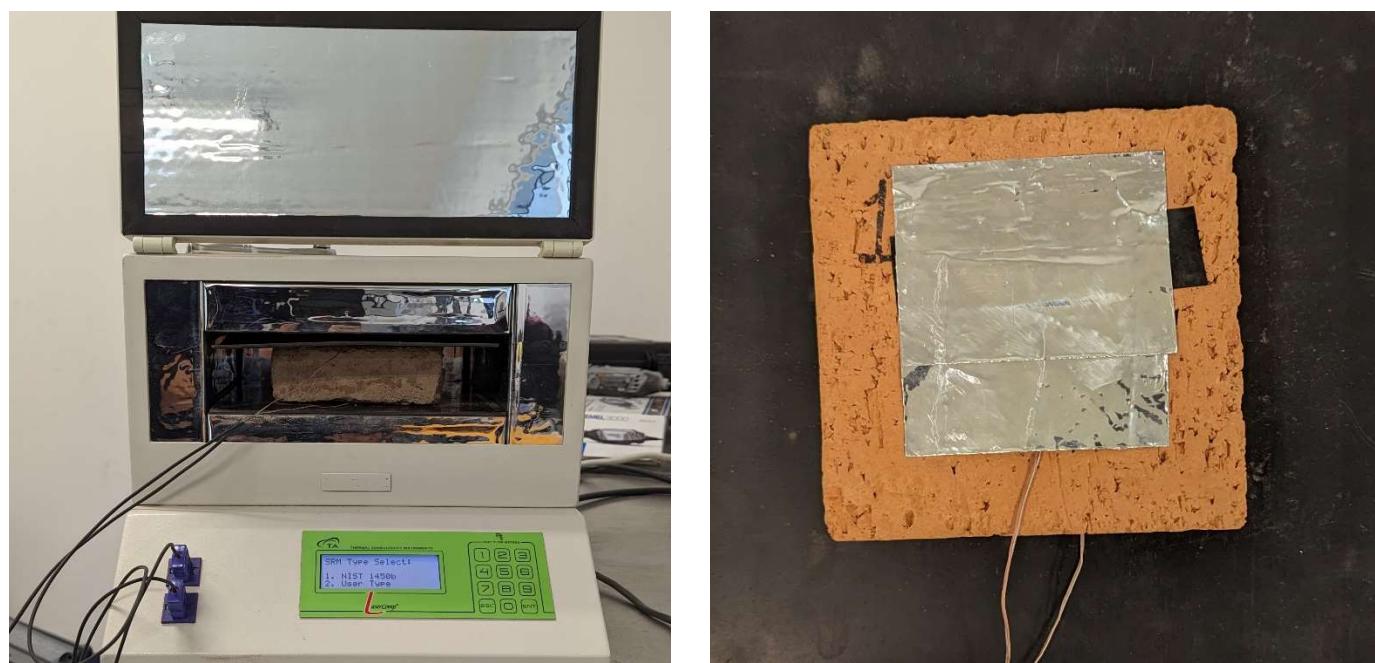


Ilustración 19 Desarrollo de medición de conductividad térmica



Ilustración 20 Desarrollo de medición de calor específico

Tabla 13 Resultados de pruebas físicas y mecánicas.

Código	Productor	Absorción inicial (g/cm <sup>2</sup> min <sup>0.5</sup> )	Porcentaje de absorción	Resistencia a la compresión (MPa)
1	Mecanizado	0.0205 ± 0.0010 (N/A)	15.30 ± 0.11 (SI 404)	1.2051 ± 0.1826 (NO 404)
2	Local A	0.0306 ± 0.0064 (N/A)	20.80 ± 2.71 (SI 404)	1.0186 ± 0.2607 (NO 404)
3	Local B	0.0361 ± 0.0039 (N/A)	21.28 ± 1.42 (SI 404)	0.7037 ± 0.4084 (NO 404)
4	Local C	0.0333 ± 0.0049 (N/A)	19.56 ± 1.65 (SI 404)	0.8477 ± 0.1438 (NO 404)
5	Local D	0.0257 ± 0.0052 (N/A)	19.10 ± 0.83 (SI 404)	0.8369 ± 0.3917 (NO 404)

\* Las muestras son consideradas como tabique de arcilla artesanal

\*\*SI 404: cumple a los valores establecidos para dicha propiedad en la norma NMX-C-404-ONNCCE-2012, NO 404: no cumple a los valores establecidos para dicha propiedad en la norma NMX-C-404-ONNCCE-2012, N/A: no aplica para material considerado.

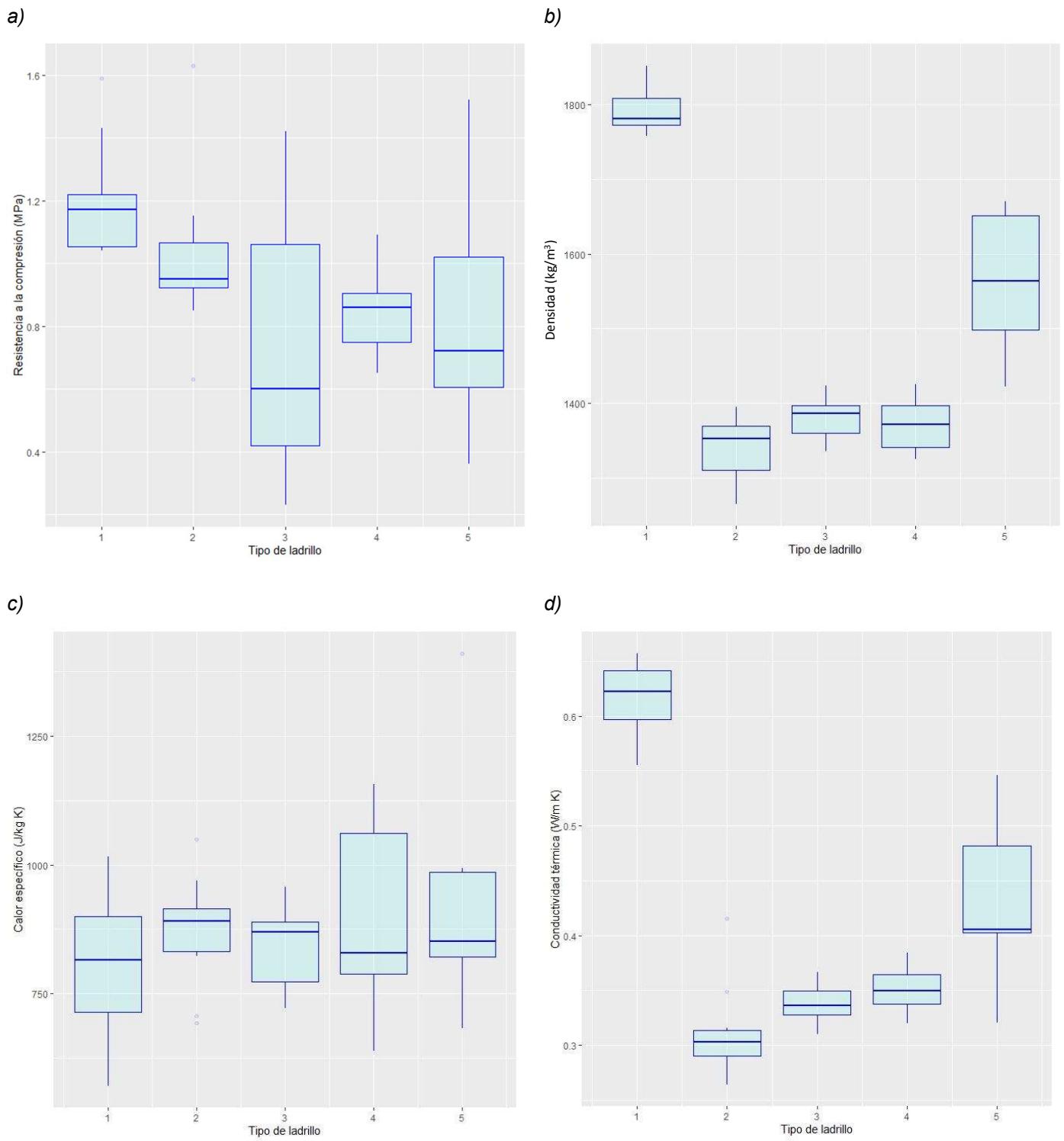


Ilustración 21 Diagrama boxplot de muestras analizadas<sup>2</sup> a) Resistencia a la compresión, b) Densidad, c) Calor específico y d) Conductividad térmica

<sup>2</sup> **Muestra 1**, Mecanizado, Monterrey, NL; **Muestra 2**, Tradicional, La loma Dgo; **Muestra 3**, Tradicional, La Loma/ El Nayar, Dgo; **Muestra 4**, Tradicional, La Loma, Dgo; **Muestra 5**, Sin cocer, La Loma, Dgo/sintético.

## 4.2 Simulación

### 4.2.1 Análisis de temperaturas

#### Temperaturas bajo escenarios base

Simular las viviendas bajo un clima actual (TMY contemporáneo), nos brinda la oportunidad de observar el comportamiento de cada área térmica, revelando así cuales son las áreas que son más susceptibles a aumentar su temperatura en escenarios de mayores temperaturas ambiente. Además, al conocer las plantas arquitectónicas y las temperaturas que resultan de la simulación en cada zona, podemos ver el impacto de factores como la orientación y la cantidad de envolvente expuesta al ambiente. Las primeras simulaciones realizadas se desarrollaron bajo un clima actual, con lo que estas simulaciones brindan un entendimiento base para posteriormente compararlo con potenciales efectos del cambio climático.

En la ilustración 22 se muestran los resultados de la simulación de las viviendas; donde podemos observar que la vivienda 1, ilustración 22.a, reporta una temperatura media de 20.33 °C, con una temperatura mínima de 4.49 °C y una máxima de 34.46 °C. Se observa que la mitad de las temperaturas al interior se encuentran entre 16.03 °C y 24.63 °C. Por su parte la vivienda 2, ilustración 22.b, presenta una temperatura media de 22.42 °C, con una temperatura mínima de 6.17 °C y una máxima de 36.27 °C, en el caso de esta vivienda el 50% de los valores de temperatura se encuentran entre 19.24 °C y 25.72 °C.

Debido a las diferencias entre sus plantas arquitectónicas, así como la cercanía con las construcciones colindantes existen diferencias claras en el comportamiento térmico en las viviendas estudiadas. La vivienda 1 tiene una media menor, con una desviación estándar de 5.48; siendo mayor a la presentada en la vivienda 2 (4.62).

Un factor a considerar es que en la vivienda 2, las habitaciones que se encuentran en la planta alta alcanzan temperaturas mayores que las habitaciones y áreas de la planta baja, esto se considera consecuencia de la cantidad de radiación se recibe a través de las losas de azotea y los muros exteriores. Las tres zonas térmicas de la planta alta cuentan con al menos dos muros colindantes con el exterior de la vivienda.

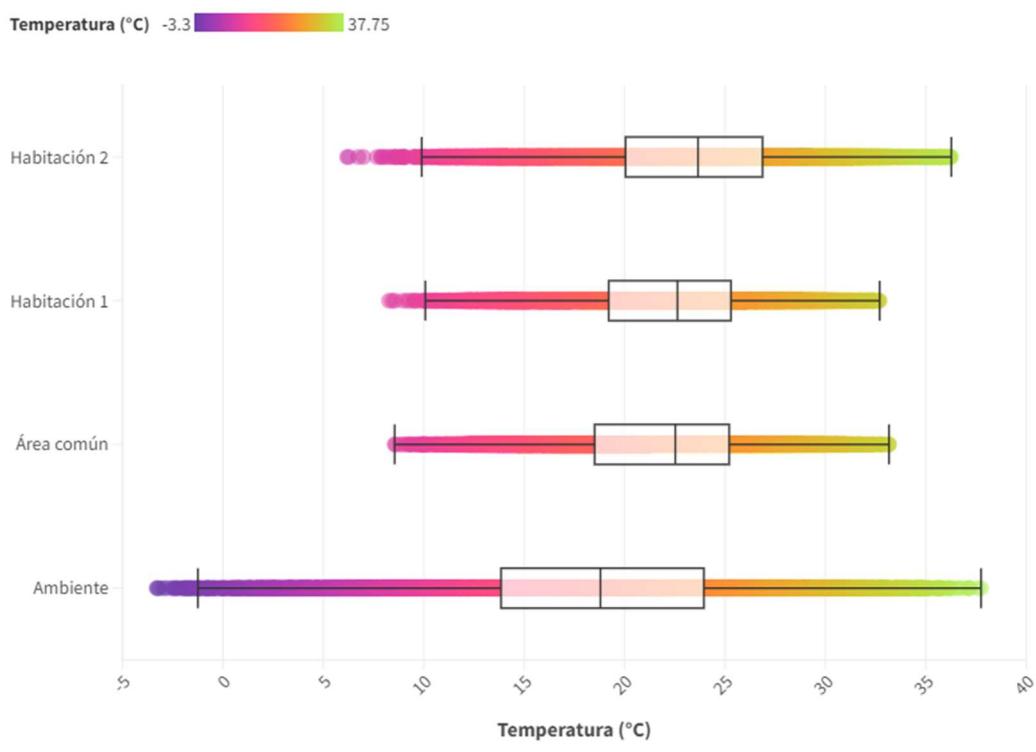
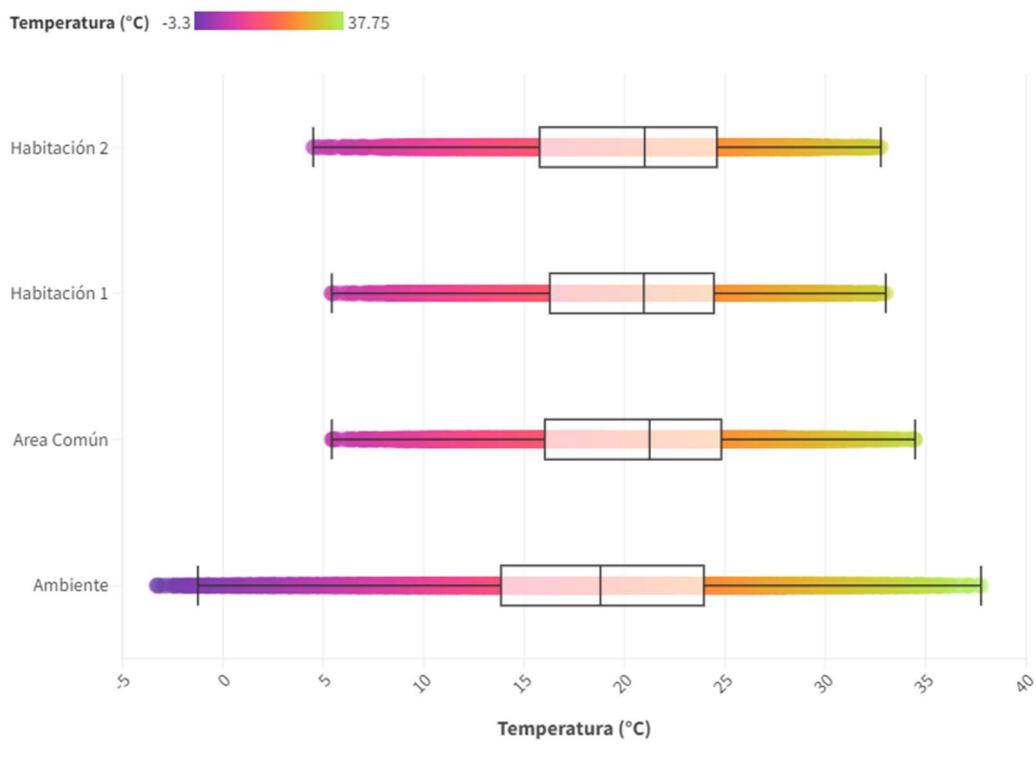


Ilustración 22 Diagrama boxplot temperaturas en a) Vivienda 1 y b) Vivienda 2

## Temperaturas bajo escenarios RCP

Al evaluar el desempeño térmico de las viviendas con la información climática de los distintos RCPs, pudimos observar a detalle el potencial efecto del cambio climático sobre las temperaturas al interior de las viviendas. El visible aumento de temperatura en las viviendas nos da un indicativo del grado de confort térmico que se tendrían que tolerar bajo alteraciones térmicas como las supuestas en los RCPs implementados. En las Tablas 14 y 15, se muestra la descripción estadística de las temperaturas interiores con respecto a los RCPs analizados.

Tabla 14 Descripción estadística de temperatura en vivienda 1 ( °C).

Escenario	Min	1er cuartil	Mediana	Media	3er cuartil	Max
RCP 4.5 2050	5.57	17.39	22.28	21.58	25.87	35.45
RCP 4.5 2100	6.86	18.09	23.34	22.37	26.61	35.93
RCP 8.5 2050	5.82	17.49	22.51	21.74	25.95	36.24
RCP 8.5 2100	7.38	19.69	24.95	24.05	28.42	37.98

Tabla 15 Descripción estadística de temperatura en vivienda 2 ( °C).

Escenario	Min	1er cuartil	Mediana	Media	3er cuartil	Max
RCP 4.5 2050	7.84	20.74	24.22	23.81	27.11	38.37
RCP 4.5 2100	9.22	21.56	25.19	24.71	27.99	38.71
RCP 8.5 2050	8.17	20.90	24.43	23.99	27.21	38.58
RCP 8.5 2100	10.24	23.40	27.10	26.61	30.01	40.92

En la vivienda 1 (Tabla 14), bajo las condiciones ambientales del RCP 4.5 y 8.5 en 2050, no presenta una gran diferencia de temperaturas. Se observó que la media del escenario RCP 8.5 es mayor por 0.16 °C a la del RCP 4.5 para el mismo año, mientras que al contrastar las temperaturas contra el escenario contemporáneo podemos ver un aumento de 1.25 °C y 1.41 °C, respectivamente. Incluso este ligero incremento de temperaturas tendría un impacto en el confort de los habitantes y en el uso futuro de energía de las viviendas. Por otro lado, en los escenarios proyectados a 2100 donde se puede apreciar una gran diferencia en las temperaturas al interior de la vivienda, con respecto a las temperaturas del escenario contemporáneo; existe un aumento de 2.04 °C en el RCP 4.5 y 3.72 °C en el RCP 8.5.

En la Vivienda 2 (Tabla 15) al igual que la Vivienda 1 no presenta una gran diferencia entre las temperaturas del escenario RCP 4.5 y 8.5 para 2050, en este caso la diferencia entre sus medias es de 0.18 °C. Esta vivienda presenta un aumento de 1.39 °C y 1.57 °C, con lo que se puede suponer que esta vivienda es ligeramente más susceptible a los cambios de temperatura ambiente. Mientras que los aumentos de temperatura en los escenarios de 2100 se encuentran en 2.29 °C y 4.19 °C, respectivamente.

Finalmente, en la Ilustración 23 se observa que la vivienda 1 presentan una mayor dispersión que en la vivienda 2, bajo todos los escenarios. Este fenómeno podría ser consecuencia de las características arquitectónicas de cada una. Ya que, por ejemplo, la vivienda 1 cuenta con viviendas colindantes, característica común en este tipo de emplazamientos. Por su parte la vivienda 2, cuenta con pasillos en sus costados, cochera al frente y un jardín en la parte posterior, por lo que esta vivienda tiene todas sus fachadas expuestas a las condiciones ambientales de radiación y temperaturas, por lo que todas sus zonas térmicas alcanzan temperaturas mayores.

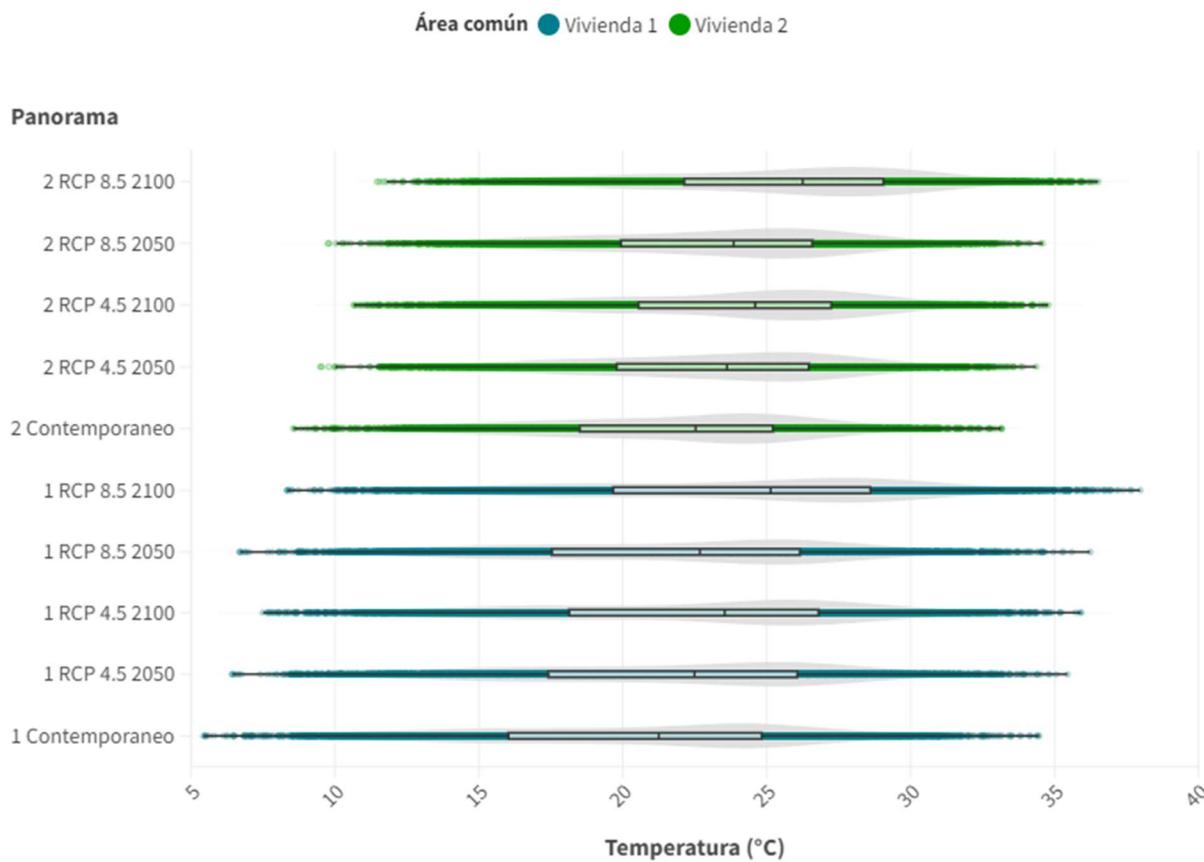
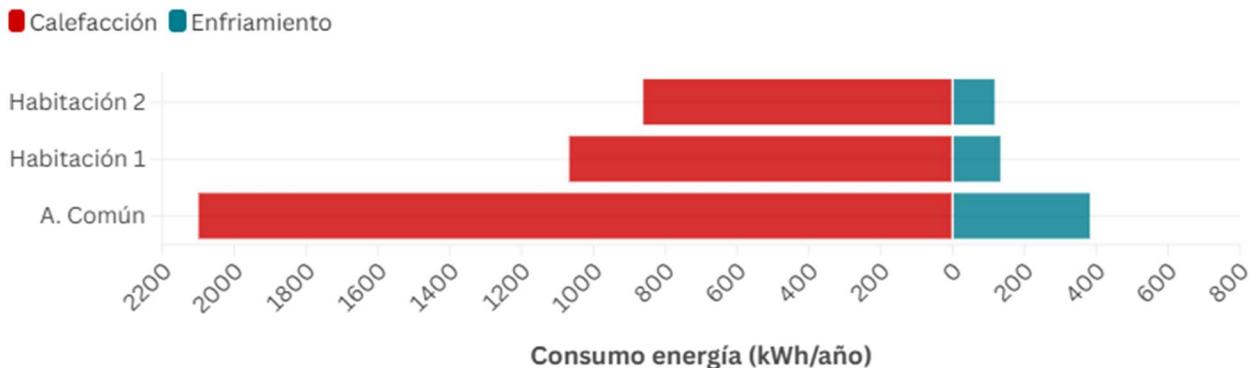


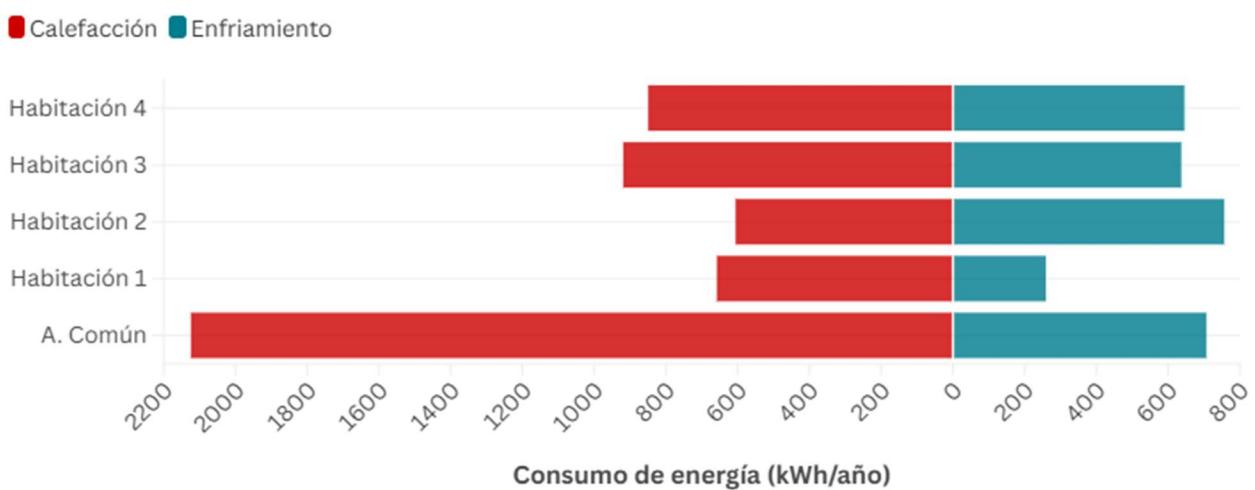
Ilustración 23 *Diagrama boxplot y violín de temperaturas en área común de Casa 2 en los panoramas analizados.*

## 4.2.2 Análisis de demanda de energía

El cálculo de la demanda inicial bajo el TMY contemporáneo fue desarrollado a fin de conocer las áreas que requieren un suministro mayor de energía, esta información se muestra en la Ilustración 24. En esta figura podremos ver que, debido al clima de la ciudad de Durango, en ambas viviendas la demanda energética por climatización es mayor para suprir la calefacción, en la vivienda 1 esta representa el 86%, mientras que en la vivienda 2 un 63%.



a)



b)

Ilustración 24 Comparación de energía requerida para mantener condiciones de confort térmico en a) Vivienda 1 y b) Vivienda 2, bajo escenario base, kWh/año

De acuerdo con la información obtenida de la vivienda 1 (Ilustración 24a), la energía requerida para operar los equipos de calefacción en habitaciones representa un 48% de la energía total requerida para este fin; mientras que la utilizada para el enfriamiento de las mismas es el 40%. La energía demandada en ambas habitaciones no supera aquella demandada en el área común; con esto podemos establecer que en esta

vivienda el área común representa más de la mitad del requerimiento energético, lo que le convierte en un área de gran importancia y susceptible a proponer mejoras.

Por otro lado, en la ilustración 24.b se observa que la energía utilizada en la vivienda 2, la calefacción de las habitaciones representa el 58% del consumo y 78% para el enfriamiento. Se puede considerar que debido a que el área común se encuentra en la planta baja y 3 habitaciones se encuentran en la planta alta, estas tienen mayores ganancias de calor al estar más expuestas al ambiente.

Como se mencionó con anterioridad los comportamientos de ambas viviendas son diferentes debido a sus características arquitectónicas. En la vivienda 2 prevalecen las temperaturas altas, por lo que su demanda de energía para enfriamiento será mayor que en la vivienda 1, por consiguiente, en escenarios de temperaturas más altas tendrá un mayor impacto la energía utilizada en enfriamiento en la vivienda 2. En la ilustración 25 podemos observar tendencias opuestas en la demanda de energía total de las viviendas, aunque los aumentos porcentuales en la energía requerida para enfriamiento son altos en el caso de la vivienda 1, pero aún son de una menor magnitud a aquellos de la vivienda 2, ya que la demanda inicial de energía en ambas viviendas bajo el escenario base se encuentra en 40 kWh para la vivienda 1 y 188 kWh para la vivienda 2.

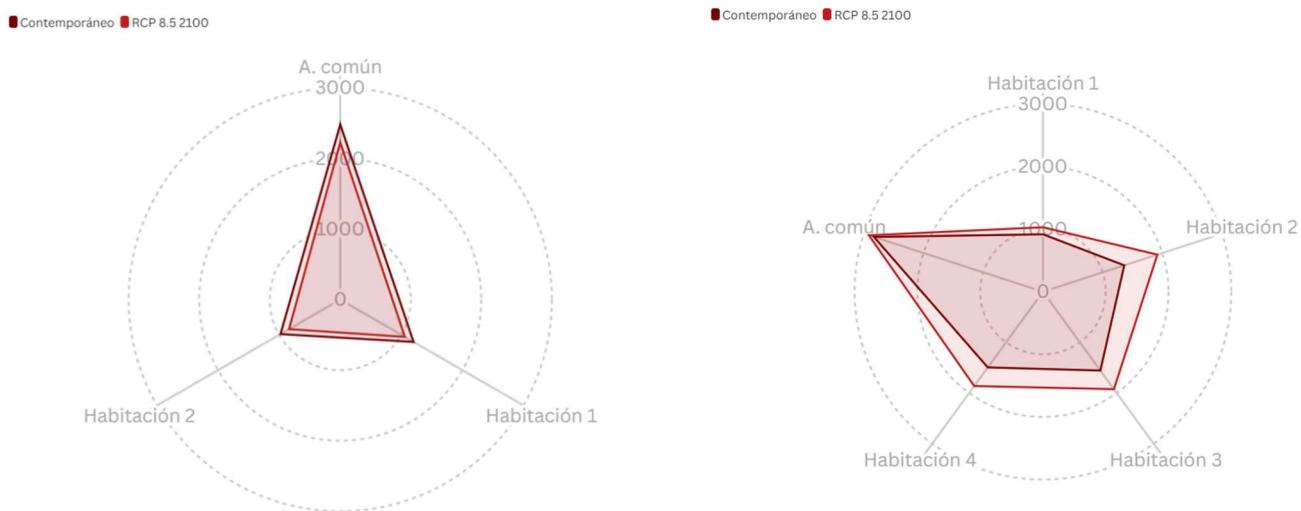


Ilustración 25 Comparativo de energía base contra energía de panorama RCP 8.5 2100, a) Vivienda 1 y b) Vivienda 2, kWh/año

Las simulaciones del resto de los escenarios nos indican que, debido al aumento de la temperatura al interior en ambas viviendas, la demanda de energía utilizada para la calefacción disminuye con respecto a los RCPs y años analizados (2050 y 2100), ilustración 26. En ambas viviendas se puede notar como la demanda más grande se encuentra en el consumo bajo el clima contemporáneo, en la vivienda 1 esta demanda disminuye en un 28% frente al RCP 8.5 2100 y en la vivienda 2 esta disminución es aún mayor con un 47%.

Por su parte la energía requerida para el enfriamiento de las viviendas va en aumento en los diversos escenarios, en las ilustraciones 27.a y 27.b se puede observar el caso de la vivienda 1, donde la energía entre el escenario base y el escenario RCP 8.5 2100 aumenta en un 95%, en el caso de la vivienda 2, ilustraciones 27.c y 27.d, el aumento es en un 129% entre estos mismos escenarios.

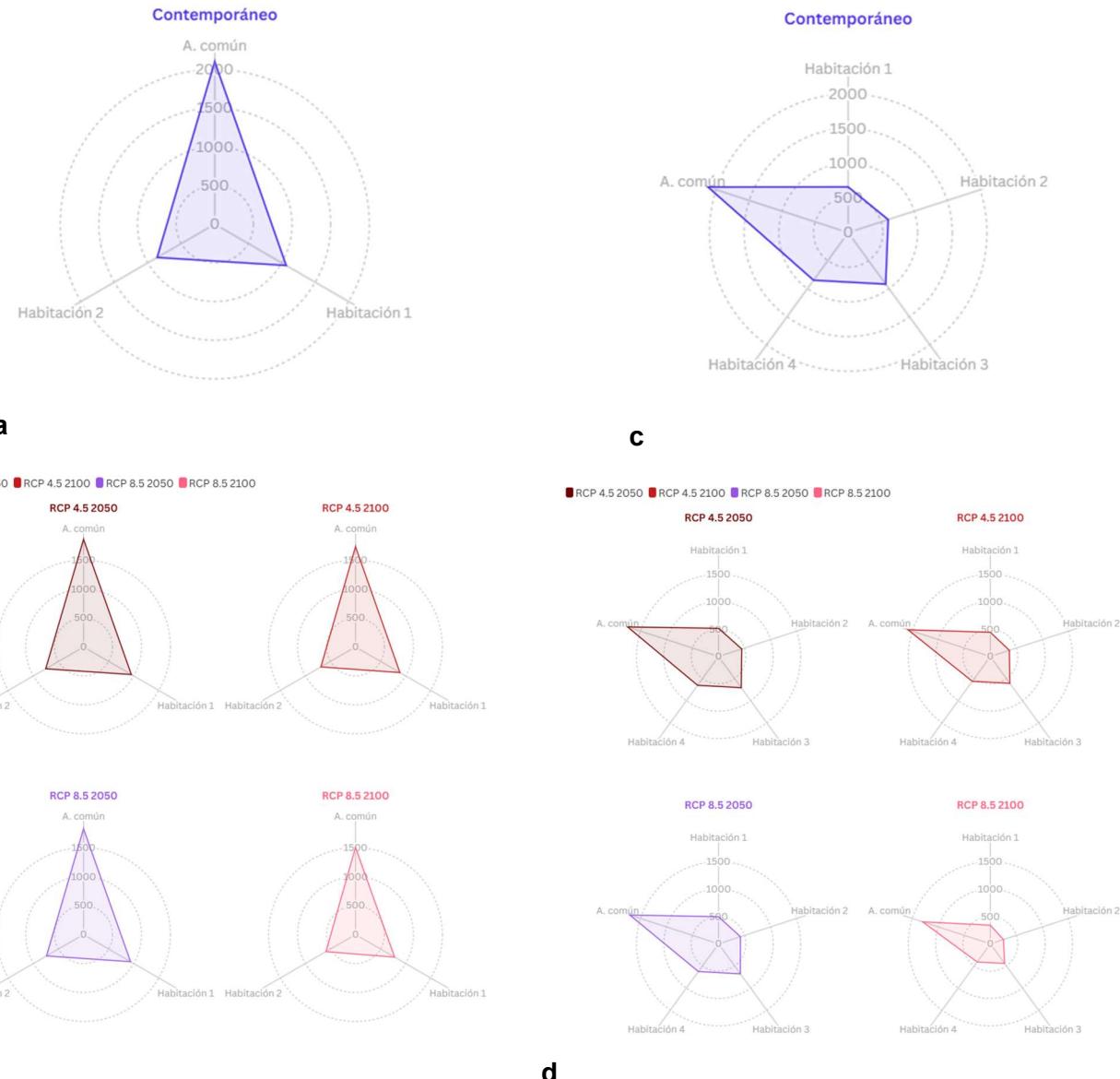


Ilustración 26 *Energía de calefacción requerida, a. Contemporáneo vivienda 1, b. RCPs vivienda 1, c. Contemporáneo vivienda 2, d. RCPs vivienda 2, kWh/año.*

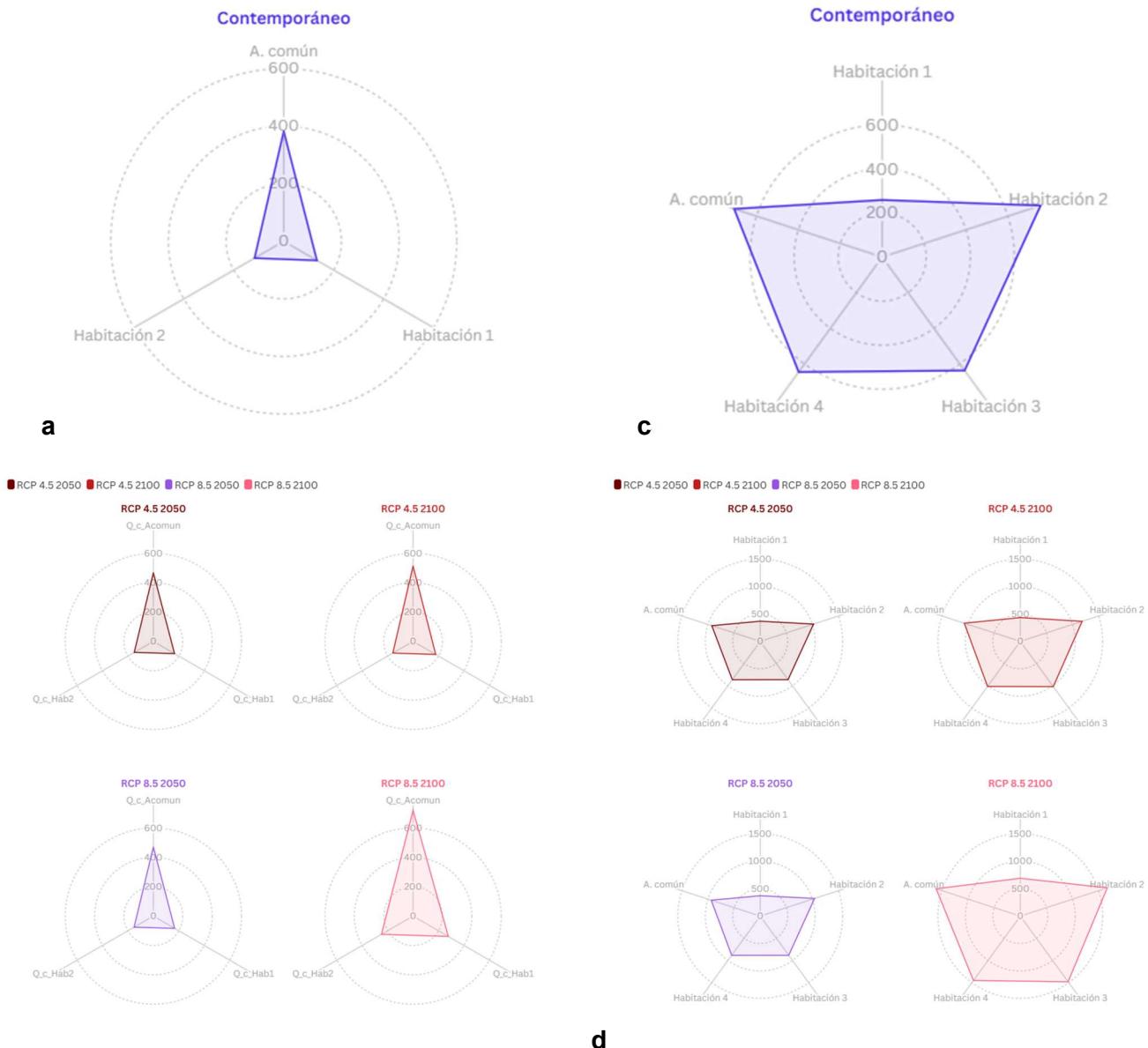
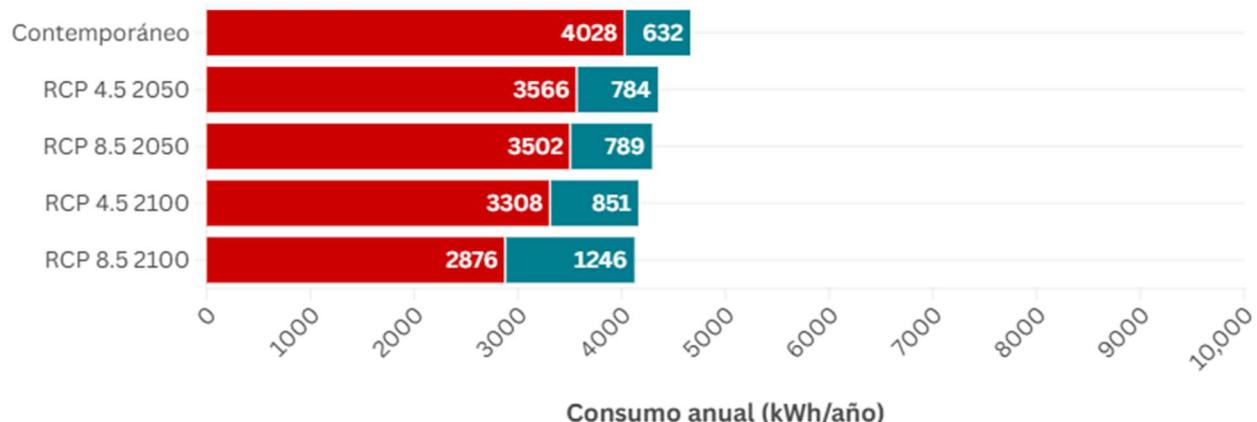


Ilustración 27 Energía de enfriamiento requerida, a. Contemporáneo vivienda 1, b. RCPs vivienda 1, c. Contemporáneo vivienda 2, d. RCPs vivienda 2, kWh/año.

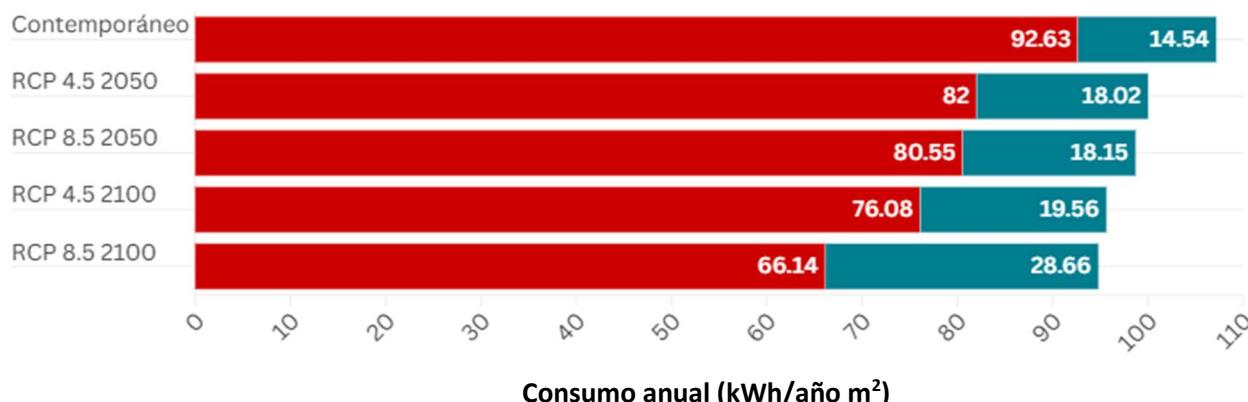
Finalmente, podemos ver en las ilustraciones 28 y 29 que las viviendas presentan tendencias contrarias puesto que en la vivienda 1 la disminución en la demanda para calefacción es menor al aumento de la demanda de enfriamiento. En contraste, en la vivienda 2 la demanda de enfriamiento desde el escenario contemporáneo se encuentra en una magnitud cercana a la de la demanda de calefacción. Al implementar los escenarios con mayores temperaturas, esta se vuelve de mayor importancia llegando a representar hasta 2.5 veces más que la de calefacción en el escenario RCP 8.5 2100.

■ Calefacción ■ Enfriamiento



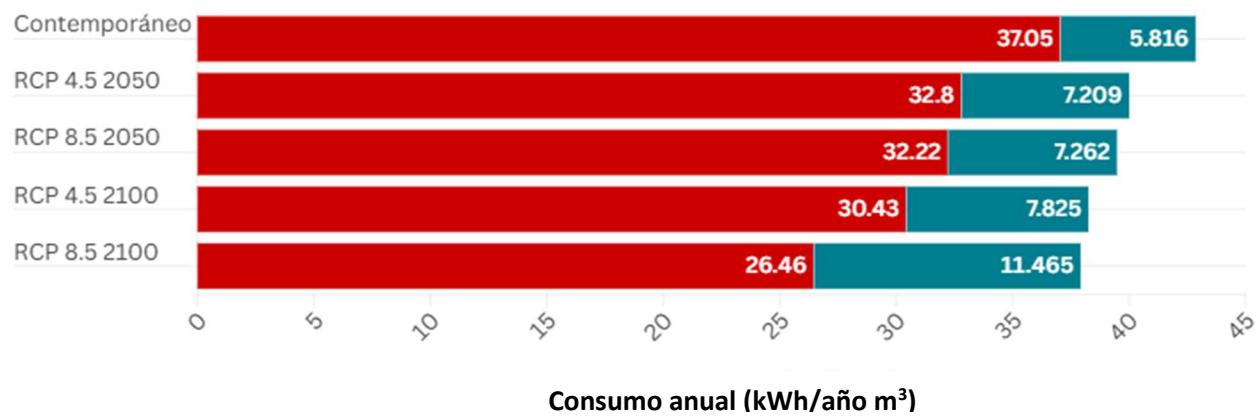
A)

■ Calefacción ■ Enfriamiento



B)

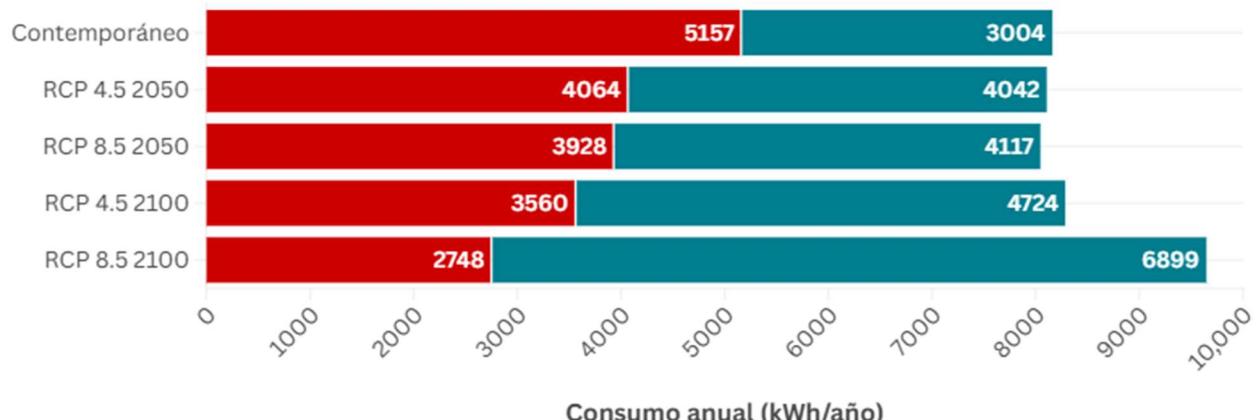
■ Calefacción ■ Enfriamiento



C)

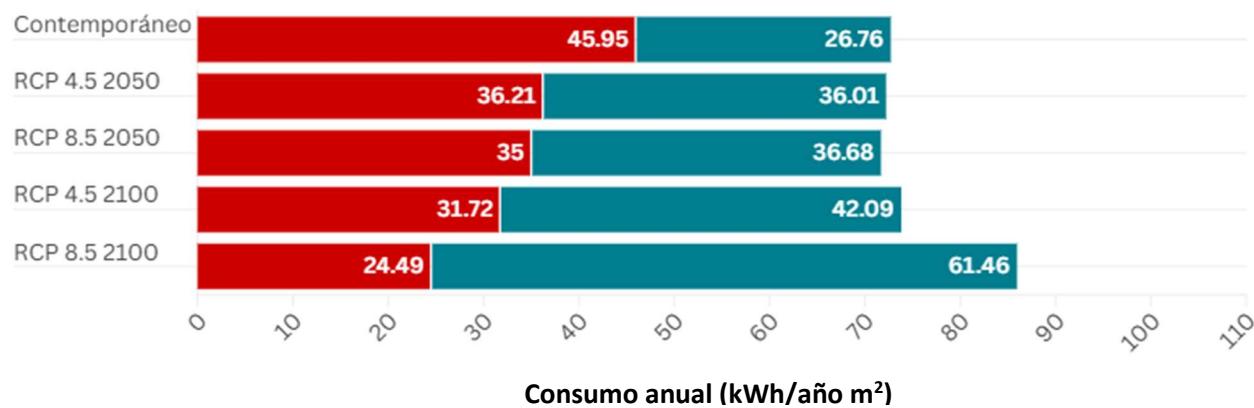
Ilustración 28 Diagrama de energía requerida según su fin en Casa 1 en los panoramas analizados, A) consumo total, kWh/año; B) consumo por metro cuadrado, kWh/año m<sup>2</sup>; C) consumo por metro cúbico, kWh/año m<sup>3</sup>.

■ Calefacción ■ Enfriamiento



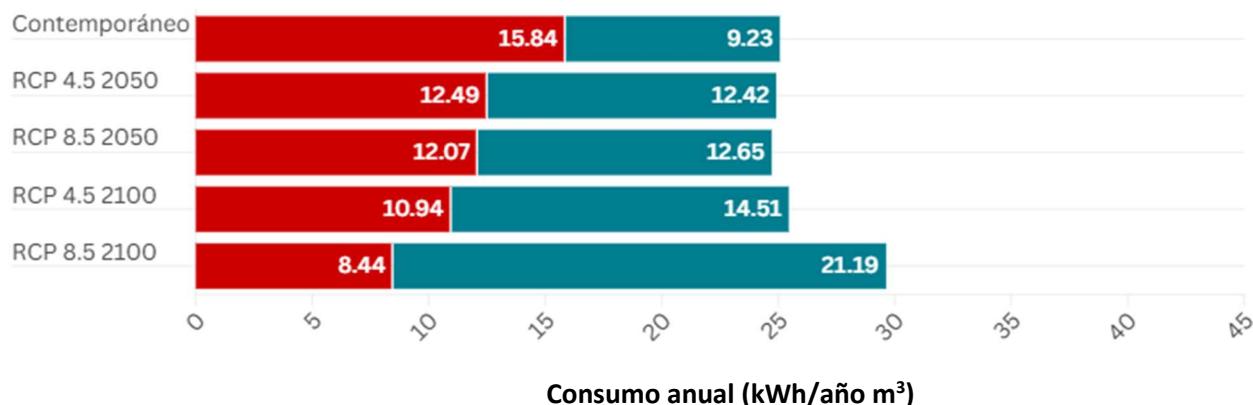
A)

■ Calefacción ■ Enfriamiento



B)

■ Calefacción ■ Enfriamiento



C)

Ilustración 29 Diagrama de energía requerida según su fin en Casa 2 en los panoramas analizados, A) consumo total, kWh/año; B) consumo por metro cuadrado, kWh/año m<sup>2</sup>; C) consumo por metro cúbico, kWh/año m<sup>3</sup>.

A pesar de tener diferencias en su estructura y comportamiento en ambas viviendas la aproximadamente la mitad de la energía utilizada en la calefacción es utilizada en el área común, misma que dependiendo de los usos y criterios de los habitantes será o no utilizada. Esta misma tendencia persiste en la vivienda 1 en cuanto a la energía de enfriamiento, probablemente debido a que al tener viviendas a los costados y en la parte posterior las ganancias de calor solo serán a través de la azotea. Significando que la vivienda 1 tendrá menores ganancias de calor que las presentadas en la vivienda 2; y que estas ganancias son mayores debido a que pueden presentarse a través de sus múltiples muros expuestos a las condiciones ambientales exteriores.

## 4.2.2 Análisis de emisiones

Conocer las emisiones operativas de dióxido de carbono equivalentes (CO<sub>2</sub>e) asociadas al uso de sistemas de climatización, nos permite brindar un panorama sobre el impacto que tiene el diseño y materiales de construcción de las viviendas y su relación con la generación de emisiones contaminantes. Asimismo, es importante cuantificarlas ya que éstas inducen el calentamiento global, lo cual a su vez hará que la demanda de energía para enfriar los espacios aumente para mantener condiciones de confort de sus habitantes.

Las emisiones de CO<sub>2</sub>e anuales generadas en la vivienda 1 (ilustración 30.a) presentan para todos los escenarios una disminución de la pendiente en la parte central, debido a que es la temporada de primavera-verano y las emisiones producto del enfriamiento de las viviendas son menores a las de la calefacción. También podemos notar que en los escenarios a 2100 las emisiones son visiblemente menores al resto de los escenarios durante la primavera. Asimismo, se puede notar que en el RCP 8.5 2100 las emisiones aumentan durante el verano y disminuyen de nuevo en el otoño. Esto trae como consecuencia una menor cantidad de emisiones acumuladas al final del año.

Por su parte la vivienda 2, ilustración 30.b, presenta una tendencia constante durante el año en todos los escenarios a excepción del RCP 8.5 2100. En este escenario, durante la temporada primavera-verano muestra un cambio de pendiente junto con un aumento considerable hasta el final de esta temporada. La diferencia a partir de este punto de este escenario con respecto del resto de los escenarios se mantiene hasta el término del año.

A partir de la información calculada podemos notar un gran impacto en la temporada de verano para los escenarios desarrollados en 2100, al cual es más susceptible la vivienda 2.

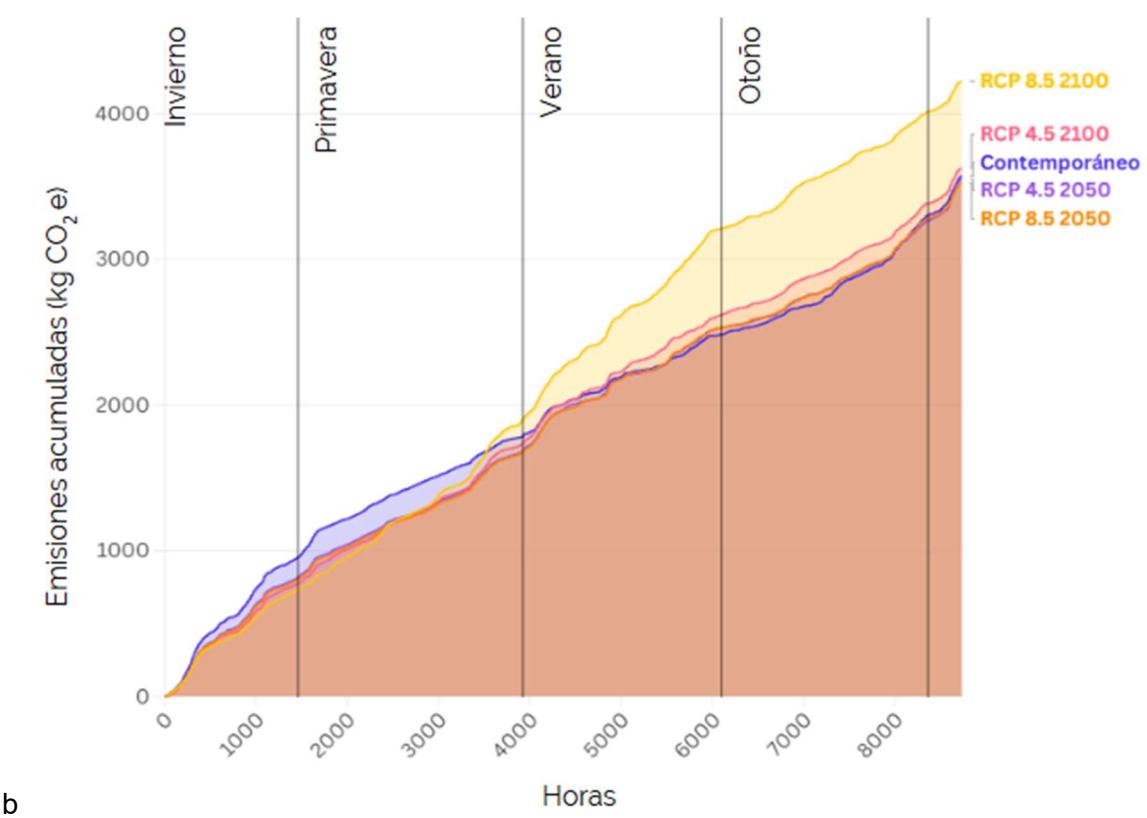
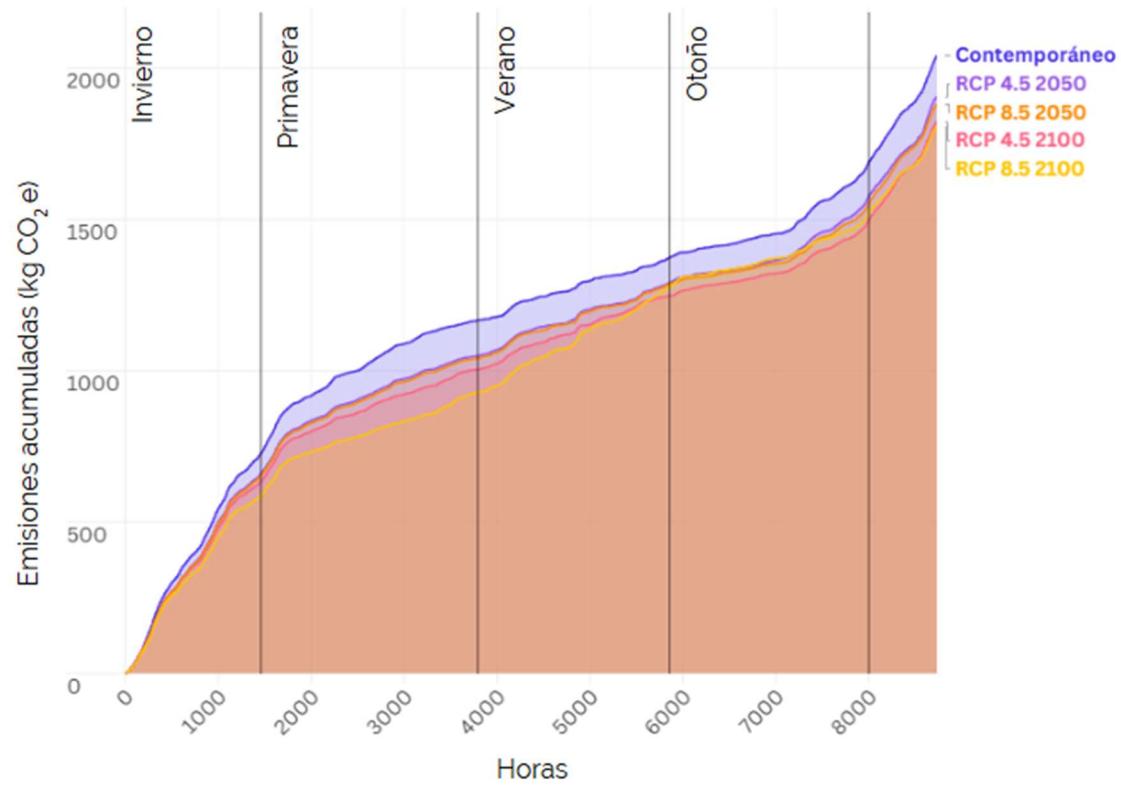


Ilustración 30 Emisiones acumuladas en Vivienda 1 y 2 en kgCO<sub>2</sub>e

En la Ilustración 31, se muestran los resultados de las emisiones de CO<sub>2</sub>e por metro cuadrado de vivienda. Se observa que las emisiones al ser producto del consumo de energía eléctrica mantienen las tendencias mencionadas en la figura anterior (Ilustración 30). Algo destacable es que en el escenario contemporáneo las emisiones por metro cuadrado de la vivienda 2 son casi un tercio menores que las de la vivienda 1. También es importante mencionar que esta diferencia va disminuyendo en los escenarios subsecuentes. Asimismo, es notable que la vivienda 2 muestra una tendencia de aumento de sus emisiones, mientras que en la vivienda 1 éstas disminuyen con respecto al escenario contemporáneo.

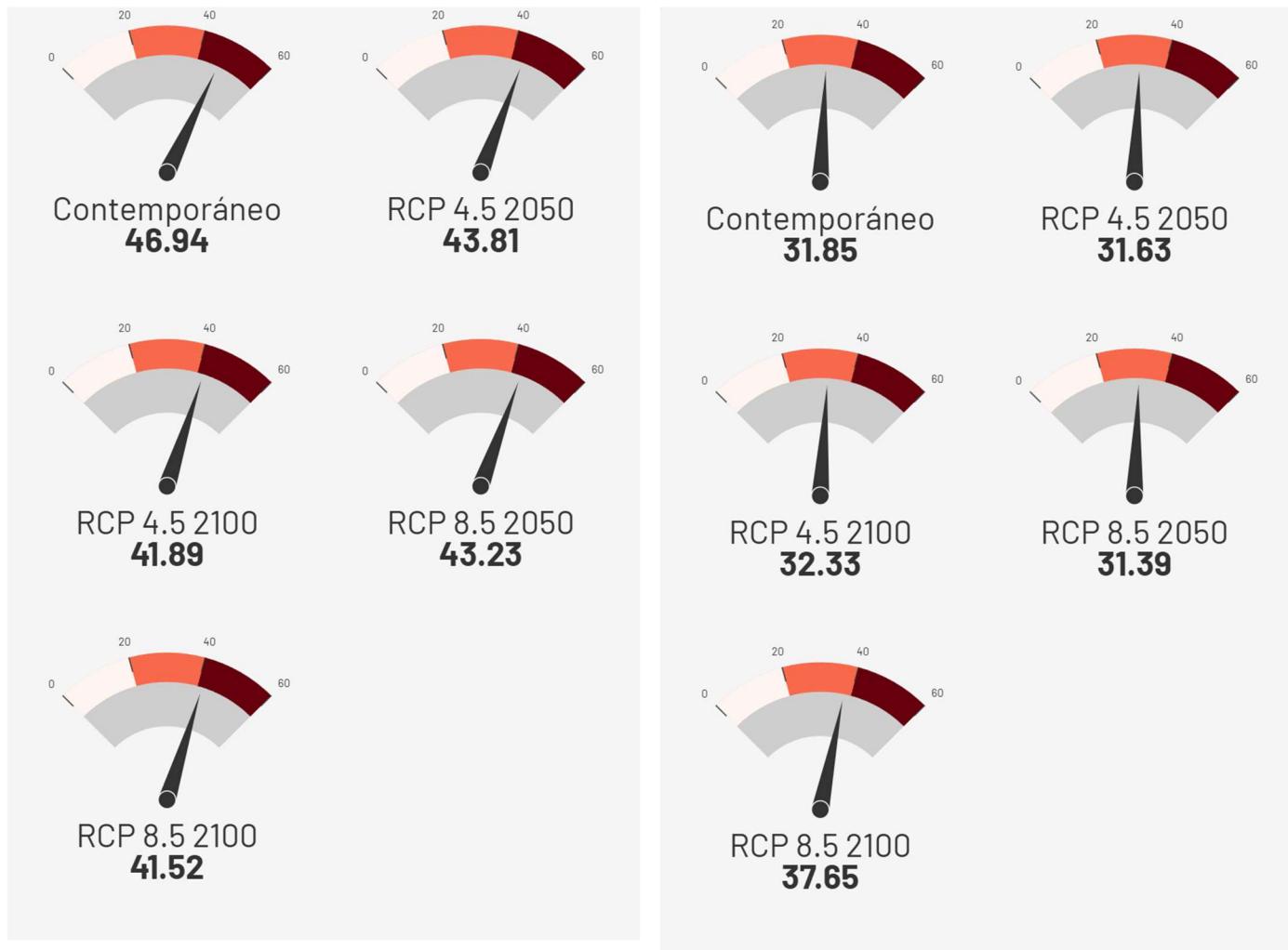


Ilustración 31 Comparación de emisiones requeridas para mantener condiciones de confort térmico en a) Vivienda 1 y b) Vivienda 2, kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>

# 5 Conclusiones

El desarrollo de este proyecto constó de varias fases, la primera tuvo como fin en recabar información sobre los productores locales de ladrillos, a partir de esta información se seleccionaron productores para conocer propiedades térmicas de los productos locales; lo cual nos permitió tener mayor certeza de que los valores dados durante la simulación representaban el comportamiento de las viviendas locales. Asimismo, las simulaciones desarrolladas tuvieron por fin el conocer el comportamiento térmico de una vivienda tipo en la ciudad de Durango frente a los diversos escenarios propuestos: clima contemporáneo, RCP 4.5 2050, RCP 4.5 2100, RCP 8.5 2050 y RCP 8.5 2100, todo esto a fin de conocer las emisiones generadas por uso de energía para mantener el confort en las viviendas y escenarios analizados.

A través del análisis de la información de producción de ladrillo rojo recocido en la ciudad, se encontró que los productores locales se encuentran principalmente en el sur, siendo el cuadrante sureste el de mayor densidad ya que alberga a más de la mitad de los productores (93%). Esta distribución se debe muy probablemente a la cercanía con los bancos de material, como lo son los sitios de La loma y El Nayar, donde se han explotado los márgenes del río El Tunel.

Al analizar las propiedades de los ladrillos proporcionados por los productores de ladrillo locales, estas muestran baja variación entre ellas ( $0.0393 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ). Por tanto, se puede considerar que, aunque el proceso de producción es artesanal, los ladrillos analizados en este trabajo tienen propiedades bastante homogéneas y consistentes entre los diversos lotes muestreados. Esto es debido a la baja diferencia entre sus medias y su baja dispersión de resultados;  $0.3106 \pm 0.044 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  para el productor local 1,  $0.3380 \pm 0.0169 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  para el productor local 2 y  $0.3499 \pm 0.0207 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  para el productor local 3.

Por su parte los ladrillos mecanizados muestran una diferencia de medias considerable y además tienen una conductividad alta con respecto a los ladrillos locales,  $0.6164 \pm 0.0321 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . Finalmente, los ladrillos locales D, comercializados como “térmicos”, muestran una dispersión de  $0.0702 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  en sus resultados, la cual hace difícil compararlos con el resto de los productores. Por lo que se recomendaría realizar un análisis al proceso de este productor en planta para buscar la causa de esta variabilidad en su producto.

Los ladrillos locales muestran valores de conductividad térmica menores a los que se reportan en otras investigaciones realizadas en ladrillos rojo recocido (este trabajo  $0.3328 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ). En trabajos reportados en la literatura se identificaron valores de  $0.535 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (Villaquirán-Caicedo et al., 2023),  $0.691 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (Sánchez Molina et al., 2020) y  $0.814 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (Borbón Almada et al., 2019), los cuales resultan hasta 144% más elevados que los encontrados para el ladrillo rojo recocido analizado. En contraste, los valores encontrados en este trabajo son cercanos a aquellos encontrados en ladrillos que han sido modificados para mejorar su desempeño térmico como los presentados por Buratti et al. de  $0.212 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (Buratti et al., 2022), Mawra et al. de  $0.290 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (Mawra et al., 2023) y Arslan et al. de  $0.267 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (Arslan et al., 2021).

Por otro lado, es importante señalar que es común que ante la ausencia de valores de ladrillos rojo recocido por parte de los productores de materiales nacionales, en la práctica se tienden a utilizar los valores encontrados en la literatura como los publicados en la NOM-020-ENER-2011:  $0.872$ - $0.698 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (Secretaría de Energía, 2011) o los que se encuentran en libros de transferencia de calor, los cuales oscilan entre  $1.30$ - $0.72 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (Cengel, Yunus, Ghajar, 2023).

En el desarrollo de las simulaciones se pudo observar que la vivienda 2 tiende a ganar más calor que la vivienda 1. Esto se observó principalmente en las habitaciones de la planta alta, las cuales son áreas con temperaturas más altas, lo cual está asociado a la exposición que tiene esta vivienda a las condiciones de radiación y temperatura ambiente. En la mayoría de los escenarios la temperatura de la vivienda 2 es mayor en casi 2 grados, a consecuencia de que carece de construcciones colindantes. Debido a esta condición las habitaciones de la planta alta son espacios donde se requerirá mayor energía para mantener temperaturas de confort, afectando la habitabilidad de estas. Mientras que, la vivienda 1, tiene mayor dispersión en sus temperaturas (temperaturas altas y temperaturas bajas) y en promedio tiene temperaturas más cercanas a la temperatura ambiente. También como consecuencia de esta dispersión, la vivienda 1 durante la temporada

invernal presenta temperaturas menores, más cercanas a la temperatura ambiente, con lo que en esta temporada es en aquella que el confort será mayor para los habitantes de la misma.

Debido al clima templado de la ciudad de Durango, la temporada invernal tiene un gran peso en la demanda de energía para climatización. Por esto, aumentos graduales como los presentados en el RCP 4.5 2050 y RCP 8.5 2050, hacen que disminuya la demanda total, aunque estos comienzan a invertir la tendencia del gasto de energía, pasando de una calefacción dominante a una necesidad de enfriamiento.

El análisis de la demanda de energía de ambas viviendas muestra que la vivienda 1 a pesar de tener una demanda total menor, al ser considerada tanto por metro cubico como por metro cuadrado, es mas intensa en su requerimiento de energía, pues en todos los escenarios es la vivienda 1 la que tiene una demanda mayor por metro cuadrado y metro cubico. Esto refuerza la importancia de considerar el correcto análisis de este tipo de viviendas puesto que debido a su tipología, su construcción es comúnmente desarrollada en grandes volúmenes de viviendas con la misma planta arquitectónica y envolvente térmica, por tanto el impacto podrá considerarse a partir del volumen total de viviendas desarrolladas con el mismo requerimiento de energía para establecer temperaturas de confort.

Por otro lado, la vivienda 1 muestra una disminución en sus emisiones totales (emisiones por uso de calefacción y enfriamiento). Esto sucede aun cuando la temperatura ambiente aumenta y en el escenario RCP 8.5 se requiere el doble de energía en contraste con el escenario contemporáneo. Esto sucede debido a que los equipos de calefacción se requieren en mayor proporción y aunque hay crecimiento en la demanda de energía para el enfriamiento, la demanda total resulta menor a la que se requiere cuando se simula con un escenario de temperaturas contemporáneas. En el caso de la vivienda 2, la disminución de la demanda producto de la calefacción es significativa, sin embargo, el aumento de la demanda de enfriamiento suple y sobrepasa esta disminución en los escenarios del año 2100.

Las emisiones operativas de CO<sub>2</sub>e para los escenarios contemporáneos durante el invierno son las que tienen mayor impacto en el acumulado anual, por su parte en los escenarios de los distintos RCP en la temporada de verano se presenta un aumento significativo en las emisiones, esto es notorio en el caso del RCP 8.5 2100, donde en la vivienda 1 alcanza los valores de los escenarios RCP 4.5 2050 y RCP 8.5 2050 para después disminuir durante la temporada de otoño y en la vivienda 2 es en este punto donde tiene un aumento que lo pone por encima del resto de los escenarios hasta el final de la simulación.

La vivienda 1 almacena menos calor que la vivienda 2 debido a su configuración y el bajo volumen de aire capaz de almacenarlo. Es por esto por lo que, al presentarse temperaturas ambiente inferiores, esta tiene mayores emisiones por metro cuadrado que la vivienda 2. Y al aumentar la temperatura ambiente la vivienda 2 se ve incapaz de disipar el calor que recibe, por consiguiente, aumentan sus emisiones al aumentar la energía requerida para enfriamiento.

Debido a que se identificó una baja conductividad térmica en los ladrillos locales, se recomienda que se consideren las propiedades reales de los ladrillos producidos para evitar que se genere una sobreestimación de la conductividad térmica. Ya que esto se traduciría directamente a un requerimiento energético erróneo en los análisis de edificaciones. El utilizar valores no representativos de los materiales locales en cualquier tipo de cálculo, ya sea analítico o de simulación, llevaría a suponer un flujo de calor más alto entre los elementos constructivos y el medio ambiente. Esto también llevaría a sobreestimar cargas de calefacción y refrigeración en las edificaciones de interés. Finalmente, ya que se encontraron valores atractivos en las propiedades de los ladrillos locales, se recomienda que se realice a futuro un estudio con mayor representatividad del producto a fin de caracterizarlo de una manera extensivamente y con ello aspirar a establecer un valor representativo para la producción local.

De acuerdo con lo observado sobre el estado inmobiliario del estado y el país, es necesaria la acción para el desarrollo de vivienda digna para la población; y para ello los profesionistas, desarrolladores de vivienda e instituciones gubernamentales relacionadas con los procesos de diseño, dimensionamiento y análisis de las viviendas requieren ser conscientes no sólo de las necesidades actuales de los usuarios, sino también de los escenarios posibles a los que se enfrentaran dichas construcciones y sus habitantes. El análisis de las viviendas frente a los posibles aumentos de la temperatura ambiente en diversos escenarios de cambio

climático, como los propuestos en los RCPs, es una herramienta necesaria para la planeación y desarrollo de los proyectos habitacionales.

# 6 Referencias bibliográficas

- Abohelal, M., Nour, W., Eldarwish, I., & Dewer, H. (2023). Effect of Recycled Brick Mixture on Energy Efficiency in Building Exteriors. *Civil Engineering and Architecture*, 11(6), 3471–3478.  
<https://doi.org/10.13189/cea.2023.110617>
- Arboit, M. E., Maglione, D. S., & Mutani, G. (2020). Determinación del factor forma (FF): el caso del Área Metropolitana de Mendoza. *Cuaderno Urbano*, 28(28), 9. <https://doi.org/10.30972/crn.28284322>
- Arslan, C., Gencel, O., Borazan, I., Sutcu, M., & Erdogmus, E. (2021). Effect of waste-based micro cellulose fiber as pore maker on characteristics of fired clay bricks. *Construction and Building Materials*, 300(June), 124298.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124298>
- ASHRAE. (2017). ASHRAE Handbook of Fundamentals. In *Atlanta*, GA.
- ASTM\_Standard\_C518-15. (2015). Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. *ASTM International*, 1–15.
- ASTM International. (2022). Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock by Thermal Needle Probe Procedure. *ASTM International Standard*, 10. <https://www.astm.org/d5334-22.html>
- Attia, S., & Gobin, C. (2020). Climate change effects on belgian households: A case study of a nearly zero energy building. *Energies*, 13(20). <https://doi.org/10.3390/en13205357>
- Borbón Almada, A. C., Alpuche Cruz, M. G., Miranda Pasos, I., Marincic Lovriha, I., & Ochoa de la Torre, J. M. (2019). Materiales reciclados aligerados y su influencia en el consumo de energía eléctrica en viviendas económicas. *Acta Universitaria*, 29, 1–15. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2096>
- Buratti, C., Merli, F., Belloni, E., & Spaccini, F. (2022). Thermal and acoustic performance of additive aerogel-clay bricks. *Journal of Physics: Conference Series*, 2385(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2385/1/012016>
- Cengel, Yunus, Ghajar, A. J. (2023). Steady Heat Conduction 3-164. *Heat and Mass Transfer*, 117–132.
- Center for Climate and Energy Solutions. (2016). *Main Greenhouse Gases*. <https://www.c2es.org/content/main-greenhouse-gases/>
- Evin, D., & Ucar, A. (2019). Energy impact and eco-efficiency of the envelope insulation in residential buildings in Turkey. *Applied Thermal Engineering*, 154(December 2018), 573–584.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.102>
- FANOSA. (2011). *Ficha técnica*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/84531/2\\_FANOSA.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/84531/2_FANOSA.pdf)
- Gobierno de México. (2017). *Normas Oficiales Mexicanas en Eficiencia Energética -Edificaciones-*.  
<https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/normas-oficiales-mexicanas-en-eficiencia-energetica-edificaciones>
- Gobierno del Estado de Durango. (2006). *Estrategia de manejo de ladrilleras en el estado de Durango*.
- Habitat para la Humanidad México. (2019). *14 millones de familias en México no pueden construir o comprar su casa*.  
<https://www.habitatmexico.org/article/14-millones-de-familias-sin-vivienda-adecuada>
- IEEE 442-2017 Guide for Thermal Resistivity Measurements of Soils and Backfill Materials, IEEE Power and Energy Society 1 (2018). [https://release1-www.engineeringvillage.com/share/document.url?mid=cpx\\_M1bd3e50216383c57ef6M73231017816339&database=cpx](https://release1-www.engineeringvillage.com/share/document.url?mid=cpx_M1bd3e50216383c57ef6M73231017816339&database=cpx)
- INEGI. (n.d.). *Vivienda*.
- Intergovernmental panel on climate change. (n.d.). *Activities*. Retrieved April 10, 2024, from <https://archive.ipcc.ch/activities/activities.shtml>
- International Energy Agency. (2023a). *Buildings*. <https://www.iea.org/energy-system/buildings#tracking>
- International Energy Agency. (2023b). *Electricity*. <https://www.iea.org/energy-system/electricity>

- International Energy Agency. (2023c). *Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>
- International Energy Agency. (2023d). *Heating*. <https://www.iea.org/energy-system/buildings/heating>
- International Energy Agency. (2023e). *Space Cooling*. <https://www.iea.org/energy-system/buildings/space-cooling>
- Jiménez Tiberio, A. (2022). La hermeticidad al aire en España. Evolución normativa y su importancia para los edificios de consumo casi nulo. In *CONTART*. [http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484\\_SISTEM PEMBETUNGAN\\_TERPUSAT\\_STRATEGI\\_MELESTARI](http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI)
- Jiménez Torres, M., Bienvenido-Huertas, D., May Tzuc, O., Bassam, A., Ricalde Castellanos, L. J., & Flota-Bañuelos, M. (2023). Assessment of climate change's impact on energy demand in Mexican buildings: Projection in single-family houses based on Representative Concentration Pathways. *Energy for Sustainable Development*, 72(January), 185–201. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.12.012>
- Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S. L., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., ... Zommers, Z. (2022). Synthesis report of the IPCC sixth assessment report. *An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 335(7633), 1318.
- Mawra, K., Rashid, K., Ju, M., Alqahtani, F. K., & Zafar, I. (2023). Thermo-physical and energy performance of building envelope modified by natural fiber through building information modelling. *Journal of Building Engineering*, 68(November 2022). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106117>
- Mirage. (n.d.). *Minisplit Inverter Inverter X*. [https://www.tiendamirage.mx/index.php?controller=attachment&id\\_attachment=18&srsltid=AfmBOopcQTGbToMmh181DuUhMH2K4dGLztuVJzkR\\_sykBk9nL-0oeuOu](https://www.tiendamirage.mx/index.php?controller=attachment&id_attachment=18&srsltid=AfmBOopcQTGbToMmh181DuUhMH2K4dGLztuVJzkR_sykBk9nL-0oeuOu)
- Munir, M. J., Kazmi, S. M. S., Wu, Y. F., Hanif, A., & Khan, M. U. A. (2018). Thermally efficient fired clay bricks incorporating waste marble sludge: An industrial-scale study. *Journal of Cleaner Production*, 174, 1122–1135. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.060>
- Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- ONNCCE. (2012). NMX-C-404-ONNCCE-2012, Industria de la construcción- mampostería- bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural- especificaciones y métodos de ensayo. *DOF*.
- ONNCCE. (2013a). NMX-C-036-ONNCCE-2013, Industria de la construcción mampostería-resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines- método de ensayo. *DOF*.
- ONNCCE. (2013b). NMX-C-037-ONNCCE, Industria de la construcción - Mampostería - Determinación de la absorción total y la absorción inicial de agua en bloques, tabiques o ladrillos y tabicones – Método de ensayo. *Organismo Nacional de Normalización y Certificación de La Construcción y La Edificación*, S. C., México. <https://onncce.org.mx/venta-de-normas/normas-onncce?view=item&mc=65&mi=55>
- Pablo Ampudia. (2020). *Los matices de la vivienda en México | Tec de Monterrey*. ITESM. <https://futurociudades.tec.mx/es/los-matices-de-la-vivienda-en-mexico>
- Pedro Kumamoto. (2024). La vivienda en México, primera parte. *El Financiero*. <https://www.elfinanciero.com.mx/opinion/pedro-kumamoto/2024/01/09/la-vivienda-en-mexico-primera-parte/>
- Porrúa, F. E., Hidalgo, J. Z., Arroyo, A. M., Raga, G., & García, C. G. (2023). *Estado y perspectivas del cambio climático en México: un punto de partida*.
- Registro Unico de Vivienda. (2019). *Glosario De Términos Del Ruv*. 1–94. <http://portal.ruv.org.mx>
- Representative Concentration Pathway. (2021). In *Wikipedia* (pp. 4–7). [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Representative\\_Concentration\\_Pathway&oldid=1136356456](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Representative_Concentration_Pathway&oldid=1136356456)
- Rodríguez Moreno, V. M., Medina García, G., Diaz Padilla, G., Ruiz Corral, J. A., Estrada Avalos, J., & Mauricio Ruvalcaba, J. E. (2021). ¿Por qué México es un país altamente vulnerable al cambio climático? *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 25, 45–57. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i25.2819>

- Saiz, A., Cuellar Ceron, A., Rodríguez, L., & Ganitsky White, R. (2022). Confronting the Housing Challenge in Latin America Part I – Reflections on the Evolution of the Housing Market in Latin America: Realities and Dreams. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4238950>
- Salleh, S. F., Suleiman, A. A., Daud, H., Othman, M., Sokkalingam, R., & Wagner, K. (2023). Tropically Adapted Passive Building: A Descriptive-Analytical Approach Using Multiple Linear Regression and Probability Models to Predict Indoor Temperature. *Sustainability (Switzerland)*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/su151813647>
- Samanta Escobar. (2024). *Crisis de vivienda: Hay un desequilibrio entre salarios, precios y producción habitacional*. El Economista. <https://www.eleconomista.com.mx/econohabitat/Crisis-de-vivienda-Hay-un-desequilibrio-entre-salarios-precios-y-produccion-habitacional-20240306-0149.html>
- Sánchez Molina, J., Sánchez Zúñiga, J., Xiomara, C., & Fuentes, D. (2020). Developing a Ceramic Construction Product under Bioclimatic and Sustainable Architecture Principles. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 30(2).
- Secretaría de Energía. (2011). NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones.- Envoltorio de edificios para uso habitacional. *Diario Oficial de La Federación*, 53(9), 1689–1699.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2024). *Aviso Factor De Emisión Del Sistema Eléctrico Nacional 2023*. 223, 11320. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/896217/aviso\\_fesen\\_2023.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/896217/aviso_fesen_2023.pdf)
- Secretaría de Salud. (2015). *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicano. Artículo 4°*. <https://www.gob.mx/salud/articulos/constitucion-politica-de-los-estados-unidos-mexicano-articulo-4>
- Sisternes García, Á. (2022). *Envolvente térmica: qué es y cómo afecta al comportamiento energético de los edificios*. Reto Kommerling. <https://retokommerling.com/envolvente-termica/#:~:text=La envolvente térmica es el terreno o espacios no habitables>.
- Topelson, S. (2020). *Estado Actual de la Vivienda en México 2019*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/592535/EdicionEAVM2019\\_final-com.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/592535/EdicionEAVM2019_final-com.pdf)
- TRNSYS. (2019). *What is TRNSYS?* <https://www.trnsys.com/>
- UN-Habitat. (2022). *The IPCC report on mitigation of climate change reckons that Net Zero is still possible*. [https://unhabitat.org/news/12-apr-2022/the-ipcc-report-on-mitigation-of-climate-change-reckons-that-netzero-is-still](https://unhabitat.org/news/12-apr-2022/the-ipcc-report-on-mitigation-of-climate-change-reckons-that-net-zero-is-still)
- United Nations. (1992). United Nations Framework Convention on Climate Change United Nations. *United Nations Framework Convention on Climate Change*, 1–33.
- United States Environmental Protection Agency. (2023). *Sources of Greenhouse Gas Emissions*. <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>
- Venkatesan, M., Raja, M., Sivalaksmi, S., & Suresh, S. (2022). Experimental study of heat transfer coefficients on red clay brick wall. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(10), 5949–5959. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10896-y>
- Villaquirán-Caicedo, M. A., Hernández-Rengifo, E., Agudelo, K., Arias, J., Viera Ballesteros, M. C., & Carvajal, D. (2023). Evaluación del desempeño térmico de ladrillos ecoamigables con incorporación de residuos de mullita. *Ingeniería y Desarrollo*, 39(01), 25–43. <https://doi.org/10.14482/inde.39.1.624.181>

# Apéndices

## a.1 Calibración de equipos

Apéndice 1 Estándar de calibración



September 15, 2017

TA Instruments – Waters LLC  
107 Audubon Road, Building 1-40  
Wakefield, MA 01880  
Tel: 781-233-1717  
Fax: 781-941-2484

### Thermal Conductivity Reference Sample Certificate

The ~200mmX~200mm specimen  
of Expanded Polystyrene (EPS) #17071335  
was tested at f. LaserComp,  
which is now part of TA Instruments – Waters LLC  
in accordance with ASTM C518.

FOX200 Heat Flow Meter Instrument was first calibrated  
using a 1450D Standard Reference Material (SRM) issued and certified  
by the National Institute of Standards and Technology (NIST).

Next the EPS # 17071335 was tested.

The results are as follows:

#### Thermal conductivity:

$\lambda = 0.03079 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  @  $2.5^{\circ}\text{C}$  mean temperature  
 $\lambda = 0.03187 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  @  $12.5^{\circ}\text{C}$  mean temperature  
 $\lambda = 0.03292 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  @  $22.5^{\circ}\text{C}$  mean temperature  
 $\lambda = 0.03402 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  @  $32.5^{\circ}\text{C}$  mean temperature  
 $\lambda = 0.03510 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  @  $42.5^{\circ}\text{C}$  mean temperature  
( $\times 6.9335$  to convert to the BTU hr<sup>-1</sup> ft<sup>-2</sup> F<sup>-1</sup> inch units)

Thermal conductivity  $\lambda$   
at different mean temperature  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ )  
can be calculated from the following linear fit:

$$\lambda = 0.00010781 \times t + 0.03051 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Thickness: 20.35 mm

Note: Always use "User type" 1450D calibration  
and "User Entered" thickness (to avoid compression)

With proper care the standard and its certificate  
are valid for 5 years from the date of issue.

**Warning: Do not heat above  $55^{\circ}\text{C}$ !**

Thursday, June 16, 2022, Time 15:04

Wintherm32v3 Version 3.31.116 Uni

Instrument: F200s

Instrument Program Version 89

Instrument Serial Number: 2066

Sample Name: 2022-06-16 prueba EPS-2

Thickness: 20.24mm

Rear Left : 20.22 mm Rear Right : 20.24 mm

Front Left: 20.24 mm Front Right: 20.24 mm

[ ]

[ ]

Thickness obtained : from instrument

#### TEST RUN

Calibration used : 1450b

Calibration File Id: NIST1450bCalibration\_sn2066

Number of transducers per plate: 1

Number of transducers used per plate: 1

Number of Setpoints: 1

Setpoint duration: 50 min

#### Block Averages for setpoint 1 in SI units

	Tupper [°C]	Tlower [°C]	Qupper [µV]	Qlower [µV]	Lambda [W/mK]
-ne-	10.20	35.10	-2207	2604	0.04617
-te-	10.03	34.92	-1635	1709	0.03217
-te-	10.02	35.02	-1639	1778	0.03271
-te-	10.00	35.01	-1660	1751	0.03265
-pe-	9.99	34.99	-1633	1774	0.03261
-pe-	10.02	35.02	-1639	1774	0.03267
-pe-	10.02	35.02	-1650	1761	0.03266

Thursday, June 16, 2022, Time 15:54

Setpoint No. 1

Setpoint Upper: 10.00 °C

Setpoint Lower: 35.00 °C

Temperature Upper: 10.01 °C

CalibFactor Upper: 0.024445

Results Upper: 0.03246 W/mK

Temperature Lower: 35.01 °C

CalibFactor Lower: 0.022919

Results Lower: 0.03283 W/mK

Percent Difference: 1.13%

Thermal Equilibrium Criteria:  
 Temperature Equilibrium: 0.20  
 Between Block HFM Equil.: 49  
 HFM Percent Change: 2.00  
 Min Number of Blocks: 4  
 Calculation Blocks: 3

#### Results Table -- SI Units

Mean Temp	Upper Cond	Lower Cond	Average Cond
22.51	0.03246	0.03283	0.03265

*Apéndice 3 Prueba de calibración de equipo Fox 200 a 24°C*

Friday, June 17, 2022, Time 10:10

Wintherm32v3 Version 3.31.116 Uni

Instrument: F200s

Instrument Program Version 89

Instrument Serial Number: 2066

Sample Name: 2022-06-07 EPS

Thickness: 20.29mm

Rear Left : 20.32 mm Rear Right : 20.27 mm

Front Left: 20.32 mm Front Right: 20.24 mm

[ ]

[ ]

Thickness obtained : from instrument

#### TEST RUN

Calibration used : 1450b

Calibration File Id: NIST1450bCalibration\_sn2066

Number of transducers per plate: 1

Number of transducers used per plate: 1

Number of Setpoints: 1

Setpoint duration: 136 min

Block Averages for setpoint 1 in SI units

	Tupper	Tlower	Qupper	Qlower	Lambda
	[°C]	[°C]	[μV]	[μV]	[W/mK]
-ne-	11.56	36.31	-2572	4147	0.06465
-ne-	11.01	37.22	-1734	1869	0.03294
-ne-	11.01	37.20	-1729	1858	0.03282

-pe-	11.01	38.77	-1791	2306	0.03525
-ne-	11.03	37.36	-1787	1554	0.03050
-ne-	11.01	37.21	-1734	1878	0.03303
-ne-	11.01	37.22	-1732	1894	0.03314
-ne-	11.01	37.22	-1736	1873	0.03300
-ne-	11.01	37.23	-1728	1866	0.03284
-ne-	11.01	37.20	-1733	1868	0.03294
-pe-	11.07	38.90	-1799	2292	0.03510
-ne-	11.01	37.33	-1777	1618	0.03100
-ne-	11.01	37.20	-1737	1869	0.03298
-te-	11.05	36.98	-1717	1807	0.03258
-te-	11.01	37.01	-1709	1854	0.03282
-se-	11.03	37.03	-1722	1844	0.03287
-pe-	11.02	37.02	-1723	1847	0.03290
-pe-	11.01	37.02	-1712	1854	0.03285
-pe-	11.02	37.02	-1719	1847	0.03286

Friday, June 17, 2022, Time 12:27

Setpoint No. 1  
 Setpoint Upper: 11.00 °C  
 Setpoint Lower: 37.00 °C  
 Temperature Upper: 11.02 °C  
 CalibFactor Upper: 0.024407  
 Results Upper: 0.03271 W/mK  
 Temperature Lower: 37.02 °C  
 CalibFactor Lower: 0.022891  
 Results Lower: 0.03303 W/mK  
 Percent Difference: 0.95%

Thermal Equilibrium Criteria:  
 Temperature Equilibrium: 0.20  
 Between Block HFM Equil.: 49  
 HFM Percent Change: 2.00  
 Min Number of Blocks: 4  
 Calculation Blocks: 3

#### Results Table -- SI Units

Mean Temp	Upper Cond	Lower Cond	Average Cond
24.02	0.03271	0.03303	0.03287



13440-07  
4.2018

**METER**

**METER Group, Inc.**  
**Certificate of Quality Assurance**

<b>Model</b>	TEMPOS	<b>Date</b>	July 24, 2023
<b>Internal Control Unit #</b>	TEM00000731	<b>Technician</b>	SD

Sensor	Serial #	K ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	C ( $\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$ )	D( $\text{mm}^2\text{s}^{-1}$ )	Temperature °C	Standard
SH-3	03581	0.376	1.875	0.200	22.50 °C	DB5175

**METER Certification**

This document is to certify that the instrument indicated above has been tested and approved according to the METER Quality Assurance department and has shown to function properly and to be free of event flaws or defects.

## a.2 Temperatura confort

Apéndice 5 Temperaturas de confort para RCP 4.5 2050

RCP 4.5 2050			
Mes	Ta (°C)	Tc max (°C)	Tc min (°C)
Ene	14,40	23,29	18,56
Feb	17,00	24,53	19,80
Mar	19,40	25,60	20,88
Abr	23,00	27,15	22,43
Mayo	25,40	28,20	23,48
Jun	25,50	28,24	23,52
Jul	22,70	27,02	22,30
Ago	22,50	26,94	22,22
Sept	21,70	26,59	21,87
Oct	20,70	26,16	21,44
Nov	17,20	24,62	19,89
Dic.	14,60	23,39	18,66

Apéndice 6 Temperaturas de confort para RCP 4.5 2100

RCP 4.5 2100			
Mes	Ta (°C)	Tc max (°C)	Tc min (°C)
Ene	15,3	23,73	19,00
Feb	18,1	25,02	20,30
Mar	20,7	26,16	21,44
Abr	24,4	27,76	23,04
Mayo	26,8	28,83	24,11
Jun	26,7	28,78	24,06
Jul	23,9	27,54	22,82
Ago	23,6	27,41	22,69
Sept	22,7	27,02	22,30
Oct	21,8	26,64	21,91
Nov	18,7	25,29	20,57
Dic.	15,4	23,77	19,05

Apéndice 7 Temperaturas de confort para RCP 8.5 2050

RCP 8.5 2050			
Mes	Ta (°C)	Tc max (°C)	Tc min (°C)
Ene	14,8	23,48	18,76
Feb	17,1	24,57	19,85
Mar	19,7	25,73	21,01

Abr	23	27,15	22,43
Mayo	25,5	28,24	23,52
Jun	25,6	28,29	23,57
Jul	22,9	27,11	22,39
Ago	22,8	27,07	22,34
Sept	21,9	26,68	21,96
Oct	20,8	26,21	21,48
Nov	17,6	24,80	20,08
Dic.	14,8	23,48	18,76

Apéndice 8 Temperaturas de confort para RCP 8.5 2100

RCP 8.5 2100			
Mes	Ta (°C)	Tc max (°C)	Tc min (°C)
Ene	17,4	24,71	19,99
Feb	20,1	25,90	21,18
Mar	23,1	27,20	22,47
Abr	27	28,92	24,20
Mayo	29,1	29,91	25,19
Jun	28,9	29,81	25,09
Jul	26	28,47	23,74
Ago	25,9	28,42	23,70
Sept	24,8	27,93	23,21
Oct	24,3	27,72	22,99
Nov	21	26,29	21,57
Dic.	18,1	25,02	20,30

# a.3 Propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos

Apéndice 9 Resistencia a la compresión de ladrillos analizados

Nombre	Masa	Alto	Largo	Ancho	Área	Velocidad de carga	Carga fractura	Resistencia a la compresión
	g	cm	cm	cm	mm <sup>2</sup>	kN/s	N	MPa
Mecánico 01	966	6	9.9	9.2	9108	2.19	14540	1.5963
Mecánico 02	972	6.1	10	9.1	9100	1.25	11110	1.2208
Mecánico 03	997	6.2	10	9.6	9600	1.32	10960	1.1416
Mecánico 04	971	6	9.9	9.3	9207	1.26	13240	1.4380
Mecánico 05	976	6	10	9.2	9200	1.26	9720	1.0565
Mecánico 06	989	6.1	10.1	9.5	9595	1.31	10110	1.0536
Mecánico 07	995	5.9	10.1	9.4	9494	1.30	10140	1.0680
Mecánico 08	974	6.1	10	9.3	9300	1.27	11360	1.2215
Mecánico 09	1011	5.9	10	9.8	9800	1.34	10280	1.0489
Mecánico 10	990	6	10	9.2	9200	1.26	11090	1.2054
Tradicional 1	980	4.6	12.6	12	15120	2.07	14290	0.9451
Tradicional 2	914	4.7	11.8	12.1	14278	1.96	16560	1.1598
Tradicional 3	915	4.6	12	11.9	14280	1.96	9020	0.6316
Tradicional 4	941	4.6	12.2	12	14640	2.01	14150	0.9665
Tradicional 5	935	4.5	11.9	12	14280	1.96	13140	0.9201
Tradicional 6	976	4.6	12.2	12.3	15006	2.06	14060	0.9369
Tradicional 7	972	4.7	12.2	12.4	15128	2.07	16310	1.0781
Tradicional 8	983	4.8	12.2	12.3	15006	2.06	15830	1.0549
Tradicional 9	1003	4.8	12.1	12.4	15004	2.06	24600	1.6395
Tradicional 10	965	4.7	12.5	12.3	15375	2.11	13120	0.8533
Tradicional 11	1063	5	12.3	12.5	15375	2.11	16420	1.0679
Tradicional 12	1001	4.9	12	12.5	15000	2.06	8990	0.5993
Tradicional 13	1082	4.9	12	12.5	15000	2.06	6260	0.4173
Tradicional 14	1006	4.8	12.2	12.4	15128	2.07	16830	1.1125
Tradicional 15	1080	4.9	12.3	13	15990	2.19	22760	1.4233
Tradicional 16	1049	5	12.3	13	15990	2.19	10880	0.6804
Tradicional 17	999	4.8	12.3	12.4	15252	2.09	3640	0.2386
Tradicional 18	1025	4.7	12.3	12.1	14883	2.04	7330	0.4925
Tradicional 19	998	4.6	12.2	12.4	15128	2.07	4550	0.3007
Tradicional 21	979	4.7	12.2	12.3	15006	2.06	9960	0.6637
Tradicional 22	1005	4.8	12.2	12.4	15128	2.07	10990	0.7264
Tradicional 23	1022	4.7	12.2	12.6	15372	2.11	13370	0.8697
Tradicional 24	1052	4.8	12.4	12.3	15252	2.09	12940	0.8484
Tradicional 25	1004	4.6	12.5	12.3	15375	2.11	13750	0.8943

Tradicional 26	1032	4.9	12.3	12.2	15006	2.06	9760	0.6504
Tradicional 27	1006	4.9	12.2	12.3	15006	2.06	11990	0.7990
Tradicional 28	1101	4.9	12.1	12.3	14883	2.04	15160	1.0186
Tradicional 29	1127	4.6	12.3	12.5	15375	2.11	14050	0.9138
Tradicional 30	1027	4.8	12.3	12.8	15744	2.16	17200	1.0924
Térmico 01	1426	6	12.7	12.2	15494	2.12	11190	0.7222
Térmico 02	1455	6	12.8	12	15360	2.10	17120	1.1145
Térmico 03	1394	4.9	12.2	11.8	14396	1.97	21820	1.5156
Térmico 04	1356	6.2	12.3	11.8	14514	1.99	7100	0.4891
Térmico 05	1365	5.7	12.3	11.6	14268	1.95	13310	0.9328
Térmico 06	1389	6	12.2	11.5	14030	1.92	10140	0.7227
Térmico 07	1332	6	12	11.8	14160	1.94	5110	0.3608

Apéndice 10 Absorción inicial y porcentaje de absorción de ladrillos analizados

Ladrillo	M <sub>s</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>ss</sub>	S	C <sub>b</sub>	A
	g	g	g	cm <sup>2</sup>	g/(cm <sup>2</sup> x min <sup>0.5</sup> )	
2	0.573	0.642	0.661	104.00	0.0210	15.36%
4	0.548	0.617	0.631	102.00	0.0214	15.15%
5	0.584	0.651	0.673	104.00	0.0204	15.24%
8	0.584	0.646	0.674	104.03	0.0188	15.41%
10	0.554	0.621	0.639	102.00	0.0208	15.34%
21	1.000	1.199	1.227	150.06	0.0419	22.70%
22	0.938	1.085	1.123	147.60	0.0315	19.72%
23	0.950	1.104	1.139	143.96	0.0338	19.89%
27	0.967	1.133	1.175	145.14	0.0362	21.51%
28	0.930	1.102	1.140	146.37	0.0372	22.58%
13	0.922	1.099	1.119	150.04	0.0373	21.37%
14	0.962	1.106	1.148	148.80	0.0306	19.33%
16	0.953	1.118	1.164	147.62	0.0353	22.14%
18	0.701	0.840	0.870	152.52	0.0288	24.11%
20	0.781	0.874	0.914	140.30	0.0210	17.03%
31	0.879	1.048	1.066	146.32	0.0365	21.27%
33	0.926	1.069	1.107	143.96	0.0314	19.55%
34	0.941	1.088	1.128	143.96	0.0323	19.87%
36	0.932	1.056	1.089	146.32	0.0268	16.85%
37	0.924	1.098	1.111	139.20	0.0395	20.24%
41	0.910	1.010	1.071	145.20	0.0218	17.69%

42	0.744	0.855	0.887	155.00	0.0226	19.22%
44	0.720	0.825	0.858	149.94	0.0221	19.17%
45	0.792	0.930	0.948	153.75	0.0284	19.70%
47	0.998	1.159	1.195	151.28	0.0337	19.74%

## a.4 Propiedades térmicas de los ladrillos

Apéndice 11 Propiedades térmicas de ladrillos analizados

Nombre	Masa	Largo	Ancho	Alto	Volumen	Densidad	Conductividad	Calor específico
	kg	cm	cm	cm	m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	W/m·K	J/kg·K
Mecanico01	0.529	10.2	10.0	2.8	0.0002856	1852.2409	0.5552	842.5829
Mecanico02	0.574	10.4	10.0	3.1	0.0003224	1780.3970	0.6011	880.7024
Mecanico03	0.526	9.8	10.1	3.0	0.0002969	1771.4016	0.6572	746.8661
Mecanico04	0.549	10.2	10.0	3.0	0.0003060	1794.1176	0.5958	786.6448
Mecanico05	0.585	10.0	10.4	3.2	0.0003328	1757.8125	0.6460	931.0814
Mecanico06	0.576	10.2	10.0	3.2	0.0003264	1764.7058	0.6261	703.9888
Mecanico07	0.574	9.8	10.0	3.3	0.0003234	1774.8917	0.6496	615.0609
Mecanico08	0.585	10.3	10.1	3.1	0.0003224	1813.9928	0.6281	1015.8070
Mecanico09	0.587	10.3	10.0	3.2	0.0003296	1780.9466	0.6191	905.1366
Mecanico10	0.556	10.2	10.0	3.0	0.0003060	1816.9934	0.5852	570.3561
Tradicional 1	0.930	12.2	12.3	4.9	0.0007352	1264.8002	0.3155	1049.9682
Tradicional 2	0.968	12.1	12.2	4.7	0.0006938	1395.1866	0.2965	908.8390
Tradicional 3	0.925	12.1	12.4	4.5	0.0006751	1370.0050	0.3056	705.8368
Tradicional 4	0.965	12.0	12.4	4.8	0.0007142	1351.0864	0.3485	692.5784
Tradicional 5	0.944	12.0	12.1	4.7	0.0006824	1383.2717	0.3006	861.2431
Tradicional 6	0.960	12.2	12.1	4.8	0.0007085	1354.8299	0.2880	969.8634
Tradicional 7	0.857	12.0	12.1	4.4	0.0006388	1341.4099	0.3047	885.3867
Tradicional 8	0.709	12.3	12.4	3.4	0.0005185	1367.2266	0.2638	894.9991
Tradicional 9	0.852	12.3	12.1	4.5	0.0006697	1272.1449	0.2672	917.8723
Tradicional 10	0.784	12.2	11.5	4.3	0.0006032	1299.5408	0.4154	822.3417
Tradicional 11	1.017	12.2	12.3	4.9	0.0007352	1383.1202	0.3332	957.0149
Tradicional 12	0.946	12.3	12.0	4.8	0.0007084	1335.2529	0.3528	748.0729
Tradicional 13	0.966	12.2	11.8	4.9	0.0007054	1369.4280	0.3662	888.6922
Tradicional 14	0.968	12.3	11.8	4.8	0.0006966	1389.4630	0.3583	721.7176
Tradicional 15	1.029	12.3	12.3	4.8	0.0007261	1416.9806	0.3280	882.8631
Tradicional 16	1.007	12.3	12.2	4.8	0.0007202	1398.0518	0.3387	888.6174
Tradicional 17	0.970	12.3	11.8	4.8	0.0006966	1392.3338	0.3267	857.5529
Tradicional 18	0.953	12.3	11.9	4.8	0.0007025	1356.4368	0.3099	892.5344
Tradicional 19	1.008	12.3	12.0	4.8	0.0007084	1422.7642	0.3387	768.2228
Tradicional 20	0.949	12.3	11.6	4.9	0.0006991	1357.3974	0.3274	787.2909

Tradicional 21	0.911	12.4	11.8	4.7	0.0006877	1324.6978	0.3198	685.5651
Tradicional 22	0.979	12.2	12.2	4.7	0.0006995	1399.4750	0.3472	1087.3124
Tradicional 23	0.945	12.2	11.8	4.8	0.0006910	1367.5673	0.3729	802.6417
Tradicional 24	0.943	12.2	11.8	4.9	0.0007054	1336.8225	0.3359	638.1549
Tradicional 25	0.970	12.1	12.1	4.7	0.0006881	1409.6235	0.3672	1141.4395
Tradicional 26	0.946	12.4	11.8	4.7	0.0006877	1375.5918	0.3838	782.2087
Tradicional 27	0.927	12.0	11.6	4.8	0.0006681	1387.3922	0.3541	824.5685
Tradicional 28	0.958	12.3	12.2	4.8	0.0007202	1330.0235	0.3240	833.8198
Tradicional 29	0.958	12.3	12.0	4.8	0.0007084	1352.1906	0.3414	1156.3951
Tradicional 30	0.940	12.2	11.5	4.7	0.0006594	1425.5167	0.3524	984.9060
Térmico 01	0.915	12.0	12.1	3.8	0.0005517	1658.3297	0.5462	973.4694
Térmico 02	0.750	12.5	12.4	3.4	0.0005270	1423.1499	0.4302	1410.7204
Térmico 03	0.877	12.2	12.3	3.5	0.0005252	1669.8082	0.3935	833.2293
Térmico 04	0.725	11.9	12.6	3.4	0.0005098	1422.1374	0.4989	992.6372
Térmico 05	0.799	12.3	12.5	3.4	0.0005227	1528.4552	0.3207	817.6010
Térmico 06	0.945	12.1	12.2	3.9	0.0005757	1641.4286	0.4051	738.7873
Térmico 07	1.008	12.2	12.4	4.3	0.0006505	1549.5677	0.4042	682.7710
Térmico 08	0.814	12.5	12.5	3.5	0.0005468	1488.4571	0.4016	831.9576
Térmico 09	0.932	12.2	12.1	4.0	0.0005904	1578.3769	0.5317	870.5145
Térmico 10	0.901	12.2	12.4	3.6	0.0005446	1654.4009	0.4058	990.6909