

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y LA TECNOLOGÍA



MAESTRÍA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

CALIDAD DEL AIRE INTERIOR EN VIVIENDAS DE INTERÉS
SOCIAL: ESTRATEGIAS PARA CLIMA CÁLIDO SECO EXTREMOSO
Y ALTA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EXTERIOR

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO
DE MAESTRA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO PRESENTA

ADRIANA MORENO RODRÍGUEZ

Correo electrónico: adriana.moreno.rodriguez@uabc.edu.mx
Identificador ORCID: 0000-0003-1731-9539

Director de tesis: Dr. Daniel Antonio Olvera García
Identificador ORCID: **0000-0002-6744-8622**

Co-Director de tesis: Dr. Jorge Armando Ojeda Sánchez
Identificador ORCID: 0000-0002-5026-5459

Mexicali, B.C. 06 de junio de 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y LA TECNOLOGÍA



MAESTRÍA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

CALIDAD DEL AIRE INTERIOR EN VIVIENDAS DE INTERÉS
SOCIAL: ESTRATEGIAS PARA CLIMA CÁLIDO SECO EXTREMOSO
Y ALTA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EXTERIOR

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO
DE MAESTRA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO PRESENTA

ADRIANA MORENO RODRÍGUEZ

Correo electrónico: adriana.moreno.rodriguez@uabc.edu.mx
Identificador ORCID: 0000-0003-1731-9539

Director de tesis: Dra. Daniel Antonio Olvera García
Identificador ORCID: 0000-0002-6744-8622

Co-Director de tesis: Dr. Jorge Armando Ojeda Sánchez
Identificador ORCID: 0000-0002-5026-5459

Revisor de tesis: Dr. Gonzalo Bojórquez Morales

Revisor de tesis: Dr. Aníbal Luna León

Mexicali, B.C. 06 de junio de 2024

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Declaro que la tesis que se presenta contiene material original que no ha sido presentado para la obtención de un grado académico o diploma en esta u otra institución de educación superior. Así mismo declaro que hasta donde yo sé no contiene material previamente publicado o escrito por otra persona excepto donde se reconoce como tal a través de las citas.

Mexicali, B.C., 6 de junio de 2024

Adriana Moreno Rodríguez

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, en especial a mi padre Abraham Moreno, porque me ha inculcado los valores de perseverancia, dedicación, esfuerzo y sacrificio; por ser mi mejor amigo y siempre apoyarme en todo lo que me propongo.

A mi abuela, Aida Castillo, por todas sus enseñanzas, sus regaños, pero sobre todo por ser una gran inspiración para mí. Este logro es fruto de su inquebrantable dedicación a la familia y espero que en donde este, nos cuide y se llene de orgullo.

A todos mis amigos, a los que me ayudaron con este proceso, a los que me ayudaron a volverlo menos estresante, a los que me dieron palabras de aliento y a los que ya son familia.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Daniel Olvera por su guía durante esta investigación, por el conocimiento adquirido, por su tiempo, pero sobre todo por la infinita paciencia.

Al Dr. Gonzalo Bojórquez, por su apoyo y contribuciones a esta investigación, al Dr. Jorge Armando Ojeda Sánchez, profesor investigador de la Universidad de Colima por su asesoría constante y al Dr. Aníbal Luna por todo lo aprendido en las asignaturas que impartió en el programa.

A Johana Hernández por todas las facilidades brindadas y por proporcionarme su vivienda como caso de estudio.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por las facilidades y la beca otorgada, a la Universidad Autónoma de Baja California y al Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Urbanismo y Diseño MyDAUD.

RESUMEN

El acelerado crecimiento demográfico en las urbes contemporáneas demanda el desarrollo de proyectos de edificación habitacional que antepongan la asequibilidad sin comprometer la habitabilidad de su envolvente. Mientras tanto, la constante degradación ambiental suscita el reto de mantener un nivel óptimo de calidad del aire interior. Esta investigación se centró en el análisis de estrategias que permitan mejorar la calidad ambiental interior y la calidad de vida de los moradores. La estructura de la metodología comprendió la aplicación del cuestionario, un monitoreo de calidad ambiental y una simulación computacional en el software CONTAM. Se identificó principalmente contaminación por formaldehído y por materia particulada PM_{10} y $PM_{2.5}$ por infiltración y por la combustión en cocina. Los resultados sugieren aumentar el volumen de aire en cocinas para propiciar la dilución de contaminantes; aislamiento térmico de la envolvente para disminuir la estratificación y la implementación obligatoria de sistemas de extracción mecánica en cocinas.

ABSTRACT

The accelerated population growth in the contemporary cities demands the development of residential projects that set above the affordability without any commitment of the envelope habitability. In the meantime, the environmental degradation raises the challenge of keeping an optimal level of indoor air quality. This research focused on the analysis of strategies that improve indoor environmental quality and the life quality of residents. The methodology structure included the application of the questionnaire, environmental quality monitoring and a computational simulation in the software CONTAM. Contamination was mainly identified by formaldehyde and particulate matter PM_{10} and $PM_{2.5}$ by infiltration and by combustion in the kitchen. The results suggest increasing the volume of air in kitchens to promote the dilution of contaminants; thermal insulation of the envelope to reduce stratification and the mandatory implementation of mechanical extraction systems in kitchens.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	¡Error! Marcador no definido.
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	¡Error! Marcador no definido.
1.2 JUSTIFICACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
1.3 CONTEXTUALIZACIÓN DEL OBJETO DE INVESTIGACIÓN ..	¡Error! Marcador no definido.
1.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
1.4.1 PREGUNTA GENERAL.....	¡Error! Marcador no definido.
1.5 HIPÓTESIS	¡Error! Marcador no definido.
1.6 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
1.6.1 OBJETIVO GENERAL.....	¡Error! Marcador no definido.
1.6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	¡Error! Marcador no definido.
1.7 ALCANCES Y LIMITACIONES	¡Error! Marcador no definido.
1.8 ESTADO DEL ARTE.....	¡Error! Marcador no definido.
1.8.1 CALIDAD DEL AIRE INTERIOR	¡Error! Marcador no definido.
1.8.2 ESTRATEGIAS DE VENTILACIÓN NATURAL..	¡Error! Marcador no definido.
1.8.3 ESTRATEGIAS DE VENTILACIÓN MECÁNICA E HÍBRIDA	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	¡Error! Marcador no definido.
2.1 LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	¡Error! Marcador no definido.
2.1.1 CLASIFICACIÓN DE AGENTES CONTAMINANTES	¡Error! Marcador no definido.
2.1.1.1 POR SU PROCESO DE FORMACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
2.1.1.2 POR EL TIPO DE CONTAMINANTE	¡Error! Marcador no definido.
2.1.1.2.1 CONTAMINACIÓN FÍSICA	¡Error! Marcador no definido.
2.1.1.2.2 CONTAMINACIÓN BIOLÓGICA.....	¡Error! Marcador no definido.
2.1.1.2.3 CONTAMINACIÓN QUÍMICA.....	¡Error! Marcador no definido.
2.2 CALIDAD DEL AIRE.....	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1 LEGISLACIÓN MEXICANA EN MATERIA DE CALIDAD DEL AIRE	¡Error! Marcador no definido.
2.3 CALIDAD DEL AIRE INTERIOR	¡Error! Marcador no definido.
2.3.1 FORMALDEHÍDO	¡Error! Marcador no definido.
2.3.2 MATERIA PARTICULADA.....	¡Error! Marcador no definido.
2.3.3 DIÓXIDO DE CARBONO	¡Error! Marcador no definido.
2.3.4 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES.....	¡Error! Marcador no definido.
2.3.5 HUMO AMBIENTAL DE TABACO	¡Error! Marcador no definido.
2.4 VENTILACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
2.4.1 VENTILACIÓN NATURAL	¡Error! Marcador no definido.

2.4.2 VENTILACIÓN MECÁNICA	¡Error! Marcador no definido.
2.5 CONTEXTO REGIONAL: MEXICALI	¡Error! Marcador no definido.
CAPITULO 3: METODOLOGÍA.....	49
3.1 RECOLECCIÓN Y REPRESENTACIÓN DE DATOS.....	44
3.1.1 ENCUESTA DE CALIDAD DEL AIRE EN VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL.....	44
3.2 MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE EN VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL.....	47
3.2.1 CASO DE ESTUDIO.....	47
3.2.2 MONITOREO DE VARIABLES.....	50
3.2.2.1 INSTRUMENTACIÓN PARA MEDICIÓN DE VARIABLES.....	50
3.2.2.2 REGISTRADOR DE DATOS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD	51
3.2.2.3 REGISTRADOR DE DATOS DE DIÓXIDO DE CARBONO	51
3.2.2.4 REGISTRADOR DE DATOS DE MATERIA PARTICULADA, FORMALDEHÍDO Y COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES	52
3.2.2.5 RANGOS DE MEDICIÓN Y PRECISIÓN	52
3.2.2.6 PROCESO DE MEDICIÓN DE VARIABLES.....	53
3.2.2.7 COLOCACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS	55
3.2.2.8 BITÁCORA.....	55

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El planteamiento del problema precisa la idea de la investigación de forma clara, especifica los objetivos y acota sus alcances mediante el establecimiento de metas y limitaciones del estudio. Así mismo, determina la relevancia e importancia del desarrollo del proyecto, enfocándose en la aportación y generación de conocimiento nuevo.

Este capítulo incorpora los siguientes apartados: Planteamiento del problema, justificación, contextualización del problema, preguntas de investigación, hipótesis, objetivos de la investigación, alcances y limitaciones y estado del arte.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La crisis ambiental es una de las principales dificultades de la sociedad actual, afecta a la mayoría de las regiones del mundo y disminuye la calidad de vida de la población. Abordando específicamente la problemática de la contaminación del aire, la Organización Mundial de la Salud (OMS) la identifica como un riesgo medioambiental para la salud y, de acuerdo a estimaciones del 2016, provoca anualmente 4.2 millones de defunciones prematuras a nivel mundial.

En contraste a lo anterior, Zhang (2005) explica que la contaminación del aire en los espacios interiores es dos o tres veces mayor a la exterior. Esto es ocasionado por diversas fuentes, Carazo et al. (2013) las clasifica de la siguiente forma:

- Ventilación: por problemas de diseño (mala ubicación de los puntos de ventilación, errores de distribución que ocasionan estratificación de aire, diseño incorrecto del sistema de filtrado y un alto nivel de recirculación), por un volumen de aire insuficiente o por el mantenimiento inadecuado del sistema.
- Contaminación exterior

- Contaminación química: producida por la combustión en cocinas, calefactores, chimeneas etc., por el humo del tabaco, por los materiales de construcción y el mobiliario, así como los productos de limpieza, de aseo personal y las actividades humanas.
- Contaminación física: ocasionada por la filtración de gases tóxicos a través del suelo (radón)
- Contaminación biológica: siendo los principales de esta categoría, hongos, bacterias y ácaros de polvo.

Entre los contaminantes más comunes del aire interior se encuentran el óxido de nitrógeno, Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), dióxido de azufre (NO₂), ozono (O₃), monóxido de carbono (CO), material particulado (PM), radón (Rn), metales tóxicos y microorganismos. (Tran, Park y Lee, 2020)

La importancia de la regulación, control y disminución de la contaminación del aire interior recae principalmente en que, de acuerdo a la OMS (2018), la población urbana permanece aproximadamente el 90% del tiempo en un espacio cerrado, y además, cabe señalar que, anualmente 3.8 millones de personas mueren por enfermedades atribuibles a la contaminación del aire interior, ocasionada por la combustión de combustibles sólidos, que, en viviendas mal ventiladas produce que las concentraciones de partículas finas se eleven a un nivel 100 veces superior al máximo aceptable, es por ello que diversos organismos como la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA por sus siglas en inglés) y la OMS, en conjunto con la comunidad científica han desarrollado guías de estándares por niveles de concentración indicados por (Tran, Park y Lee, 2020) en la tabla 1.

Contaminante	Nivel de concentración (mg/m³)	Tiempo de exposición	Organización
	100	15 min	
	60	30 min	OMS
CO	30	1 hr	

	10	8 hrs	
	29	1 hr	USEPA
	10	8 hrs	
CO2	1800	1 hr	OMS
	0.4	1 hr	OMS
NO2	0.15	24 hrs	
	0.1	1 año	USEPA
	0.15	24 hrs	
PM	0.05	1 año	USEPA
	0.15-0.2	1 hr	OMS
O3	0.1-0.12	8 hrs	
	0.235	1 hr	USEPA
	0.5	10 min	OMS
	0.35	1 hr	
SO2	0.365	24 hrs	USEPA
	0.08	1 año	
	0.0005-0.001	1 año	OMS
Pb	0.0015	3 meses	USEPA
Xileno	8	24 hrs	OMS
Formaldehído	0.1	30 min	OMS
Radón	100 bq/m ³	1 año	OMS

Tabla 1: Estándares de concentraciones de contaminantes del aire interior (Comisión Europea DG XVII en Tran, Park y Lee, 2020)

En cuanto a las enfermedades atribuibles a la contaminación del aire interior, Slezakova, Morais y Pereira (2012) menciona que se clasifican en relación a la duración de la exposición; entre los efectos a corto plazo se encuentran, la irritación en ojos, nariz, garganta y piel, dolores de cabeza, mareos y fatiga; mientras que los efectos a largo plazo pueden derivar en infecciones respiratorias agudas, bronquitis, obstrucciones pulmonares, cáncer de pulmón, problemáticas reproductivas y durante el embarazo (Goyal y Khare, 2010 en Slezakova, Morais y Pereira, 2012)

Actualmente, la ciudad de Mexicali, Baja California cuenta con una red de monitoreo de la calidad del aire exterior. En su reporte del año 2020, la Fundación para la Investigación de la Calidad del Aire A.C. indica que, de acuerdo a los lineamientos establecidos en la NOM-172-SEMARNAT-2019 en el mes de noviembre se presentó una calidad de aire mala y muy mala en enero y diciembre, siendo las zonas sur y poniente las más afectadas. Mientras tanto, el acceso a estudios de contaminación del aire interior de inmuebles en la región es escaso, así como la legislación en materia de regulación de niveles de contaminación interior y lineamientos de requerimientos mínimos que garanticen la calidad del aire interior.

Mes	Zonificación de la ciudad de Mexicali				
	Central	Nororiente	Suroriente	Poniente	Sur
Enero	124	96	136	136	153
Febrero	81	68	89	108	104
Marzo	50	39	54	68	55
Abril	48	36	48	48	50
Mayo	39	31	41	46	40
Junio	48	45	51	56	48
Julio	49	40	44	54	47
Agosto	55	44	50	53	49
Septiembre	70	65	70	69	74
Octubre	79	76	84	84	91
Noviembre	88	74	103	116	118
Diciembre	118	92	139	154	152

Figura 1. Promedio mensual del Índice de calidad del Aire en Mexicali (Fundación para la Investigación de la Calidad del Aire A.C. 2020)

Además, de acuerdo a los datos reportados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en 2015 las principales causas de muerte en Baja California fueron enfermedades al corazón, tumores malignos y diabetes mellitus, los cuales son padecimientos cuyo aumento de riesgo de muerte está asociado a la contaminación del aire, específicamente las PM2.5. En cuanto a la morbilidad, la Secretaría de Salud indicó que, en el año 2015, la principal causa de enfermedad

de la población de Baja California fueron las infecciones respiratorias agudas (IRAs) con 508,137 casos anuales, de los cuales, el 22% se presentó en el grupo de niños de 1 a 4 años.

Así mismo, el Instituto Mexicano para la Competividad (IMCO) desarrolló una metodología para determinar los daños a la salud de los habitantes de diferentes ciudades de México, así como el costo que esta representa por los gastos del sector de salud pública y por pérdidas de productividad. En el año 2013, estimó que, para la ciudad de Mexicali, Baja California, la contaminación del aire por PM10 representa un costo de \$217'111,495 anuales. Por tanto, el IMCO reitera la necesidad de analizar el efecto de otros contaminantes atmosféricos, como las partículas PM2.5, ozono (O3), dióxido de azufre (SO2), monóxido de carbono (CO), entre otros y también es importante recalcar que, para el cálculo del estimado no se contabilizan los gastos de salud tratados en hospitales privados, ni el gasto en medicamento, personal ni insumos.

Aunque la contaminación del aire exterior es uno de los elementos principales que determinan la calidad del aire interior, no es el único. La Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Acondicionamiento de aire Inc. (ASHRAE por sus siglas en inglés) define a la calidad aceptable del aire interior como: "Aire en el cual no hay contaminantes conocidos en concentraciones nocivas como lo determinan las autoridades responsables y con el cual una mayoría substancial (80% o más) de las personas expuestas se sienten satisfechas" (ASHRAE, 2007, p. 5).

Es por ello que (Tran, Park y Lee, 2020) identifican como los principales parámetros para la evaluación de la calidad del aire a: las concentraciones de contaminantes, condiciones térmicas, luz y ruido. En cuanto al confort térmico, Bas (2004) menciona como, el control de la temperatura y humedad relativa es fundamental, sobre todo porque un alto porcentaje de humedad propicia el crecimiento de moho, hongos y bacterias.

En conjunto, esta situación nos indica la necesidad de desarrollar metodologías que permitan precisar los requerimientos mínimos que garanticen la calidad del aire en los espacios habitados con mayor frecuencia, como son, las viviendas, sobre todo las de interés social, descritas por Sánchez (2012) como viviendas que presentan las dimensiones mínimas habitables, características por su tipología poco flexible, que difícilmente pueden ampliarse por sus inquilinos.

La incrementación de la ventilación es una de las estrategias primordiales descritas por Bas (2004) para solventar la mayoría de las problemáticas relacionadas con la calidad del aire, sin embargo, no es la única medida, ya que la erradicación y control de las fuentes contaminantes es la más eficaz

1.2 JUSTIFICACIÓN

La ciudad de Mexicali, Baja California presenta una grave problemática en materia de calidad del aire, ya que es uno de los municipios que sobresale por sus emisiones a nivel estatal. Mexicali contribuye principalmente en las emisiones totales de partículas PM10 (37%), partículas PM2.5 (40%) y amoniaco (49%), siendo las fuentes más comunes: la actividad agrícola y ganadera, los caminos no pavimentados y la generación de energía eléctrica. (Secretaría de Protección al Ambiente, 2018).

Mientras tanto, la mala calidad del aire tiene una alta repercusión en la salud de los mexicalenses, sobre todo en los grupos más vulnerables, como son, los infantes y los adultos mayores. La Secretaría de Protección al Ambiente, en su Programa de Gestión para Mejorar la calidad del Aire en el Estado de Baja California (2018) aplicó una metodología con la finalidad de evaluar los casos de mortalidad evitables en un escenario donde las emisiones por PM2.5 cumplieran los valores límites de la NOM correspondiente, la cual arrojó un resultado de 261 casos evitables al año.

Si bien, la contaminación del aire exterior es uno de los factores que influyen en la calidad del aire interior, otro elemento crucial es la ventilación del espacio a

evaluar (Bas, 2004) Para las viviendas localizadas en Mexicali, el marco normativo aplicable para el diseño, autorización de prototipos y construcciones de viviendas se integra por lo establecido en el Reglamento de Edificaciones para el Municipio de Mexicali, el cual establece en los artículos 63 y 64 los requerimientos para ventilación de piezas habitables y de servicios en edificaciones habitacionales:

Artículo 63.- En edificaciones tipo habitacional o de alojamiento, se aplicará lo siguiente para piezas habitables: I.- Para iluminación, deberá proporcionarse el 10%, y no menos de 0.75m², II. Para ventilación, se proporcionará el 30%. Artículo 64.- En las edificaciones tipo habitacional, se aplicará lo siguiente para piezas de servicio: I.- La iluminación podrá ser natural o artificial; II.- Para ventilación, se proporcionará el 50% o mediante sistema de extracción mecánica; III.- La iluminación natural podrá brindarse a través de domos o tragaluces debiendo proporcionarse el 2% de la superficie de piso de la pieza. (Ayuntamiento de Mexicali, 1998, s/p)

Cabe señalar que, para la ventilación en las áreas de servicio no se especifica la capacidad de extracción de los medios mecánicos y que, el volver opcional la iluminación natural, sobre todo en las áreas húmedas de la vivienda, puede propiciar el crecimiento de hongos. (Molina, 2015)

Por otra parte, el Instituto del Fondo Nacional para la Vivienda de los Trabajadores INFONAVIT reportó en 2018 que Mexicali es el 8avo municipio con mayor cantidad de viviendas abandonadas en todo el país; indudablemente intervienen diversos factores sociales y económicos, sin embargo, uno de los principales factores está ligado a la calidad de las viviendas; por la construcción, diseño, distribución y dimensiones de los espacios, en especial por la insuficiencia del área adecuada para desempeñar actividades cuidando la higiene y privacidad.

Esta investigación tiene como finalidad el evaluar la calidad del aire en este tipo de viviendas, de tal manera que se puedan identificar las fuentes que modifican el ambiente interior y que esto permita estimar el impacto que tiene la ventilación

natural y mecánica a la calidad del aire en los espacios cerrados, y por consiguiente determinar su suficiencia.

Además, busca generar aportaciones en el campo de la arquitectura, mediante la elaboración de lineamientos de diseño que permitan garantizar la calidad del aire interior y, consecuentemente, el bienestar de sus ocupantes.

1.3 CONTEXTUALIZACIÓN DEL OBJETO DE INVESTIGACIÓN

Las condiciones de la vivienda en México han evolucionado a lo largo de los años, en la figura 2 se puede observar como en 1980 las dimensiones presentaron un crecimiento, sin embargo, desde entonces, se muestra una tendencia de disminución en la mayoría de los periodos, hasta alcanzar una dimensión promedio aproximadamente 10m² menor. (Sánchez, 2012)

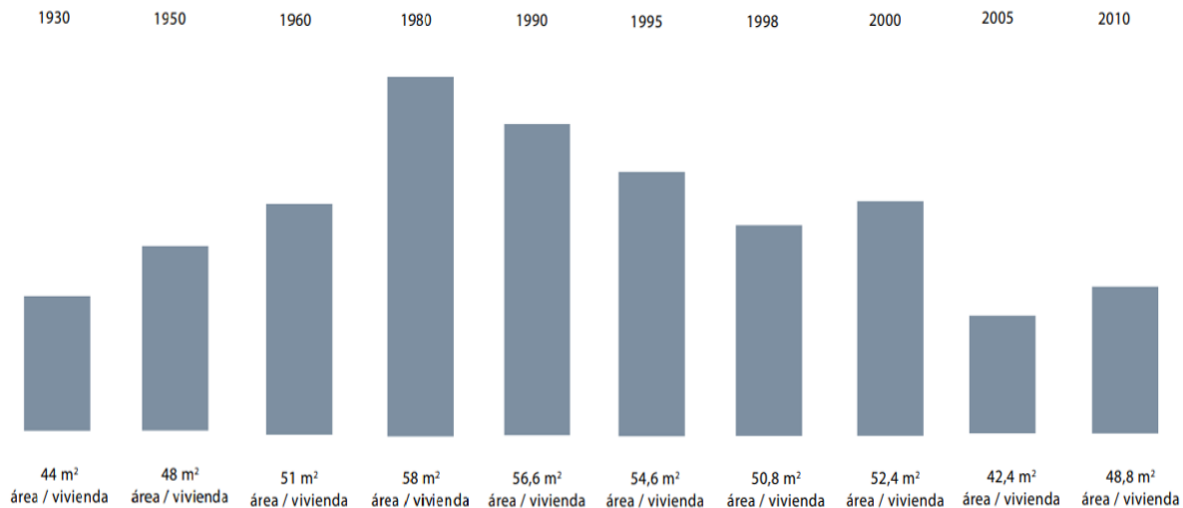


Figura 2. Dimensiones de las viviendas en México 1930-2010 (Sánchez. 2012) La vivienda “social” en México [Figura]. Recuperada de: <http://conurbamx.com/home/wp-content/uploads/2015/05/libro-vivienda-social.pdf>

Por lo que se refiere a la ciudad de Mexicali, el Instituto Municipal de Investigación y Planeación Urbana de Mexicali IMIP reportó en 2007 que el 20% de la vivienda construida correspondía a la tipología de interés social, debido al incremento de su promoción en los 10 años anteriores.

Los indicadores de calidad de este tipo de construcciones han sido cuestionados por diversos autores. En 2015, el INFONAVIT realizó un estudio para analizar las causas del elevado abandono de vivienda en el fraccionamiento Valle de Puebla, uno de los principales fundamentos está ligado a la habitabilidad de la vivienda, ya que su reducida área construida es menor a lo que establece la normativa local, lo que representa una insatisfacción para los usuarios.

Así mismo, las características de la vivienda están ligadas a la calidad de vida de los ocupantes, Chan (2010) menciona que: “Partiendo de que la vivienda es un derecho humano básico, se puede inferir que una vivienda inadecuada e insegura amenaza la calidad de vida de sus moradores”. Es por ello que, Salazar y Ley (2018) exhortan al Estado a aplicar los Principios de Higiene de la vivienda, desarrollados por la OMS, para garantizar la seguridad física de los ocupantes.

La ciudad de Mexicali, Baja California se caracteriza por su clima cálido-seco con una temperatura media anual que oscila entre los 23 y 27° C; por su parte, las temperaturas en verano presentan un promedio de 38 a 40° C, registrando una máxima de 52° C. (IMIP, 2007). Estas condiciones climáticas extremas son omitidas con frecuencia en el diseño de espacios arquitectónicos en la región, por lo cual, el confort térmico depende de sistemas de climatización artificial. (García et al, 2011). Además, se recomienda el minimizar el uso de superficies acristaladas para evitar fugas y que los aparatos logren alcanzar el confort requerido utilizando menos energía. (Cruz, 2014)

Esto a su vez, puede repercutir directamente en la calidad del aire, debido a que, el diseñar edificios cada vez más herméticos reduce el volumen de aire de ventilación. (Ramos et al, 2015) En contraste, Underhill et al (2020) menciona que el combinar atributos de ventilación y acondicionamiento de aire genera co-beneficios a la salud de los ocupantes.

1.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Lo anteriormente planteado nos lleva a la formulación de la pregunta de esta investigación la cual se muestra a continuación:

1.4.1 PREGUNTA GENERAL

1. ¿Qué estrategias se pueden implementar para reducir la contaminación en el aire interior de las viviendas de interés social en regiones con altos niveles de contaminación atmosférica y clima cálido seco extremo?

1.5 HIPÓTESIS

Para esta investigación se identificaron como variables independientes la contaminación del aire exterior y las condiciones climáticas; y como variable dependiente la calidad del aire interior en viviendas de interés social. Derivado de su relación casual en el contexto climático cálido seco extremo, se formuló la siguiente hipótesis:

El monitoreo de la calidad del aire interior y la simulación computacional posibilitan la evaluación de implementación de estrategias alternativas a la ventilación cruzada, que permiten reducir la contaminación en el aire de los espacios interiores en las viviendas de interés social en regiones con altos niveles de contaminación exterior y clima cálido seco extremo en la temporada cálida y fría.

1.6 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Con la finalidad de plantear el punto de partida para establecer la estructura del estudio y poder contrastar la hipótesis formulada con anterioridad, se propusieron los siguientes objetivos:

1.6.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la calidad del aire interior en viviendas de interés social en clima cálido seco extremo, por medio de monitoreo ambiental y simulación computacional que permitan establecer estrategias para reducir los niveles de contaminación del aire de los espacios interiores.

1.6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los principales hábitos practicados por los habitantes de las viviendas de interés social en clima cálido seco extremo que influyen a la calidad del aire interior.
- Medir el nivel de calidad del aire interior y exterior de las viviendas de interés social en clima cálido seco extremo en la temporada cálida y fría.
- Estimar el impacto de la ventilación a la calidad del aire de las viviendas de interés social en clima cálido seco extremo en conjunto a la operación de los sistemas de climatización utilizados durante la temporada cálida y fría.

1.7 ALCANCES Y LIMITACIONES

Los alcances de esta investigación están referidos al estudio de la calidad del aire interior en viviendas de interés social, en el contexto climático cálido seco extremo, ubicado en la ciudad de Mexicali, Baja California, México, con un enfoque en el bienestar ambiental de los usuarios.

Se buscará analizar las correlaciones de los siguientes parámetros: Temperatura de Bulbo Seco (TBS), Humedad Relativa (HR), Materia Particulada (PM₁₀ y PM_{2.5}), Formaldehído (CH₂O), Dióxido de carbono (CO₂) y Compuestos Orgánicos Volátiles (COV).

Derivado de las condiciones climáticas extremas del contexto seleccionado para el estudio y de una zonificación de los niveles de contaminación exterior, se establecieron dos periodos de monitoreo, en los que se emplearan registradores de

datos para realizar mediciones puntuales de los parámetros antes mencionados, así como la utilización de un programa computador para simulaciones de calidad del aire, con el que se evaluará la aplicación de estrategias propuestas.

Por lo que respecta a las limitaciones de esta investigación, destaca la exclusión de algunos contaminantes del aire interior; como el Monóxido de carbono (CO), Óxido de nitrógeno (NO), Radón (Rn) entre otros, esto debido a la asequibilidad del equipo de medición y a la capacidad económica del estudio.

El caso de estudio cumple con las características representativas de las viviendas de interés social de la región, por su tipología y sistema constructivo; sin embargo, los niveles de contaminación exterior en la ciudad de Mexicali presentan diferencias sustanciales dependiendo de su ubicación y proximidad a fuentes como la industria y el campo, por lo que se sugiere analizar viviendas de otras zonas, como la poniente y sur.

1.8 ESTADO DEL ARTE

El estado del arte aborda un análisis general de publicaciones e investigaciones relacionadas con este trabajo, como una estrategia metodológica para la evaluación del objeto de estudio.

Se limitó la revisión a un marco temporal, identificando las fuentes de información idóneas, para distinguir diferentes métodos, procesos y herramientas para desarrollar la investigación.

Su estructura parte de tres aspectos principales: Calidad del aire interior, estrategias de ventilación natural y estrategias de ventilación mecánica e híbrida.

1.8.1 CALIDAD DEL AIRE INTERIOR

La calidad del aire interior es definida por la American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE por sus siglas en inglés)

como el aire en el cual no hay contaminantes conocidos en concentraciones nocivas; como lo determinan las autoridades responsables y con el cual una mayoría substancial (80% o más) de las personas expuestas se sienten satisfechas (ASHRAE, 2007).

La pandemia COVID-19 ocasionada por el virus SARS-COV-2 ha originado un incremento en el tiempo que los usuarios permanecen en recintos cerrados, y, por consiguiente, precisa la necesidad de proveer un ambiente interior saludable que garantice la seguridad de los ocupantes. Además de aplicar medidas farmacéuticas como la sana distancia, uso de cubrebocas, lavado de manos y sanitización de espacios; aumentar el rango de ventilación ha sido una de las principales tácticas empleada para disminuir los contagios; lo que, a su vez, puede ayudar a mejorar la calidad del aire interior (Agarwal et al., 2021).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estado Unidos (EPA por sus siglas en inglés) recomienda diversas estrategias para mejorar la calidad del aire interior, tales como controlar las fuentes de contaminación, ajustar la humedad entre el 30 y 50% para evitar la propagación de moho y aumentar la ventilación de los espacios (EPA, 2008).

Una de las principales fuentes de contaminación interior son los ocupantes del espacio y las actividades que realizan en el recinto, José, Pérez y Gonzalez-Barras (2020) concluyeron que cocinar es la actividad que incrementa mayormente las emisiones de contaminantes del aire interior, entre 1.5 y 27 veces, específicamente por el gas empleado para la combustión de las cocinas.

A su vez, Lee Li et al, (2002) en Cheung y Yin (2019) mencionan que los niveles de CO₂ y PM10 pueden ser un 14% y 67% respectivamente más altos en cocinas normales que en plantas abiertas, lo que confirma la importancia de colocar divisiones que impidan que los contaminantes se dispersen libremente, sin embargo, esto no es factible en las viviendas con espacios reducidos.

1.8.2 ESTRATEGIAS DE VENTILACIÓN NATURAL

La contaminación del aire interior puede controlarse y mantenerse en niveles que no representen peligro para los ocupantes de los recintos mediante la implementación de estrategias de ventilación natural; Ahmed, Kumar y Mottet (2021) explican que esta puede proveer el confort térmico adecuado mientras mantiene la calidad del aire interior. Sin embargo, existe poca evidencia de su eficacia ante las olas de calor y las temperaturas arriba de los 40 °C.

Cuce et al (2019) estudiaron el rendimiento de las chimeneas solares, las cuales producen un efecto de enfriamiento mientras mejoran la calidad del aire interior. Por otra parte, Saif et al. (2021) examinaron el funcionamiento de las torres de viento para mejorar la calidad del aire y la habitabilidad térmica en aulas educativas; sus resultados indican que la implementación de torres de viento disminuyó las concentraciones de CO₂ en el aire interior, pero el 44% del tiempo las condiciones no fueron térmicamente aceptables. En cuanto a la torre de viento con enfriamiento evaporativo, esta logró el confort térmico el 100% del tiempo, pero la calidad del aire no cumplió los estándares, presentando una media de 2,836 ppm.

Así mismo, Kaiser et al. (2020) experimentó con la implementación de torres de viento con caloductos para mejorar la calidad del aire interior mientras se mantiene el confort térmico. Su estudio concluyó que cuando la velocidad del aire mantiene una velocidad por encima de 1 m/s los niveles de CO₂ permanecen por debajo de 1000 ppm. Sin embargo, la combinación de un alto movimiento de aire y los porcentajes de humedad relativa elevada no permiten alcanzar el confort térmico. Además, enfatiza la importancia de cuidar los niveles de humedad, ya que al condensarse propicia el crecimiento de hongos y moho.

Aunque la ventilación natural es una buena estrategia que se apega a las concepciones del diseño sustentable, existen muchas limitantes con respecto a su funcionamiento, José, Pérez y Gonzalez-Barras (2020) describen que en algunos casos no produce el efecto esperado, ya que puede incrementar los niveles de contaminación al introducirla desde el exterior.

Otro aspecto importante es la distribución de aire, Sui et al. (2021) comentan que, si esta es muy irregular, parte del aire suministrado fluye directamente al exterior, sin mezclarse ni diluir los contaminantes suspendidos en el espacio.

Lei, Liu, Wang y Li (2017) analizaron la calidad del aire interior en dormitorios de la Universidad de Beijing durante el invierno, encontrando que, cuando el área de ventanas es de 0.55m^2 , correspondiente a una tasa de ventilación natural de $0.036\text{ m}^3/\text{s}$, los niveles de O_2 , CO_2 , temperatura y humedad relativa cumplen los requerimientos apropiados para un dormitorio de 10 a 12.5 m^3 por estudiante.

1.8.3 ESTRATEGIAS DE VENTILACIÓN MECÁNICA E HÍBRIDA

Por otra parte, la ventilación mecánica también representa una buena alternativa para mejorar la calidad del aire interior, sin embargo, de acuerdo a Zhao y Liu (2020) su eficiencia promedio en edificios residenciales es del 50%.

Sumei Liu et al. (2020) diseñaron un sistema de ventilación para cocinas que integra una cortina de aire para disminuir las dispersiones de contaminantes; experimentaron con diferentes ángulos de inclinación de la cortina, para finalmente concluir que, el sistema de ventilación mantiene el nivel de calidad del aire y confort térmico cuando la cortina de aire se encuentra a 90° , la velocidad del aire a 1.5m/s y el rango del extractor es de $750\text{m}^3/\text{h}$.

Mientras tanto, Jones et al. (2021) estudió el uso de filtros con clasificación MERV (Minimum Efficiency Reporting Values) clasificación otorgada por un método desarrollado por la ASHRAE. El estudio sugiere la implementación de filtros con MERV 13 o mayor para disminuir los niveles de concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ en edificios durante las horas de trabajo e indica que los filtros más populares por país de acuerdo a los edificios del estudio son: MERV 15+ en China, MERV 7-12 en India, MERV 13-14 en Inglaterra, y MERV 7-12 y 13- 14 en Estados Unidos.

También se utilizan sistemas que aprovechan las propiedades desinfectantes de la luz ultravioleta. Robles y Kramer (2017) analizaron el rendimiento de

germicidas de irradiación ultravioleta (UVGI por sus siglas en inglés), considerando que existe preocupación de que algunos UVGI producen ozono, el cual es dañino para la salud. Al concluir determinaron que, el sistema UVGI con una longitud de onda de 253.7 nm en combinación a un convertidor catalítico de dióxido de titanio y filtros MERV 11, se encarga los microorganismos en el aire sin producir ozono.

A su vez, Kang et al (2021) concluyó que los sistemas de extracción continua son la alternativa más económica, en comparación a la ventilación central intermitente y los sistemas continuos con ventilador de recuperación de energía. No obstante, se debe considerar el ruido provocado por el sistema, Cakyova et al (2021) analizó la eficacia de un sistema mecánico de ventilación con recuperación de calor (MVHR por sus siglas en inglés) y mencionan que el ruido que provoca es tolerable durante el día, sin embargo, por las noches los ocupantes del espacio prefieren apagarlo para que no interfiera con sus horas de sueño, lo cual demerita la calidad del aire interior.

Es importante enfatizar que la calidad del aire mantiene una estrecha relación con el confort térmico, por lo que es necesario analizar los efectos de la implementación de estrategias de aislamiento térmico a la contaminación del aire interior. Fernández-Agüera et al (2019) comenta que incrementar la hermeticidad de la envolvente para reducir la pérdida de calor mejora la eficiencia energética relacionada a los sistemas de climatización, sin embargo, reduce la circulación del aire, lo que conlleva a una disminución de la calidad del aire interior.

Así mismo, Underhill et al (2019) analizó los efectos del aislamiento en muros y cubierta, así como el sellado del aire y encontró que esta estrategia disminuye los gastos energéticos relacionados con el confort térmico, pero disminuye la calidad del aire interior ya que afecta al flujo del aire.

Mientras tanto, el uso del aire acondicionado puede incrementar los niveles de contaminantes del aire interior, ya que, los equipos de ventana y mini split tienden a recircular el aire interior en lugar de introducir aire del exterior. Cheung y Jim (2019)

realizaron un estudio en el cual evaluaron la contaminación del aire interior de 8 viviendas en Hong Kong, encontrando que los niveles de CO se elevaron un 312% mientras operaba el aire acondicionado, el CO₂ un 86%, mientras que las PM₁₀ un 4% y las PM_{2.5} un 19%. En el caso de las partículas, el autor recomienda limpiar la unidad de aire acondicionado y mantener las puertas y ventanas abiertas cuando se enciende el equipo para dispersar los contaminantes emitidos.

Otra estrategia es la implementación de purificadores de aire; Li et al. (2021) realizaron un estudio para analizar su eficacia en conjunto a la ventilación natural para disminuir los niveles de PM_{2.5} emitidas por las principales actividades que mayormente deterioran la calidad del aire interior en las viviendas chinas: encender incienso, cocinar y fumar. Finalmente concluyeron que el uso de purificadores de aire reduce los niveles de concentraciones de PM_{2.5} en el aire interior, con una eficacia entre 43.48 a 86.41%. En el verano, los purificadores de aire combinados con ventilación natural son la mejor opción para reducir las PM_{2.5} producidas por encender incienso y cocinar y el purificador de aire es la mejor opción para disminuir las PM_{2.5} producidas por los cigarrillos. En el invierno, el uso de purificadores es la mejor opción para reducir las emisiones de las tres fuentes principales.

Así mismo, Cheek et al. (2021) comprobó que los purificadores de aire portables reducen las concentraciones de PM_{2.5} entre un 22.6 y un 92% en viviendas, pero que su funcionamiento depende de la duración de su intervención, el flujo de aire interno y del usuario.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

La base teórica de esta investigación se construyó en base a la literatura existente de diversos autores que han estudiado la calidad del aire en espacios interiores residenciales y sus efectos a la salud de los ocupantes.

En primer lugar, se detalla de manera descriptiva la contaminación atmosférica; sus repercusiones medio ambientales y de salud pública; así como los 3 tipos de contaminantes principales: físicos, biológicos y químicos.

En segunda instancia se reseña la calidad del aire, los contaminantes criterio definidos por La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), además de explicar la importancia del Índice de Calidad del Aire (AQI por sus siglas en inglés) que funciona como una guía para determinar la limpieza del aire y que efectos sanitarios podría ocasionar a los diferentes grupos poblacionales.

En esa misma línea se desglosa el marco normativo en materia de legislación vigente pertinente a la calidad del aire en México, que permite regular las principales fuentes emisoras de contaminación atmosférica y establece procesos de medición y control.

Después el enfoque pasa a la calidad del aire interior, con una descripción de los contaminantes mas habituales: formaldehído, materia particulada, dióxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles y el humo del tabaco. Se analiza su composición, sus fuentes emisoras y sus efectos a la salud.

Posteriormente se analiza a la ventilación como una estrategia para disminuir los niveles de contaminación del aire interior; ventilación natural y mecánica, haciendo hincapié en aquella recomendada para los espacios residenciales.

Finalmente se desarrolla un análisis del contexto geográfico de la investigación: Mexicali, Baja California; sus características meteorológicas y en materia de calidad del aire, para concluir con un análisis de la vivienda sustentable en México, con enfoque en los atributos eco tecnológicos.

2.1 LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

El desarrollo socioeconómico a nivel global en los últimos años, derivado de la acelerada urbanización e industrialización ha ocasionado sobreexplotación de los recursos naturales, resultando en severos daños ambientales a nivel global, entre ellos la contaminación (Ajibade, 2021).

Los contaminantes se definen como elementos peligrosos en el medio ambiente (aire, agua y suelo) y se clasifican como se muestra en la tabla 2, aunque también se pueden clasificar de acuerdo a su descomposición en biodegradables y no biodegradables (que no se pueden descomponer por microorganismos). A su vez, los contaminantes no biodegradables se pueden clasificar en primarios (aquellos emitidos directamente al ambiente) y secundarios (resultado de la acción de un contaminante primario) (Spellman,2017).

Categorías de contaminación	Tipo de contaminación	
Contaminación del aire	Lluvia ácida Clorofluorocarbono Calentamiento global Oscurecimiento global	Destilamiento global Particulados Smog Agotamiento de ozono
Contaminación del agua	Eutrofización Hipoxia Contaminación marina Escombros marinos Acidificación de océanos Derrame de petróleo Contaminación por barcos	Escorrentía Contaminación termal Aguas residuales Enfermedades transmitidas por el agua Calidad del agua Estancamiento del agua
Contaminación del suelo	Biorremediación Calentamiento por resistencia eléctrica Herbicidas	Pesticidas Guía de valores del suelo
Contaminación radioactiva	Actínidos en el ambiente Radioactividad ambiental Fisión Lluvia radioactiva	Plutonio en el ambiente Envenenamiento por radiación Radio en el ambiente Uranio en el ambiente

Otros	Especies invasivas Contaminación lumínica Contaminación por ruido Lluvia radioactiva	Contaminación electromagnética Contaminación visual
-------	---	---

Tabla 2: Categorías y tipos de contaminación (Elaborado a partir de: Spellman, 2017)

Para enfocarnos en la contaminación del aire primero hay que definir algunos conceptos. La atmósfera es una capa de aire que envuelve al planeta; el cual está compuesto por una mezcla de gases. Cuando esta seco contiene aproximadamente lo siguiente: 78% nitrógeno, 21% oxígeno, 0.9% argón, 0.03% dióxido de carbono y 0.002% de otros gases como neón, helio, metano, kryptón e hidrógeno (Domínguez, 2004).

La contaminación atmosférica hace alusión a la presencia de sustancias dañinas en la atmósfera en concentraciones que podrían perjudicar los ecosistemas o la salud de la población (Leon, 2019). Estos efectos se pueden manifestar en un nivel personal, por la exposición al aire, agua o comida contaminada; o en un nivel global por el deterioro del hábitat, que puede resultar en la eventual abolición de las especies humanas o de toda forma de vida (Aarne, Peirce y Weiner, 1990).

De acuerdo a Flagan y Seinfeld (2012) el fenómeno de la contaminación se puede dividir en una secuencia de eventos que se traslapan: la generación del contaminante y su emisión desde una fuente; su transporte, reacción, dispersión o remoción de la atmósfera; y su efecto en los seres vivos, materiales y el ecosistema.

Para que la contaminación sea detectable, las concentraciones o niveles del contaminante deben ser suficientes como para provocar un desequilibrio en el medio, haciéndolo perceptible por simple apreciación o por equipo especializado (Conde, 2013).

2.1.1 CLASIFICACIÓN DE AGENTES CONTAMINANTES

Existen diferentes maneras en las que se puede clasificar la contaminación ambiental. A continuación, se muestran las principales.

2.1.1.1 POR SU PROCESO DE FORMACIÓN

Los contaminantes se clasifican en primarios y secundarios en función a su proceso de formación. Los primarios se liberan por fuentes perfectamente identificables, las cuales pueden ser naturales o antropogénicas. En cambio, los contaminantes secundarios se forman por las reacciones generadas por la interacción de los contaminantes entre ellos y en función a las condiciones meteorológicas (viento, temperatura, radiación y humedad) (Boldo, 2016).

El viento desplaza el aire en función a la presión y la temperatura, lo que favorece la difusión de contaminantes; sin embargo, su efecto depende del terreno o de la configuración urbana. Al contrario, la humedad puede propiciar la evolución de los contaminantes o incluso aumentar la agresividad de los mismos, como el trióxido de azufre que al contacto con vapor de agua se transforma en ácido sulfúrico (Sanz y Ribas, 1989).

Los parámetros meteorológicos y topográficos de la región pueden afectar al transporte de los contaminantes, ya que el movimiento vertical en la atmósfera depende de las variaciones de temperatura en relación a la altitud. Cerca del suelo, la temperatura del aire disminuye en manera inversamente proporcional a la altura, lo que propicia el movimiento vertical del aire y su mezcla; sin embargo, cuando la temperatura aumenta proporcionalmente con la altura, el movimiento se suprime. Esta estructura se define como inversión térmica (Schnelle, Dunn y Ternes, 2016).



Figura 3. Inversión térmica (Secretaría del Medio Ambiente y Desarrollo Territorial s/f) Recuperada de: https://semadet.jalisco.gob.mx/sites/semadet.jalisco.gob.mx/files/inversion_termica.pdf

2.1.1.2 POR EL TIPO DE CONTAMINANTE

Aún cuando en un medio determinado pueden existir, de manera simultánea, diversos contaminantes de diferentes fuentes, y aún cuando no se puede aislar su presencia, se pueden clasificar de la siguiente manera:

2.1.1.2.1 CONTAMINACIÓN FÍSICA

Estos contaminantes se derivan de distintas formas de energía que sobrepasan los niveles basales y repercuten negativamente a la salud. Solórzano (2014) establece que de acuerdo a la naturaleza de su energía se clasifican en:

- **Energía mecánica:** ruido, vibraciones e iluminación
- **Energía higrotérmica:** calor, frío, humedad y ventilación
- **Energía electromagnética:** ionizante (rayos x, rayos gama) y no ionizante (ultravioleta, infrarrojo y microondas)

Los agentes de origen físico pueden dar lugar a diversos efectos indeseables; permanecer durante periodos prolongados a presión sonora excesiva puede ocasionar repercusiones fisiológicas (aumento del ritmo cardiaco, aceleración del ritmo respiratorio, reducción de actividad cerebral); la energía higrotérmica elevada puede generar golpe de calor o deshidratación; mientras que la exposición a radiaciones ionizantes puede generar quemaduras, hemorragias o cancer y las no ionizantes, cataratas, conjuntivitis o inflamación de córnea (Domingo, 2016).

Sin embargo, con frecuencia es difícil asociar al contaminante con sus efectos, puesto a que estos aparecen a largo plazo y frecuentemente son ambiguos; por lo que pueden pasar años para que se identifique su origen, se asocie al contaminante y se controle (Flores, López, Albert, 1995).

2.1.1.2.2 CONTAMINACIÓN BIOLÓGICA

Los contaminantes biológicos son aquellos que se emiten a partir de entidades microbiológicas, celulares o no, con inclusión de los genéticamente modificados, cultivos celulares y endoparásitos humanos que pueden generar respuestas

alérgicas y efectos tóxicos. Así mismo, incluye a las sustancias generadas por ellos e incluso partes de ellos mismos (Guardino 2012).

Aunque las infecciones generadas por agentes biológicos suelen tener diferentes vías, la respiratoria es la de mayor probabilidad. Por lo que respecta a su clasificación, Hernández y Martí (s/f) la describe como se muestra en la tabla 3.

Agente	Descripción
Virus	Formas de vida simples constituidas únicamente por material genético. Son parásitos, es decir, necesitan un huésped para poder reproducirse.
Bacterias	A diferencia de los virus, pueden sobrevivir sin un huésped, incluso algunas desarrollan la capacidad de producir esporas; que son una forma de vida resistente a condiciones adversas (altas temperaturas, sequedad, falta de nutrientes etc.)
Protozoos	Organismos unicelulares con un ciclo vital complejo, en algunos casos necesitan varios huéspedes para completar su desarrollo.
Hongos	Son formas complejas de vida con estructura vegetativa. Aunque su hábitat natural es el suelo, algunos son parásitos del hombre, animales y vegetales.
Helmintos	Son organismos pluricelulares con ciclos vitales complejos y diversas fases en su desarrollo (huevo, larva, adulto) que frecuentemente completan en diferentes huéspedes (animales/hombre).
Artrópodos	También son organismos pluricelulares con ciclos vitales complejos y diversas fases en su desarrollo. Algunos son endoparásitos, lo que significa que pueden atravesar la superficie del cuerpo, otros viven sobre el y pueden causar efectos adversos al inocular toxinas que producen modificaciones patológicas en el huésped.

Tabla 3. Clasificación de los contaminantes biológicos. (Elaborado a partir de: Hernández y Martí (s/f)).

La exposición a contaminantes biológicos puede desencadenar reacciones alérgicas como la neumonitis por hipersensibilidad, rinitis alérgica o algunos tipos de asma; así como enfermedades infecciosas como la gripe, sarampión o varicela. A su vez, las toxinas liberadas por moho y hongos pueden generar estornudos, ojos llorosos, tos, dificultad para respirar, mareos, letargo, fiebre y problemas digestivos (EPA, s/f).

Es importante recalcar que como los contaminantes biológicos son seres vivos, que tienen la capacidad de reproducirse; que existan cepas con distinto poder patogénico en algunas especies bacterianas; o que la temperatura y humedad ambiental pueden afectar su presencia, no permite establecer “valores máximos permitidos” generalizados (Hernández y Martí, s/f).

2.1.1.2.3 CONTAMINACIÓN QUÍMICA

Los contaminantes químicos son aquellos constituidos por materia inerte y pueden estar presentes en el aire como moléculas individuales (gases o vapores) o en un grupo de moléculas (aerosoles) (Superintendencia de Riesgos de Trabajo, 2016).

Los agentes químicos pueden ser absorbidos por el cuerpo a través de las siguientes vías: respiratoria (a través de nariz, boca y pulmones), vía dérmica (a través de la piel), vía digestiva (por la boca, estómago, intestinos, etc.) y por vías parenterales (heridas, llagas etc.) (Instituto Navarro de Salud Labora, s/f).

Por lo que respecta a los efectos a la salud de los seres humanos, la exposición a concentraciones elevadas de contaminantes en el aire puede generar desde irritación en las vías respiratorias, hasta enfermedades crónicas respiratorias y cardiacas, cáncer de pulmón, infecciones respiratorias en niños y bronquitis en adultos, así como agravar padecimientos preexistentes (Kampa y Castanas, 2008). La tabla 4 muestra los efectos tóxicos que se pueden generar por la exposición prolongada a contaminantes químicos.

EFECTOS TÓXICOS DE LOS CONTAMINANTES QUÍMICOS		
Tipo	Efectos	Ejemplos
Irritantes	Inflamación en la región anatómica del contacto	Cloro Productos ácidos Productos alcalinos
Asfixiantes	Impiden el desplazamiento del oxígeno a los tejidos y alteran los mecanismos oxidativos biológicos	Nitrógeno Dióxido de carbono Monóxido de carbono Cianuros
Narcóticos	Depresión del sistema	Hidrocarburos

	nervioso central	Alcoholes Ésteres
Neumoconióticos	Alteración pulmonar por partículas sólidas	Sílice cristalina Amianto
Sistémicos	Alteraciones agresivas en un órgano o tejido específico	Plomo Magnesio Mercurio Metales pesados
Alérgenos	Reacciones antígeno-anticuerpo descontroladas	Isocianatos Polvo de ciertas maderas
Carcinógenos	Inducen proliferación celular desordenada	Amianto Benceno Compuestos hexavalentes del cromo
Teratógenos	Provocan malformaciones congénitas	Dioxinas Mercurio Bifenilos policlorados
Mutágenos	Actúan sobre el material genético y provocan alteraciones hereditarias	Benzo-a-pireno Acetaldehído Formaldehído Estireno

Tabla 4: Efectos tóxicos de los contaminantes químicos (Elaborado a partir de: Superintendencia de Riesgos de Trabajo, 2016 e Instituto Navarro de Salud Labora, s/f)

2.2 CALIDAD DEL AIRE

La calidad del aire se define como el nivel de concentración de contaminantes atmosféricos en un determinado tiempo y lugar catalogados con un índice estadístico como medida de protección a la salud (DOF, 2019).

Se estima que la contaminación del aire exterior provoca 4.2 millones de muertes prematuras a nivel mundial, siendo el 89% de esa tasa de mortalidad, habitantes de países de bajo y mediano ingreso (OMS, 2022).

Diversos organismos nacionales e internacionales han establecido normativas y estándares de calidad del aire para disminuir los efectos adversos de la contaminación ambiental. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, s/f) desarrolló los Estándares Nacionales de la Calidad del Aire

Ambiental (NAAQS por sus siglas en ingles) en los cuales identifica a los seis contaminantes más comunes, designados como “contaminantes del aire criterios”. Entre los que se encuentran:

- **Materia particulada (pm):** se compone por sulfatos, nitratos, amoniaco, cloruro de sodio, carbono negro, polvos minerales y agua.
- **Monóxido de carbono (CO):** gas tóxico inodoro, incoloro e insípido producto de la combustión incompleta de combustibles carbonados.
- **Ozono (O₃):** se forma por las reacciones fotoquímicas de los gases
- **Dióxido de nitrógeno (NO₂):** gas generalmente liberado por la combustión relacionada al transporte.
- **Dióxido de azufre (SO₂):** gas incoloro con un olor penetrante, resultado de la quema de combustibles fósiles, como el carbón y el petróleo, así como la fundición de menas que contengan azufre.

La Organización mundial de la Salud (WHO, s/f) ha indicado diferentes pautas que determinan los niveles recomendados de los contaminantes criterio, los cuales se encuentran en la tabla 5.

Contaminante	Valor	Tiempo promedio	Referencia
PM _{2.5}	5 µg/m ³ 15 µg/m ³	Anual 24 horas	Organización Mundial de la Salud, 2021
PM ₁₀	15 µg/m ³ 45 µg/m ³	Anual 24 horas	Organización Mundial de la Salud, 2021
Monóxido de carbono	4 mg/m ³	24 horas	Organización Mundial de la Salud, 2021

Dióxido de nitrógeno	10 µg/m ³ 25 µg/m ³	Anual 24 horas	Organización Mundial de la Salud, 2021
Dióxido de azufre	40 mg/m ³	24 horas	Organización Mundial de la Salud, 2021
Formaldehído	0.1 mg/m ³	30 minutos	Organización Mundial de la Salud, 2010
Hidrocarburos aromáticos policíclicos	8.7 × 10 ⁻⁵ per ng/m ³		Organización Mundial de la Salud, 2010
Radón	100 Bq/m ³		Organización Mundial de la Salud, 2010
Plomo	0.5 µg/m ³	Anual	Organización Mundial de la Salud, Oficina Regional de Europa 2000

Tabla 5. Pautas de contaminantes ambientales (Elaborado a partir de: OMS (s/f)).

Por su parte, la Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos (EPA) diseñó un índice de calidad del aire (AQI por sus siglas en inglés) que señala que tan limpio se encuentra el aire y los efectos a la salud con los que se puede asociar (Figura 4). Se calcula en base a cuatro contaminantes: ozono a nivel del suelo, materia particulada, monóxido de carbono y dióxido de azufre (EPA, 2014).

Índice de la calidad del aire	¿Quién se debe preocupar?	¿Qué debo hacer?
Buena (0-50)		¡Es un día excelente para realizar actividades al aire libre!
Moderada (51-100)	Personas que podrían ser excepcionalmente sensibles a la contaminación por partículas.	Personas excepcionalmente sensibles: <i>Contemplar reducir</i> las actividades que requieran esfuerzo prolongado o intenso al aire libre. Prestar atención a la aparición de síntomas como tos o dificultad para respirar. Esto indica que se debe reducir el esfuerzo. Para el resto de las personas: ¡Es un buen día para realizar actividades al aire libre!
Insalubre para grupos sensibles (101-150)	Los grupos sensibles comprenden a personas con cardiopatías o enfermedades pulmonares, adultos mayores, niños y adolescentes.	Grupos sensibles: <i>Reducir</i> las actividades que requieran esfuerzo prolongado o intenso. Está bien realizar actividades al aire libre pero descanse a menudo y realice actividades menos intensas. Prestar atención a la aparición de síntomas como tos o dificultad para respirar. Las personas asmáticas deben seguir sus planes de acción y tener a mano medicamentos de acción rápida. Si padece de una cardiopatía: Síntomas como palpitaciones, dificultad para respirar o fatiga inusual pueden indicar un problema grave. Si sufre cualquiera de estos síntomas, comuníquese con su proveedor médico.
Insalubre (151-200)	Todos	Grupos sensibles: <i>Evitar</i> actividades que requieran esfuerzo prolongado o intenso. Tener en cuenta la posibilidad de realizar las actividades adentro o reprogramarlas. Para el resto de las personas: <i>Reducir</i> las actividades que requieran esfuerzo prolongado o intenso. Descansar a menudo durante las actividades al aire libre.
Muy insalubre (201-300)	Todos	Grupos sensibles: <i>Evitar</i> todas las actividades físicas al aire libre. Trasladar las actividades al interior o reprogramarlas para cuando la calidad del aire sea mejor. Para el resto de las personas: <i>Evitar</i> las actividades que requieran esfuerzo prolongado o intenso. Contemplar trasladar las actividades al interior o reprogramarlas a un horario en el que la calidad del aire sea mejor.
Peligrosa (301-500)	Todos	Todos: <i>Evitar</i> todas las actividades físicas al aire libre. Grupos sensibles: Permanecer adentro y mantener un nivel de actividad bajo. Seguir las sugerencias para mantener bajos los niveles de partículas en ambientes cerrados.

Figura 4. Índice de Calidad del Aire (EPA, 2016) Recuperada de: https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-05/air-quality-guide_particle_SPA.pdf

2.2.1 LEGISLACIÓN MEXICANA EN MATERIA DE CALIDAD DEL AIRE

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) diseñó en 2017 la Estrategia Nacional de Calidad del Aire (ENCA) para funcionar como un instrumento de planeación de programas y estrategias para controlar, mitigar y prevenir la emisión de contaminantes del aire en ambientes rurales y urbanos, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de la población mexicana (SEMARNAT, 2017).

En México se han desarrollado leyes, reglamentos y normativas que permiten regular la contaminación atmosférica para el cuidado de la calidad del aire. La tabla 6 muestra las mas importantes:

ORDEN LEGAL	ESTABLECE
Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos	Artículo 4. Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El estado garantizara el respeto a este derecho.
Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)	Establece competencias relativas a la protección ambiental y el equilibrio ecológico en los tres órdenes de gobierno: federal, estatal y municipal; así como el control de fuentes de emisión de contaminación atmosférica.
Reglamento de la LGEEPA en Materia de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica (RLGEPPAMPCCA)	Es un reglamento para la prevención de la contaminación atmosférica y el control de emisiones
Reglamento de la LGEEPA en Materia de Registro de emisiones y Transferencia de contaminantes (RLGEPPAMRETC)	Pronuncia la integración de la base de datos del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes tramitadas ante la SEMARNAT o ante las autoridades estatales o municipales.
NOM-043-SEMARNAT-1993	Indica los niveles máximos de partículas sólidas emitidas por fuentes fijas en el ambiente.
NOM-085-SEMARNAT-1994	Norma los niveles máximos permisibles de fuentes fijas provenientes de los combustibles fósiles como: humo, partículas suspendidas, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno.

NOM-016-CRE-2016	Establece especificaciones de calidad de los productos que se obtienen de la refinación del petróleo, del procesamiento del gas natural y que derivan en hidrocarburos.
NOM-EM-002-ASEA-2016	Establece parámetros para la operación, mantenimiento, eficiencia y métodos de prueba para los sistemas de recuperación de vapores de gasolina para el control de emisiones en estaciones de servicio.

Tabla 6. Legislación en materia de Calidad del Aire en México (Elaborado a partir de: Greenpeace (s/f) https://www.greenpeace.org/static/planet4-mexico-stateless/2018/11/ff412966-ff412966-aire_que_respiro_ok_emr.pdf).

2.3 CALIDAD DEL AIRE INTERIOR

Mantener un nivel óptimo de calidad del aire interior se ha convertido en una preocupación de salud internacional. Se estima que las personas permanecen hasta un 90% del tiempo en espacios interiores, del cual el 75% es en el hogar. A su vez, la calidad del aire interior suele ser de dos a tres veces menor que la del aire exterior (Laquatra, 2018).

La Organización Mundial de la Salud (2023) estima que, en 2020, la contaminación del aire doméstico ocasionó 3.2 millones de muertes, entre ellas 237,000 infantes menores de 5 años.

La calidad del aire al interior de inmuebles se puede agravar por muchos factores, uno de los principales es el diseño de edificios mas herméticos, con bajos rangos de ventilación que priorizan la conservación de energía (OMS, 2000).

Por otra parte, el nivel de ocupación del edificio también juega un rol fundamental, ya que la respiración continua de los ocupantes puede aumentar los niveles de CO₂, originando una reducción del oxígeno disponible en espacios cerrados; que puede ocasionar dolores de cabeza y nauseas (Katiyar y Khare, 2008).

La medida de los contaminantes del aire interior depende del grado de emisión, volumen de distribución, el grado de intercambio del aire entre el exterior e

interior y del tamaño de la materia particulada. En general, los contaminantes del aire interior se pueden clasificar de la siguiente manera: materia particulada, combustibles sólidos, gases (ozono, óxido de nitrógeno, dióxido de sulfuro etc.), compuestos orgánicos volátiles, humo de tabaco, humedad y contaminación microbiana, radón y asbesto (Puneet, 2014).

En el caso de los ambientes habitacionales, Komalkirti y Sundeep (2016) han identificado como las principales fuentes de contaminación del aire interior a: el humo del tabaco, materiales de construcción, combustible para cocinar, calentar e iluminar, uso de incienso, uso de pesticidas y otros químicos para la limpieza y el uso de aromatizantes.

Por lo que respecta a la contaminación biológica en el hogar, la EPA (s/f) menciona como principales fuentes al polen, virus, bacterias, moho, animales domésticos, excrementos y partes del cuerpo de plagas o insectos, la proteína de la orina de las ratas y los sistemas centrales de aire acondicionado.

A su vez, Seguel, Merrill, Seguel y Campagna (2017) catalogan como una de las principales fuentes a las células muertas y la saliva de los animales como perros, gatos y otras mascotas con pelaje. Los gatos están altamente asociados a padecimientos como el asma, debido a la proteína Fel D1 que se encuentra en su saliva. Debido a su tamaño, de aproximadamente 2.5 μm de diámetro, se estima que en promedio se puede inhalar hasta 1 μm de la proteína Fel D1 al día.

Los sistemas mecánicos de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC por sus siglas en inglés) pueden propiciar la multiplicación bacteriana; sobre todo por la cercanía de las tomas de aire a fuentes de contaminación como: agua estancada, desechos orgánicos, excremento de aves, etc. (Molina, 2015).

Sin embargo, la fuente mas importante de bacterias y virus en el ambiente interior son los ocupantes del espacio. Adicionalmente, tienen la habilidad de funcionar como huéspedes para transportar otros contaminantes biológicos como alérgenos producidos por los animales de compañía (Culver, 2015).

Mientras tanto, el aire exterior también juega un papel crítico en los niveles de contaminación interior, ya que se introduce por tres vías principales: ventilación natural, ventilación mecánica e infiltración. La ventilación mecánica conduce el aire exterior desde las tomas de aire y la ventilación natural desde puertas y ventanas. No obstante, la infiltración utiliza las grietas y fugas de la envolvente del edificio. Estos mecanismos aumentan los cambios de aire por hora que a su vez pueden diluir o acumular los contaminantes en el aire interior (Leung, 2015).

2.3.1 FORMALDEHÍDO

El formaldehído es un gas incoloro, inflamable y altamente reactivo a temperatura ambiente. Se puede formar de diferentes fuentes naturales, por la combustión de biomasa en incendios forestales, o las erupciones volcánicas; y también por actividades antropogénicas como las emisiones industriales y el combustible del tráfico (OMS,2010)

En el año 2006 fue clasificado por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) en el grupo 1 (cancerígeno en humanos) basándose en evidencia que indica un incremento en la incidencia de cáncer nasofaríngeo, así como desarrollo de leucemia y asma.

Los estudios realizados por el IARC en animales reflejan que tiene una vida de 1 a 1.5 minutos en el plasma sanguíneo, mientras que metabolizado puede durar hasta 55 minutos. Es importante recalcar que los mayores daños se generan antes del proceso de metabolización, y que los efectos adversos agudos se presentan luego de 14 días de exposición cuando las concentraciones sobrepasan los límites establecidos (Astros-Fonseca y Combariza-Bayona, 2019).

Las fuentes de emisión de formaldehído en el aire interior se pueden dividir en dos categorías: por combustión y sin humo. Las fuentes de combustión incluyen los cigarrillos y otros productos derivados del tabaco. Las principales fuentes sin humo se emiten por productos de madera, adhesivos, barnices, pinturas y otros materiales de construcción (Health Canadá, 2006).

A su vez, el formaldehído puede formarse por la oxidación de compuestos orgánicos volátiles, que a su vez puede foto oxidarse y producir dióxido de carbono. Este proceso se realiza rápidamente cuando se tiene contacto a luz solar y oxígeno (OMS, 2010)

Su principal vía de exposición es la inhalatoria, aunque también se puede absorber por la vía dérmica y la gastrointestinal (Peñalver et al, 2016). Los efectos a la exposición de formaldehído se indican en la tabla 7.

Concentración de formaldehído (ppm)	Efectos a la salud
0.1 a 2.0 ppm	Irritación de ojos y garganta
10 a 20 ppm	Dificultad respiratoria, sensación de ardor en nariz y garganta
25 a 30 ppm	Daño severo que puede ocasionar edema pulmonar y neumonitis
100 ppm	Puede ocasionar la muerte

Tabla 7. Efectos a la salud por exposición a formaldehído (Elaborado a partir de: Peñalver et al. (2016))

2.3.2 MATERIA PARTICULADA

Se denomina materia particulada al conjunto de partículas sólidas y líquidas emitidas directamente al aire, como el hollín del diesel, polvo y las partículas resultantes de los procesos productivos. Son una compleja mezcla de productos químicos y/o biológicos, que pueden interactuar entre si formando otros compuestos. Se clasifican en relación a su diámetro aerodinámico, como finas y gruesas (Arciniégas, 2012).

Como otros contaminantes, las fuentes de materia particulada pueden ser naturales o por el hombre. Las fuentes naturales incluyen a las erupciones volcánicas, tormentas de arena, incendios forestales, etc.; mientras que las producidas por el hombre son principalmente por la quema de combustibles, los

procesos industriales, pozos petroleros, cemento, la industria manufacturera de vidrio, la quema del carbón y los desechos agrícolas (Yunus, 2009).

Existen diversos elementos que han sido identificados como los principales componentes de la materia particulada; la tabla 8 los describe en relación a su diámetro. No obstante, se estima que entre el 20 y el 50% de la PM_{2.5} proviene del carbón (Singh y Tripathi, 2021).

Composición	Rango de diámetro de la materia particulada (µm)		
	10 – 2.5	2.5 – 1.0	< 1.0
Componentes elementales	Na, Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Fe, Zn, Pb, Cr, V, Ni, Cu	Na, Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Fe, Zn, Pb, Cr, V, Ni, Cu	Na, Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Fe, Zn, Pb, Cr, V, Ni, Cu
Componentes iónicos	Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ⁻ , Na ⁺ , K ⁺ , Ca ⁺⁺	NO ₃ ⁻ , SO ₄ ⁻ , NH ₄ ⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , Ca ⁺⁺	Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , SO ₄ ⁻ , NH ₄ ⁺
Origen	Terrestre y sal de mar	Partículas de generación secundaria	Partículas de generación secundaria

Tabla 8. Elementos de la materia particulada (Elaborado a partir de: Singh y Tripathi, 2021)

Las partículas PM₁₀ y PM_{2.5} son tan pequeñas que poseen la propiedad de penetrar la región torácica del sistema respiratorio. Los efectos a la salud por su inhalación pueden variar en relación a la exposición a corto y largo plazo, estos incluyen: enfermedades respiratorias y cardiovasculares, agravación del asma y cáncer de pulmón (OMS, 2013).

Se han establecido rangos de concentraciones de materia particulada en el ambiente, como criterio para evaluar la calidad del aire y como medida de protección a la salud de la población. Las tablas 9 y 10 muestran la clasificación de los rangos de materia particulada PM₁₀ y PM_{2.5} respectivamente.

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de PM ₁₀ promedio móvil ponderado de 12 horas (µg/m ³)
Buena	Bajo	≤ 50
Aceptable	Moderado	>50 y ≤75
Mala	Alto	>75 y ≤155
Muy mala	Muy Alto	>155 y ≤235
Extremadamente mala	Extremadamente alto	>235

Tabla 9. Intervalos de materia particulada PM₁₀ (DOF, 2019)

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de PM _{2.5} promedio móvil ponderado de 12 horas (µg/m ³)
Buena	Bajo	≤ 25
Aceptable	Moderado	>25 y ≤45
Mala	Alto	>45 y ≤79
Muy mala	Muy Alto	>79 y ≤147
Extremadamente mala	Extremadamente alto	>147

Tabla 10. Intervalos de materia particulada PM_{2.5} (DOF, 2019)

2.3.3 DIÓXIDO DE CARBONO

El dióxido de carbono (CO₂) es uno de los principales gases de efecto invernadero, producido principalmente por la quema de combustibles fósiles para suministrar energía, así como las actividades industriales y la deforestación (Sousa, Lopes, Moura y Moura, 2019).

Existe una fuerte asociación del dióxido de carbono con la calidad del aire interior, ya que suele utilizarse como un indicador; si las concentraciones de dióxido de carbono son elevadas, puede relacionarse a una insuficiencia de ventilación, que a su vez puede derivar en alzas de otros contaminantes del aire interior (Sireesha, 2017).

La Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE por sus siglas en inglés) indica que la generación de CO₂ de los humanos depende del coeficiente de respiración (que varía en relación a la dieta de la persona) y de las actividades realizadas. Así mismo, recomienda una concentración entre 1000 y 1200 ppm para espacios interiores.

Los efectos del CO₂ varían dependiendo la concentración y duración a la exposición, entre los efectos a la salud se encuentran: dolores de cabeza y dificultad para respirar (3000 ppm por más de una hora) aumento de la presión arterial, mareos (6000 ppm por varias horas) mareos, inconciencia y espasmos musculares severos (15 000 por un minuto) convulsiones, coma y la muerte (30 000 por un minuto) (EPA, s/f).

2.3.4 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

Los compuestos orgánicos volátiles incluyen compuestos como el etileno, propileno, benceno o estireno. Se generan principalmente por la combustión ineficaz de aceites fósiles y se evaporan a una temperatura relativamente baja, lo que contribuye a la contaminación del aire (Grijalva, Jiménez y Ponce, 2020).

2.3.5 HUMO AMBIENTAL DE TABACO

Al encender un cigarrillo se pueden identificar diferentes fuentes de emisión de contaminantes; el humo principal se produce por la combustión del cigarrillo, mientras que el humo secundario es el exhalado por el fumador. La mezcla del humo principal diluido y del humo secundario se conoce como humo ambiental de tabaco o humo de segunda mano (ASHRAE, 2010).

Entre los efectos a la salud asociados a la exposición de humo de segunda mano se encuentran las enfermedades del corazón, cáncer de pulmón, agravamiento del asma y el síndrome de la muerte súbita infantil (Lubick, 2011). La tabla 11 clasifica estas adveraciones sanitarias de manera puntual.

Efectos sanitarios asociados con la exposición al humo de tabaco ambiental	
Efectos sobre el desarrollo	<ul style="list-style-type: none"> • Crecimiento fetal: bajo peso al nacer y disminución de peso al nacer • Síndrome de muerte súbita del lactante • Nacimiento de pretérmino
Efectos respiratorios	<ul style="list-style-type: none"> • Infecciones graves en las vías respiratorias bajas en niños • Inducción y empeoramiento del asma en niños y adultos • Síntomas respiratorios crónicos en niños • Irritación ocular y nasal en adultos • Infecciones del oído medio en niños
Efectos cancerígenos	<ul style="list-style-type: none"> • Cáncer de pulmón • Cáncer en los senos paranasales • Cáncer de mama en mujeres jóvenes (principalmente pre menopaúsicas)
Efectos cardiovasculares	<ul style="list-style-type: none"> • Mortalidad por cardiopatías • Morbilidad por cardiopatías isquémicas graves y crónicas • Propiedades vasculares alteradas
Efectos con pruebas que indican una relación causal con la exposición al humo de tabaco ambiental	
Efectos reproductivos y en desarrollo	<ul style="list-style-type: none"> • Abortos espontáneos, retraso del crecimiento intrauterino • Repercusión adversa sobre la cognición y el comportamiento • Sensibilización alérgica • Crecimiento disminuido de la función pulmonar • Efectos adversos en la fecundidad
Efectos cardiovasculares y hemáticos	<ul style="list-style-type: none"> • Riesgo elevado de accidentes cerebrovasculares
Efectos respiratorios	<ul style="list-style-type: none"> • Empeoramiento de fibrosis quística • Síntomas respiratorios crónicos en adultos
Efectos cancerígenos	<ul style="list-style-type: none"> • Cáncer del cuello uterino • Cáncer de cerebro y linfomas en niños • Cáncer nasofaríngeo • Todas las formas de cáncer en niños y adultos

Tabla 11. Efectos a la salud por exposición al humo de segunda mano (Palacios y Moreno, 2022)

Así mismo, es necesario recalcar el impacto negativo en la calidad del aire interior por el uso de productos como cigarrillos electrónicos y Heated tobacco, Se ha comprobado que las emisiones de metales de estos dispositivos son incluso mayores, en comparación a los cigarrillos convencionales (Świsłowski, Śmiechowicz y Rajfur, 2022).

2.4 VENTILACIÓN

La Agencia de Protección Ambiental de los Estado Unidos (EPA por sus siglas en inglés) recomienda diversas estrategias para mejorar la calidad del aire interior, tales como controlar las fuentes de contaminación, ajustar la humedad entre el 30 y 50% para evitar la propagación de moho y aumentar la ventilación de los espacios (EPA, 2008).

El término ventilación se refiere a la provisión de aire exterior suficiente para que los ocupantes de los espacios puedan respirar, y que a su vez permita diluir la concentración de contaminantes en el aire generados por los usuarios, equipo y materiales de la envolvente arquitectónica. Este proceso de dilución depende directamente de la cantidad y calidad del aire suministrado, así como de su distribución en los diferentes espacios del edificio (H.B.AWBI, 2003).

La ventilación juega un rol crítico en el ambiente interior, ya sea natural, mecánica o en su modo híbrido. Sin embargo, actualmente presenta un gran reto, ya que, en los países en desarrollo con altos niveles de contaminación exterior; la ventilación posibilita el ingreso de agentes contaminantes al interior de los edificios (Tengfei, Jingjing, 2019).

2.4.1 VENTILACIÓN NATURAL

Se define como ventilación natural al proceso de renovación de aire por medios naturales, ya sea por infiltración o por la apertura de ventanas. Además de influir en la temperatura del aire y la radiación solar, interviene en la concentración de humedad y contaminantes (Austin, Mora, Bruneau y Sempey, 2022).

Uno de los principales beneficios de su implementación es que permite regular la temperatura interior sin representar un gasto energético (Santamouris y Wouters, 2006). Sin embargo, depende del viento y la presión, que pueden resultar bajos en comparación a los sistemas de ventilación mecánica. Además, se acata al diseño de la envolvente del edificio y de sus corredores (Kleiven, 2006).

2.4.2 VENTILACIÓN MECÁNICA

La ventilación mecánica se refiere a la suplementación de aire utilizando equipo eléctrico; puede formar parte de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC por sus siglas en inglés) o bien estar instalada individualmente en algún espacio seleccionado. Además de mejorar la calidad del aire interior y la salubridad de los espacios (derivado de las renovaciones de aire), puede optimizar la calidad ambiental de los edificios con hermeticidad (Tronchin, Fabbri y Bertolli, 2018).

Para edificios residenciales, la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE por sus siglas en inglés) indica la instalación de sistemas de ventilación mecánica para garantizar los rangos de ventilación; exceptuando aquellos edificios en los cuales alguna autoridad avala a la ventilación natural como suficiente, así como aquellos que no cuenten con sistemas de enfriamiento y que se encuentran condicionados térmicamente al menos 876 horas anuales.

El rango de ventilación total de los edificios residenciales se calcula en relación al área de la vivienda y al número de habitaciones, como se muestra en la tabla 12.

Floor Area, m ²	Habitaciones				
	1	2	3	4	5
<47	14	18	21	25	28
47 to 93	21	24	28	31	35
94 to 139	28	31	35	38	42
140 to 186	35	38	42	45	49
187 to 232	42	45	49	52	56
233 to 279	49	52	56	59	63
280 to 325	56	59	63	66	70
326 to 372	63	66	70	73	77
373 to 418	70	73	77	80	84
419 to 465	77	80	84	87	91

Tabla 12. Rango de ventilación en edificios residenciales. ASHRAE (2019)

2.5 CONTEXTO REGIONAL: MEXICALI

La ciudad de Mexicali se encuentra en una zona semidesértica y se caracteriza por sus temperaturas extremas, alcanzando una máxima de 42.2 °C en julio y una mínima promedio de 21°C en enero (Santillán-Soto et. al, 2016). Su ubicación en el Bajo Delta del Río Colorado genera implicaciones relacionadas a la contaminación del aire, ya que en temporadas sufre por el acarreo de polvo y arena proveniente del desierto, así como quemas agrícolas y aplicación de plaguicidas (Corona y Rojas, 2009).

La velocidad y dirección de los vientos se ven influidos por diversos factores geográficos, topográficos y meteorológicos de la zona, los cuales favorecen el transporte y la deposición de contaminantes en su cuenca atmosférica (Nieblas y Quintero, 2006).

La carencia de infraestructura urbana en materia de pavimentación tiene un impacto negativo en el medio ambiente y en la salud, incluso en un contexto binacional. Para el año 2015, se estimaba que el 22% de las vialidades mexicalenses se encontraban sin pavimentar, lo cual se relaciona con las concentraciones de PM₁₀ en el aire (Cervera, Rojas y Balarezo, 2015).

Por lo que respecta al inventario de emisiones, la Fundación para la Investigación de la Calidad del Aire A.C. (2020) indica que en los meses de diciembre y enero se registra el Índice de Calidad del aire más deficiente, clasificado por la EPA como insalubre y peligroso; siendo las zonas sur y poniente las más afectadas.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

El siguiente capítulo describe la metodología que se propone para el desarrollo de esta investigación; desde la estructura de su diseño, el desglose de las etapas y la correlación de las mismas.

Para el diseño de la metodología se combinaron métodos no experimentales transversales del tipo correlacional y métodos experimentales, mediante la aplicación de un cuasiexperimento.

La estructura de la metodología, como se muestra en la figura 5 se desglosó en 3 etapas principales, basadas en las recomendaciones de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) y de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE por sus siglas en inglés) para mejorar la calidad del aire en los espacios interiores. Ambos organismos coinciden en que el control de fuentes de contaminación es la estrategia más efectiva, seguida de la implementación de sistemas de ventilación y purificación del aire, así como el control de humedad y cambiar los filtros regularmente (EPA, 2008) (ASHRAE, 2018).

Es por ello que la primera parte consiste en la aplicación de un breve cuestionario para establecer la influencia de los hábitos de los residentes a la calidad del aire de sus viviendas, de tal manera que permita identificar aquellas fuentes que pueden erradicarse o disminuirse considerablemente.

En segunda instancia, el monitoreo de la calidad del aire en una vivienda de interés social ubicada en la ciudad de Mexicali, Baja California, durante la temporada cálida y fría. Cabe mencionar que se seleccionaron estas etapas de monitoreo por cuestiones térmicas y por los reducidos cambios de aire por hora, además de que son las dos etapas en las que se presenta la mejor y peor calidad del aire exterior respectivamente.

Finalmente, la etapa de simulación tiene como finalidad integrar los resultados de las encuestas y de los monitoreos para establecer estrategias que reduzcan los niveles de contaminación del aire interior en las viviendas y que propicien el bienestar de sus usuarios.

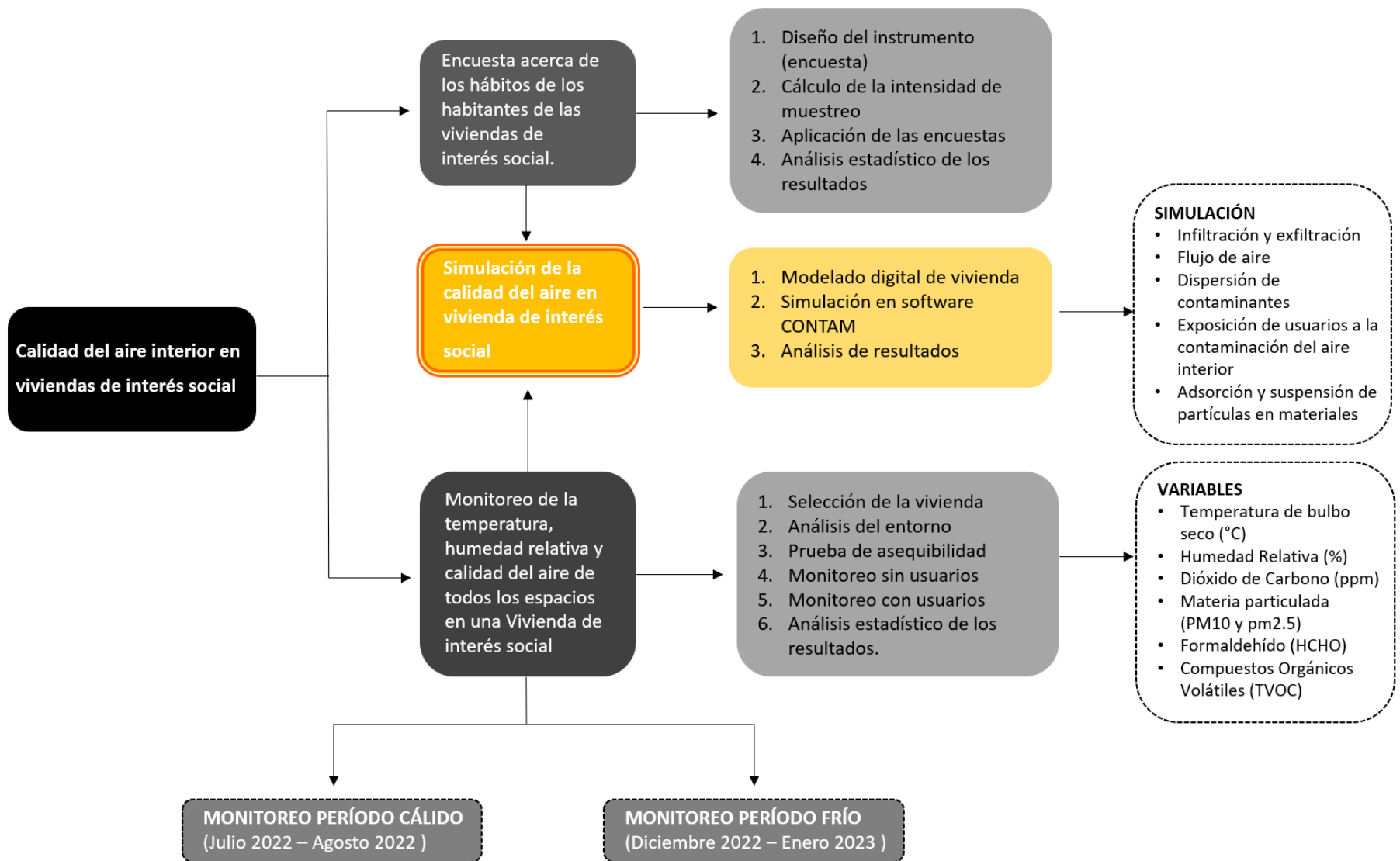


Figura 5. Diseño de la metodología. Elaboración propia.

3.1 RECOLECCIÓN Y REPRESENTACIÓN DE LOS DATOS

En este capítulo del documento se describen las herramientas a utilizar para el desarrollo de los procesos a efectuar durante las tres etapas de la metodología de esta investigación: Encuesta, Monitoreo y Simulación computacional.

3.1.1 ENCUESTA DE CALIDAD DEL AIRE EN VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL

La aplicación de la encuesta tiene como finalidad el identificar las principales fuentes de contaminación del aire interior en viviendas de interés social, asociadas principalmente a la ejecución de diversas actividades que los usuarios realizan en los recintos, a sus hábitos arraigados y a la operación de los sistemas de ventilación de las viviendas.

Se seleccionó a la ciudad de Mexicali, Baja California como el contexto geográfico del caso de estudio. Para el cálculo de la población se utilizaron los datos reportados por el Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda (INFONAVIT) en el Reporte Anual de Vivienda 2020, el cual indica que entre el año 2005 y 2019 se han entregado 100,215 créditos de vivienda en la ciudad de Mexicali, Baja California (INFONAVIT, 2020).

De acuerdo a lo descrito por Aguilar-Barojas (2005), para el cálculo de una muestra representativa con población finita, se utiliza la siguiente fórmula:

$$n = \frac{N Z^2 pq}{d^2 (N - 1) + Z^2 pq}$$

Donde:

p = proporción aproximada del fenómeno en estudio en la población de referencia

q = proporción de la población de referencia que no presenta el fenómeno en estudio (1 -p).

N = tamaño de la población

Z = valor de Z crítico, calculado en las tablas del área de la curva normal. Llamado también nivel de confianza.

d = nivel de precisión absoluta. Referido a la amplitud del intervalo de confianza deseado en la determinación del valor promedio de la variable en estudio.

Al reemplazar los valores se obtiene el siguiente resultado:

$$n = \frac{100,215 (2.58^2) (0.9 * 0.1)}{(0.1)^2 (100,215 - 1) + (2.58)^2 (0.9 * 0.1)} = 59.87$$

Para un nivel de confianza del 99% con una precisión del 90 % se obtuvo un total de 60 encuestas a aplicar a residentes de viviendas de interés social ubicadas en la zona urbana de la ciudad de Mexicali, Baja California.

Como se muestra en la tabla 13, el diseño del cuestionario se divide en tres matrices principales, de las cuales se derivan las siguientes preguntas:

MATRIZ	PREGUNTAS
Análisis del usuario	¿Alguno de los habitantes de su vivienda padece alguna enfermedad respiratoria?
	¿Es fumador habitual?
	¿Regularmente fuma al interior de su vivienda?
Análisis de la vivienda	¿Cuenta con un sistema de extracción mecánica de aire en la cocina?
	¿Cuenta con un sistema de extracción mecánica de aire en el baño?
	¿Cuenta con un purificador de aire en su vivienda?
	¿Qué tipo de sistema de aire acondicionado utiliza en su vivienda?
	¿Alguno de los espacios de su vivienda cuenta con alfombra?
Hábitos y actividades	¿Qué tipo de ventilación utiliza al cocinar?
	¿Durante qué horario realiza la limpieza de su vivienda?
	¿Qué tipo de ventilación utiliza al realizar la limpieza de su vivienda?

	¿Qué productos utiliza para realizar la limpieza de su vivienda?
	¿Al limpiar cualquier superficie, mezcla 2 o más productos?
	¿Utiliza difusores automáticos de fragancia, aerosoles, aromatizantes de madera o bolsa de flores secas para aromatizar los espacios de su vivienda?
	¿Enciende velas o incienso al interior de su vivienda?
	¿Hay mascotas que habitan al interior de su vivienda?
	¿Con que frecuencia lava la ropa de cama?

Tabla 13. Diseño de la encuesta. Elaboración propia

3.2 MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE EN VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL

A continuación, se describe el caso de estudio de esta etapa del experimento, mediante un análisis a macro y micro escala urbana, así como de las características arquitectónicas de la vivienda, las variables a monitorear y su relevancia al objetivo de la investigación, las características del equipo a utilizar y los procesos de medición de las variables.

3.2.1 CASO DE ESTUDIO

Para este estudio se seleccionó una vivienda tipificada dentro de la clasificación de interés social, ubicada en la periferia de la ciudad de Mexicali, Baja California, dentro de la zona suroriente (de acuerdo a la Zonificación Redspira indicada en la figura 6).

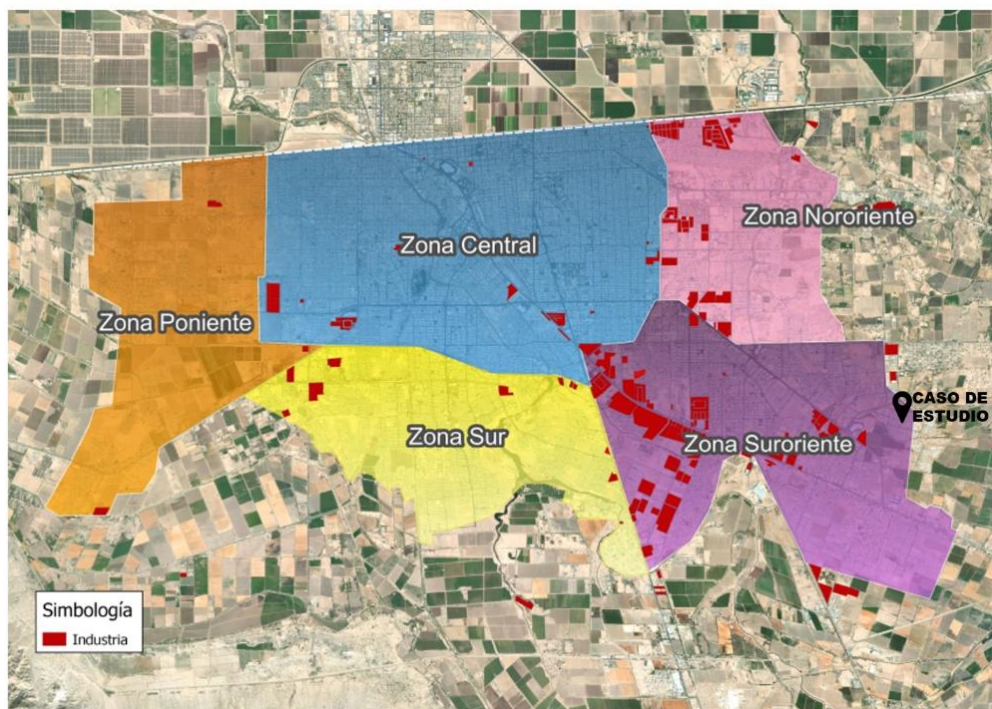


Figura 6. Zonificación Redspira. Elaboración propia a partir de Fundación para la Investigación de la Calidad del Aire A.C., s/f, Informe sobre calidad del aire en Mexicali durante 2020.

Esta zona se caracteriza por su proximidad a las industrias y por sus altos niveles de contaminación. En el año 2020, únicamente el 37% del tiempo presentó una calidad buena dentro del Índice de Calidad del Aire (AQI) utilizado por la EPA. La Estación Valle

del Pedregal, la cual se encuentra en proximidad al caso de estudio, reportó que el mes de enero es el crítico, alcanzando niveles dentro de la clasificación insalubre; mientras que junio y julio presentó la mejor calidad del aire (Fundación para la Investigación de la Calidad del Aire A.C., s/f).

El desarrollo urbano en el cual se sitúa el caso de estudio cuenta con red de agua potable con tomas domiciliarias, red de drenaje sanitario con descarga para cada lote, sistema de drenaje pluvial por escurrimiento, red aérea de energía eléctrica y de alumbrado público, sistema contra incendios mediante la colocación de hidrantes en vías públicas, forestación, jardinado y equipamiento de área verde, pavimento con carpeta asfáltica, guarniciones tipo "I", "L" y banquetas de concreto hidráulico (Órgano del Gobierno Constitucional de Baja California, 2015). Todas las obras de urbanización se encuentran finalizadas y se observa un buen estado de conservación.

Por lo que respecta a las fuentes de emisión de compuestos contaminantes del aire en la zona del estudio, la figura 7 muestra un análisis en un radio de tres kilómetros de los usos de suelo colindantes, vialidades primarias con altos niveles de tránsito, caminos no pavimentados y unidades de distribución de gas LP; las cuales, fueron identificadas como las principales fuentes emisoras en el municipio de Mexicali (Secretaría de Protección al Ambiente, 2018).



Figura 7. Análisis de fuentes de contaminación del aire exterior en colindancias al caso de estudio. Elaboración propia.

La vivienda seleccionada como caso de estudio (figura 8) comprende una superficie de 51.01 m², conformados por los siguientes espacios: sala, cocina, comedor, recámara, armario cambiador y baño. Entre los sistemas constructivos se encuentran: firme de concreto premezclado, muros de bloque de concreto común de 0.12 m de grosor asentado con mortero cemento arena 1:4 y losa de cubierta de vigueta y bovedilla.



Figura 8. Vivienda de interés social como caso de estudio. Elaboración propia.

Por lo que respecta al aislamiento térmico, únicamente la cubierta cuenta con un sistema, a base de placas de poliestireno de 0.0254 m de grosor. La tabla 14 describe las características de cada espacio de la vivienda.

Espacio	Área	Volumen	Acabados			Ventilación
			Piso	Muros	Cubierta	
Sala/Cocina Comedor	21.83 m ²	55.23 m ³	Loseta cerámica	Yeso pulido y pintura vinílica	Yeso Pulido	Natural: Ventanas con marco de aluminio y vidrio claro de 3 mm. Dimensiones: 1.02 m x 1.035 m 1.23 m x 1.035 m
Recámara	8.99 m ²	18.49 m ³	Tile	Yeso pulido y pintura vinílica	Yeso Pulido	Natural: Ventana con marco de aluminio y vidrio claro de 3 mm. Dimensiones: 0.82 m x 1.035 m

Closet - Cambiador	8.99 m ²	18.49 m ³	Concreto pulido	Yeso pulido y pintura vinílica	Yeso Pulido	Natural: Ventana con marco de aluminio y vidrio claro de 3 mm. Dimensiones: 0.82 m x 1.035 m
Baño	3.27 m ²	8.34 m ³	Loseta cerámica y azulejo antiderrapa nte	Yeso pulido, pintura vinílica y azulejo en área húmeda	Yeso pulido	Mecánica: Extractor de aire para baño con capacidad de 00 CFM

Tabla 14. Características de los espacios de la vivienda. Elaboración propia

El caso de estudio se encuentra habitado por dos adultos; ninguno de los cuales padecen enfermedades respiratorias. Uno de los usuarios reportó ser fumador habitual, sin embargo, especificó que solo fuma en los espacios exteriores de la vivienda. A su vez, indicaron que no encienden velas o incienso al interior; que realizan la limpieza de pisos diariamente con cloro y aromatizante; y, que cuentan con dos mascotas que permanecen al interior de la vivienda habitualmente.

3.2.2 MONITOREO DE VARIABLES

En este apartado se describen las especificaciones técnicas de los instrumentos a utilizar para el monitoreo de la temperatura de bulbo seco, humedad relativa, dióxido de carbono, formaldehído, materia particulada y compuestos orgánico volátiles en el aire interior y exterior del caso de estudio. A su vez, se reseña el proceso de medición y calibración del equipo, de acuerdo a la normativa nacional e internacional.

3.2.2.1 INSTRUMENTACIÓN PARA MEDICIÓN DE VARIABLES

Se utilizaron tres instrumentos para el monitoreo ambiental del caso de estudio, a continuación, se describen las especificaciones técnicas de cada uno, así como sus rangos de medición y precisión.

3.2.2.2 REGISTRADOR DE DATOS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD

Este dispositivo registrador de datos se utilizó para las mediciones de temperatura de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (%) al interior y exterior del caso de estudio. El instrumento (Figura 9) cuenta con una batería de hasta dos años de duración, pesa 0.60kg y sus dimensiones son 0.131 m x 0.024 m x 0.007 m (Elitech s/f)



Figura 9. Vistas del registrador de datos Elitech ® RC-51H. Elaboración propia

3.2.2.3 REGISTRADOR DE DATOS DE DIÓXIDO DE CARBONO

Este registrador de datos (figura 10) cuenta con la capacidad de realizar mediciones de temperatura de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%), materia particulada PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y dióxido de carbono (ppm). Sin embargo, este dispositivo únicamente se utilizó para la medición del dióxido de carbono en el aire al interior y exterior del caso de estudio. La capacidad de batería del instrumento es de 6 a 8 horas con la carga máxima, motivo por el cual, el dispositivo se utilizó conectado a la corriente eléctrica. Sus dimensiones son 0.260 m x 0.139 m x 0.033 m (Temptop s/f).



Figura 10. Vistas del registrador de datos Temtop ® P20C. Elaboración propia.

3.2.2.4 REGISTRADOR DE DATOS DE MATERIA PARTICULADA, FORMALDEHÍDO Y COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

Este instrumento (figura 11), también registrador de datos, se utilizó para la medición de materia particulada PM2.5 y PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), formaldehído (mg/m^3) y compuestos orgánicos volátiles (mg/m^3) en el aire al interior y exterior del caso de estudio. Las dimensiones del equipo son 0.177 m x 0.065 m x 0.032 m (Temtop s/f).

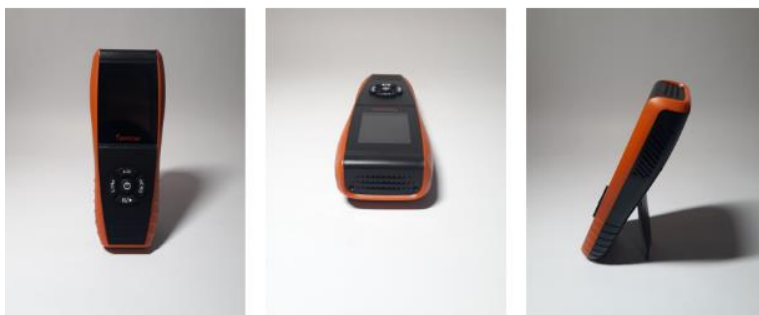


Figura 11. Vistas del registrador de datos Temtop ® LKC-1000S+. Elaboración propia

3.2.2.5 RANGOS DE MEDICIÓN Y PRECISIÓN

La tabla 15. muestra los rangos de medición de los equipos para cada variable, así como los rangos de precisión de las mismas.

Equipo	Variable	Rango	
		Medición	Precisión
Registrador de datos de Temperatura y Humedad Relativa	Temperatura de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$)	-30 $^{\circ}\text{C}$ a 70 $^{\circ}\text{C}$	± 0.5 (-20 $^{\circ}\text{C}/+40$ $^{\circ}\text{C}$)
	Humedad relativa (%)	10% ~ 95%	$\pm 3\% \text{RH}$ (25 $^{\circ}\text{C}$, 20% ~ 90% RH)
Registrador de datos de Dióxido de Carbono	Dióxido de carbono (ppm)	0 a 5000 ppm	± 40 ppm $\pm 3\%$ de lectura
Registrador de datos de Materia Particulada, Formaldehído y	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0 a 999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (@0-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0 a 999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (@0-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
	Formaldehído (mg/m^3)	0 a 5 mg/m^3	$\pm 0.03 \text{mg}/\text{m}^3$ (@0-0.3 mg/m^3)

Compuestos Orgánicos Volátiles	Compuestos orgánicos volátiles (mg/m ³)	0 a 5 mg/m ³	±0.03mg/m ³ (@0-0.3mg/m ³)
--------------------------------------	---	-------------------------	---

Tabla 15. Rangos de medición y precisión de la instrumentación del monitoreo. Elaboración propia a partir de Elitech s/f, Temtop s/f y Temtop s/f.

3.2.2.6 PROCESO DE MEDICIÓN DE VARIABLES

La determinación del proceso de medición de las variables a evaluar en esta investigación se basó en lo fundamentado en la normativa nacional e internacional. La tabla 16 muestra los lineamientos que se aplicaron para la colocación, calibración y programación de los instrumentos.

Equipo	Registrador de datos de Temperatura y Humedad Relativa		Registrador de datos de Dióxido de Carbono	Registrador de datos de Materia Particulada, Formaldehído y Compuestos Orgánicos Volátiles			
Variable	Temperatura de bulbo seco (°C)	Humedad relativa (%)	Dióxido de carbono (ppm)	PM2.5 (µg/m³)	PM10 (µg/m³)	Formaldehído (mg/m³)	Compuestos orgánicos volátiles (mg/m³)
Calibración	Equipo con calibración de fábrica		En espacios con ventilación natural, el espacio a monitorear debe ser ventilado rigurosamente hasta que el punto inicial de CO ₂ sea equivalente a la concentración del aire exterior. En espacios con ventilación mecánica, la medición base se toma 1 hora después de encender el sistema de ventilación. Posteriormente, el equipo se coloca en modo calibración, este proceso tiene una duración de 5 minutos y cuando termina automáticamente vuelve a su operación normal.	Colocar el instrumento en un espacio ventilado por 8 horas antes del monitoreo. Así mismo, previo a la medición se debe ventilar el espacio por un mínimo de 15 minutos.			
Colocación	El instrumento debe colocarse al centro del espacio, con al menos 1 m de separación de los muros.		El instrumento debe colocarse entre 1 a 2 m de distancia de los muros y a una altura de 1.5 m.	Colocar el instrumento al centro del espacio a una altura de 1.5 m	El instrumento debe colocarse entre 1 a 2 m de distancia de los muros y a una altura de 1.5 m.	Colocar el instrumento al centro del espacio a una altura de 1.5 m	
Programación	Intervalos de 5 minutos		Intervalos de 5 minutos	Intervalos de 5 minutos	Intervalos de 30 minutos	Intervalos de 5 minutos	
Normativa	ANSI/ASHRAE 55-2017		ISO 16000-26	ISO 16000-37	ISO 16000-2	ISO 16000-5	

Tabla 16. Procesos para la medición de variables. Elaboración propia a partir de Elitech s/f, Temtop s/f, Temtop s/f, ANSI/ASHRAE (2017), ISO (2017), ISO (2019) y ISO (2019)

3.2.2.7 COLOCACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS

La figura 12 muestra la ubicación de los instrumentos al interior y exterior del caso de estudio. El sitio de colocación se determinó con base a lo establecido por la normativa para la medición de las variables del monitoreo ambiental de esta investigación.

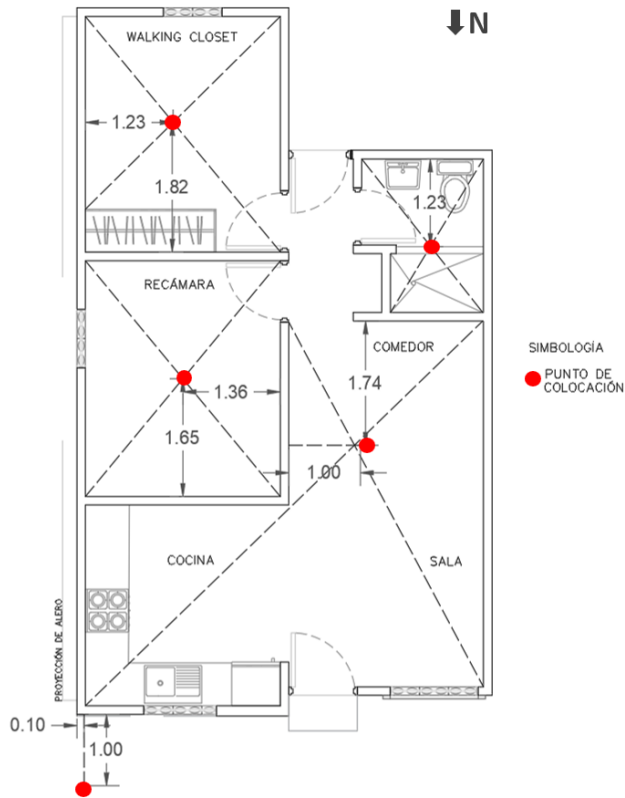


Figura 12. Ubicación de instrumentos a utilizar durante el monitoreo ambiental. Elaboración propia

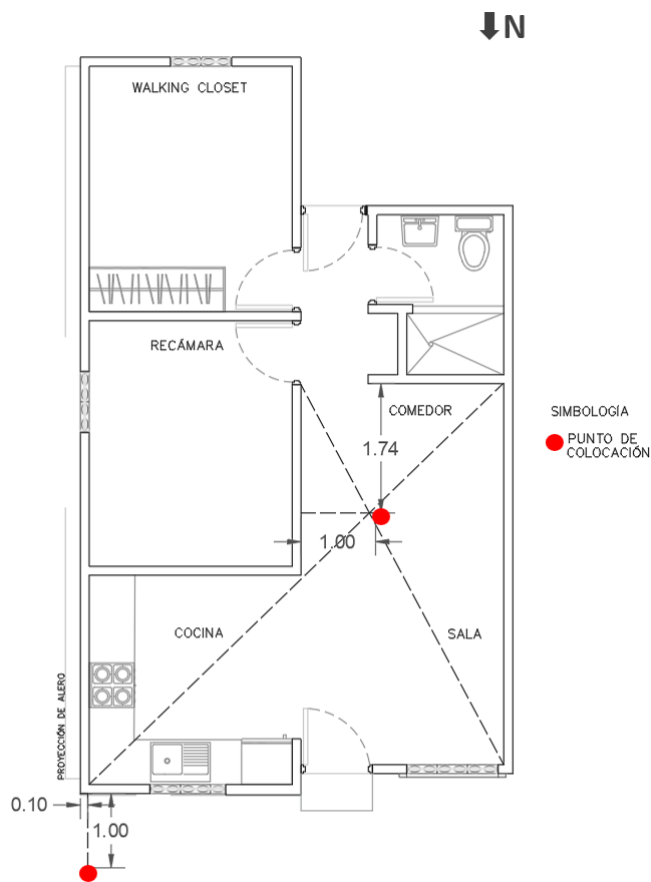
3.2.2.8 BITÁCORA

Para complementar y facilitar la interpretación de los resultados de las mediciones de las distintas variables, se utilizó una bitácora que enlistó las siguientes actividades:

- Ocupación del espacio
- Operación del aire acondicionado
- Inicio y finalización de actividades como cocinar y limpiar
- Operación de sistemas de ventilación natural y mecánica

3.3 PRUEBA PILOTO

La prueba piloto se realizó en el caso de estudio previamente descrito; constó de un monitoreo las 24 horas del día en un periodo comprendido entre el 02 y el 09 de mayo de 2022. Como se muestra en la figura 13, para esta prueba se designaron dos puntos de medición: uno al interior, encargado de medir el área compuesta por la sala, cocina y comedor; y uno al exterior de la vivienda, con el objetivo de funcionar como una medición base.



Para proteger los sensores exteriores de la radiación solar, se colocó una cubierta de propileno con orificios en todas sus caras para no obstaculizar el flujo de aire y permitir la medición de las variables a estudiar (figura 14).

A lo largo del proceso de monitoreo la vivienda fue climatizada con un sistema de aire acondicionado tipo Mini Split de una capacidad de enfriamiento de una tonelada, el cual permaneció encendido cuando el espacio se encontraba habitado. Es importante mencionar que la cocina del caso de estudio no cuenta con un sistema de ventilación

mecánica, ni de extracción de aire y que, derivado de las altas temperaturas y los mosquitos, las ventanas permanecieron cerradas.

El espacio fue habitado por dos adultos, uno de ellos acostumbra fumar habitualmente, no obstante, siempre lo realiza al exterior de su vivienda. Para prevenir afectaciones en la medición ocasionadas por el humo del tabaco, los sensores exteriores fueron colocados a 8 metros de distancia aproximadamente del espacio donde el usuario acostumbra fumar.

Para comprender y facilitar la interpretación de las mediciones, se utilizaron los valores límite establecidos por organismos nacionales e internacionales, los cuales se muestran en la tabla 17, así como los efectos a la salud derivados de la constante exposición a los contaminantes a evaluar.

TE	CONTAMINANTE	DIÓXIDO DE CARBONO (ppm)	FORMALDEHÍDO (mg/m ³)	TVOC (mg/m ³)	PM2.5 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)
BUENA		0 – 600 ppm	0 – 0.1 mg/m ³	0 – 0.6 mg/m ³	>25 µg/m ³	>50 µg/m ³
MODERADA		600 – 1000 ppm			26 – 45 µg/m ³	50 – 150 µg/m ³
INSALUBRE PARA GRUPOS SENSIBLES		1000 – 1500 ppm			46 – 78 µg/m ³	150–250 µg/m ³
INSALUBRE		1500 – 2500 ppm	>0.1 mg/m ³	>0.6 mg/m ³	79 – 147 µg/m ³	250–350 µg/m ³
MUY INSALUBRE		>2500 ppm			147–250 µg/m ³	350–425 µg/m ³
PELIGROSA		>6000 ppm			>250 µg/m ³	>425 µg/m ³
EFFECTOS A LA SALUD (corto plazo)		Dolor de cabeza, dificultad para respirar (a partir de las 300 ppm por mas de una hora de exposición)	Irritación de ojos, nariz y garganta, asma y alergias.	Irritación de ojos y piel.	Dificultad para respirar, irritación de las vías respiratorias y problemas cardiovasculares	

Tabla x. Límites de emisiones de contaminantes del aire. Elaboración propia en base a EPA (s/f) y OMS (2010)

A continuación, se muestran los resultados de la medición de Temperatura de bulbo seco (°C), Humedad Relativa (%), Dióxido de Carbono (ppm), PM2.5 (µg/m³), PM10 (µg/m³), Formaldehído (mg/m³) y Compuestos Orgánicos Volátiles (mg/m³).

4.2.1 MONITOREO DE TEMPERATURA DE BULBO SECO Y HUMEDAD RELATIVA

Durante la prueba, la temperatura exterior mostró una tendencia constante, elevándose desde las 6 horas para comenzar a decrecer entre las 17:00 y 18:00 horas. Se presentó una máxima de 44 °C y una mínima de 17 °C. En lo que respecta a la humedad relativa, el segundo y tercer día se observaron valores sumamente elevados, llegando a una máxima de 79% (figura 15)

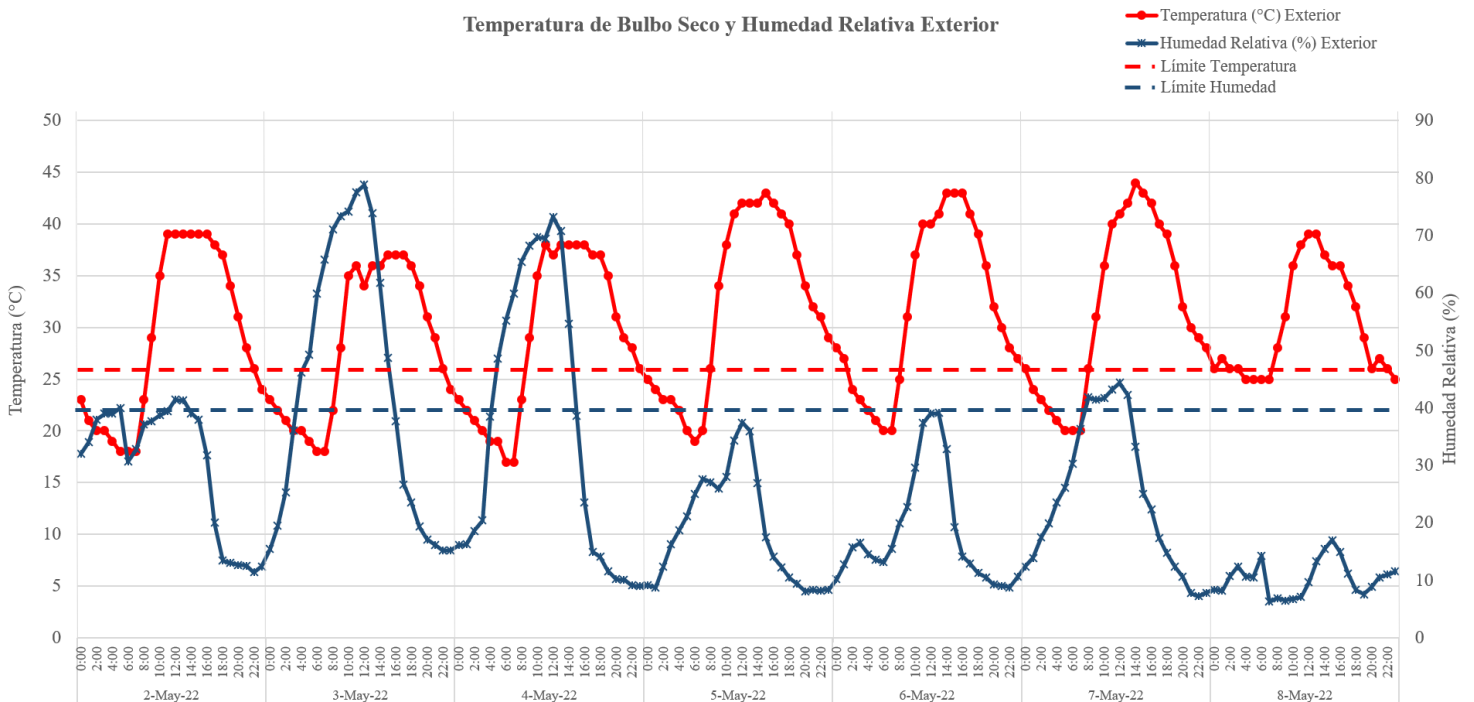


Figura 15. Temperatura de bulbo seco y Humedad Relativa Exterior. Elaboración propia.

En contraste, la temperatura de bulbo seco al interior se mantuvo en un rango entre los 20 y 30 °C, mientras que la humedad relativa presento valores oscilando entre el 30 y el 50%. Sin embargo, es importante recalcar que el aire acondicionado se mantuvo encendido mientras el espacio se encontraba habitado, entre las 6 horas y las 23 horas (figura 16).

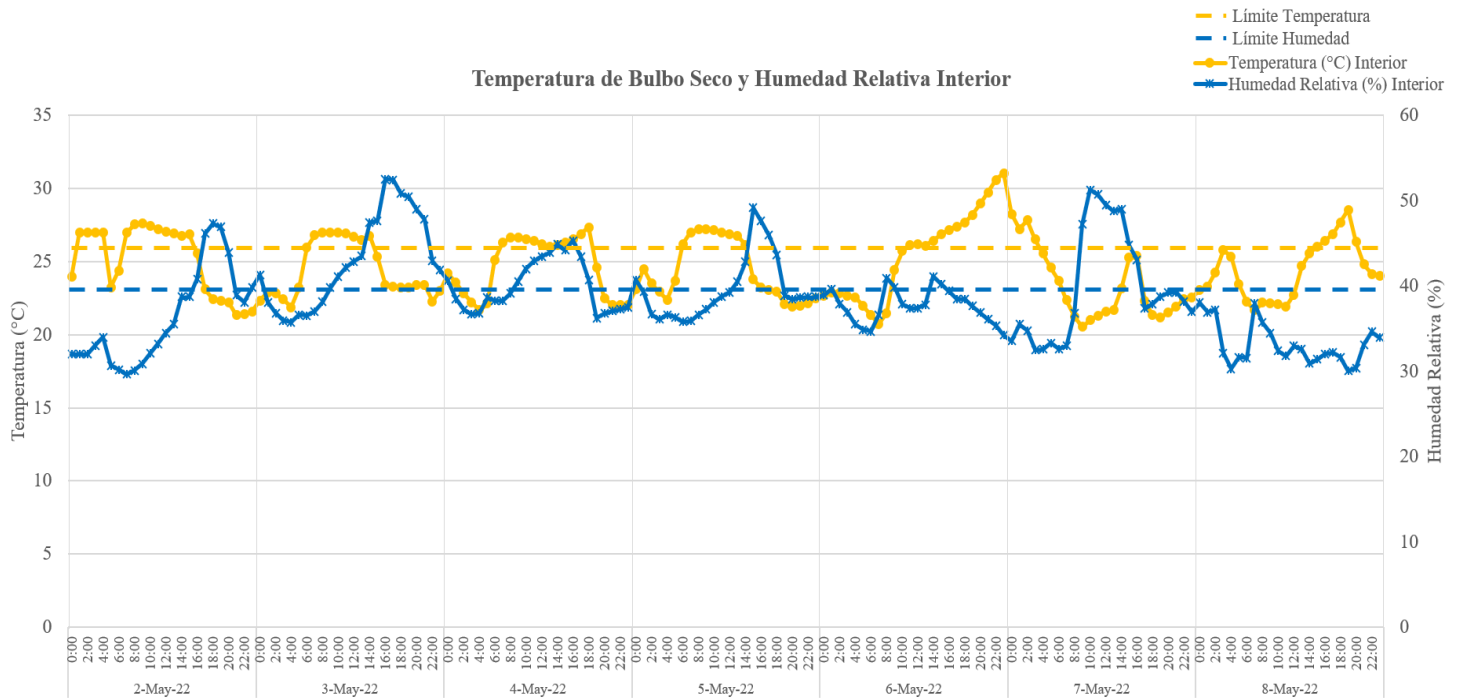


Figura 16. Temperatura de bulbo seco y Humedad Relativa Interior. Elaboración propia.

4.2.2 MONITOREO DE MATERIA PARTICULADA PM10 Y PM2.5

En lo que respecta a las emisiones de materia particulada PM2.5, los niveles en el aire exterior permanecieron dentro de la clasificación de Buena Calidad, con un valor de máximo 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a excepción de la madrugada entre el 04 y 05 de mayo de 2022, con un ligero incremento en las emisiones, alcanzando los 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, clasificando la calidad del aire en moderada. Por el contrario, al interior del espacio se registraron valores de hasta 785 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mas de 3 veces el límite establecido como peligroso por la EPA. Estas emisiones están ligadas directamente a la operación de la estufa sin ventilación de ningún tipo (figura 17).

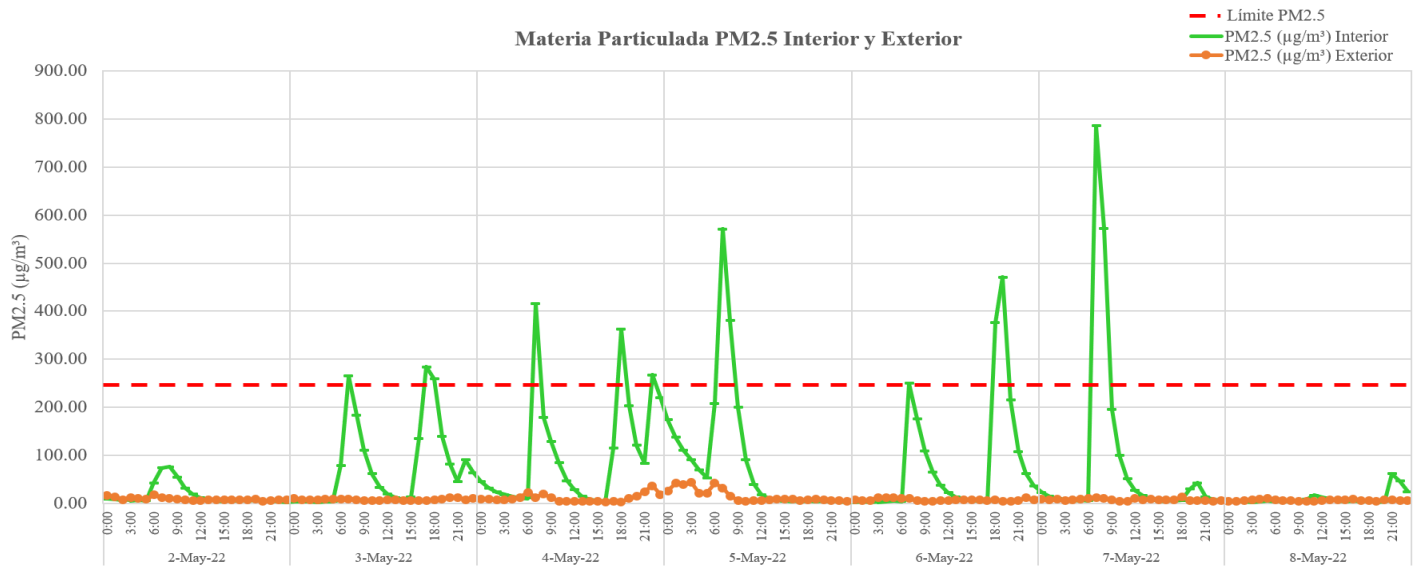


Figura 17. Materia particulada PM2.5 Interior y Exterior. Elaboración propia.

Simultáneamente se observa un comportamiento similar de las emisiones de materia particulada PM10 en el aire interior, ya que al cocinar se alcanzó un valor de hasta 965 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, más del doble del límite clasificado como peligroso por la EPA (figura 18).

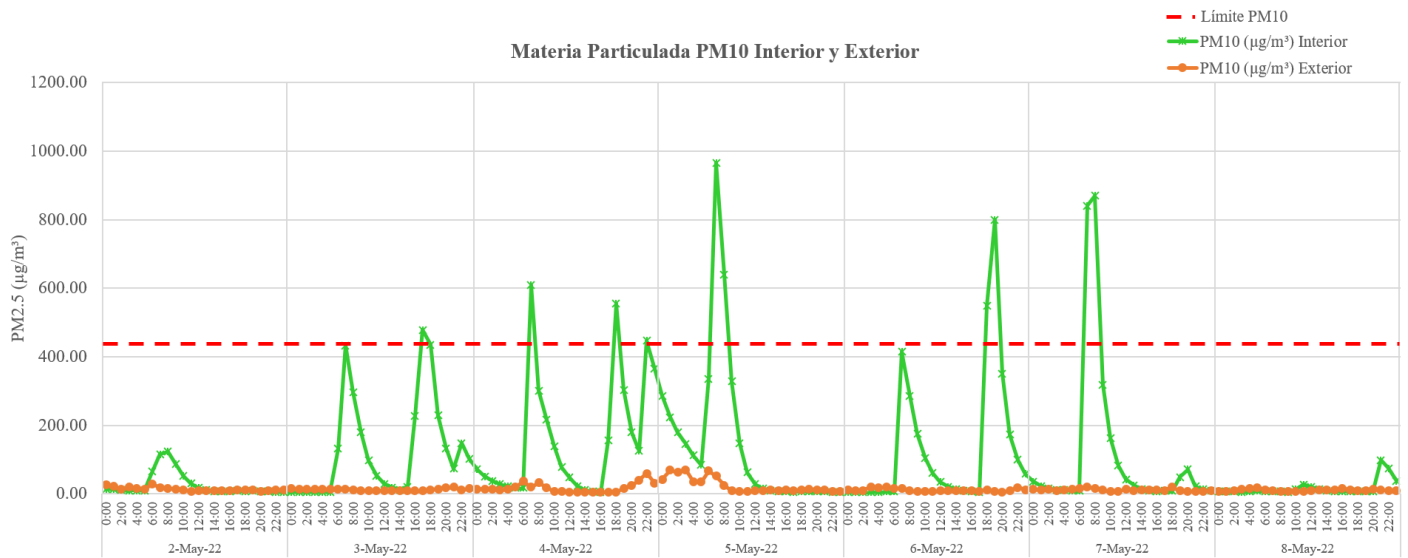


Figura 18. Materia particulada PM10 Interior y Exterior. Elaboración propia.

4.2.3 MONITOREO DE FORMALDEHÍDO Y COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

Por lo que se refiere a las emisiones de formaldehído, el monitoreo exterior señala valores dentro de la clasificación de buena calidad del aire durante el 100% de la prueba. Mientras que el monitoreo interior refleja valores insalubres asociados directamente a la operación de la estufa, con una máxima de 0.25 mg/m^3 (figura 19).

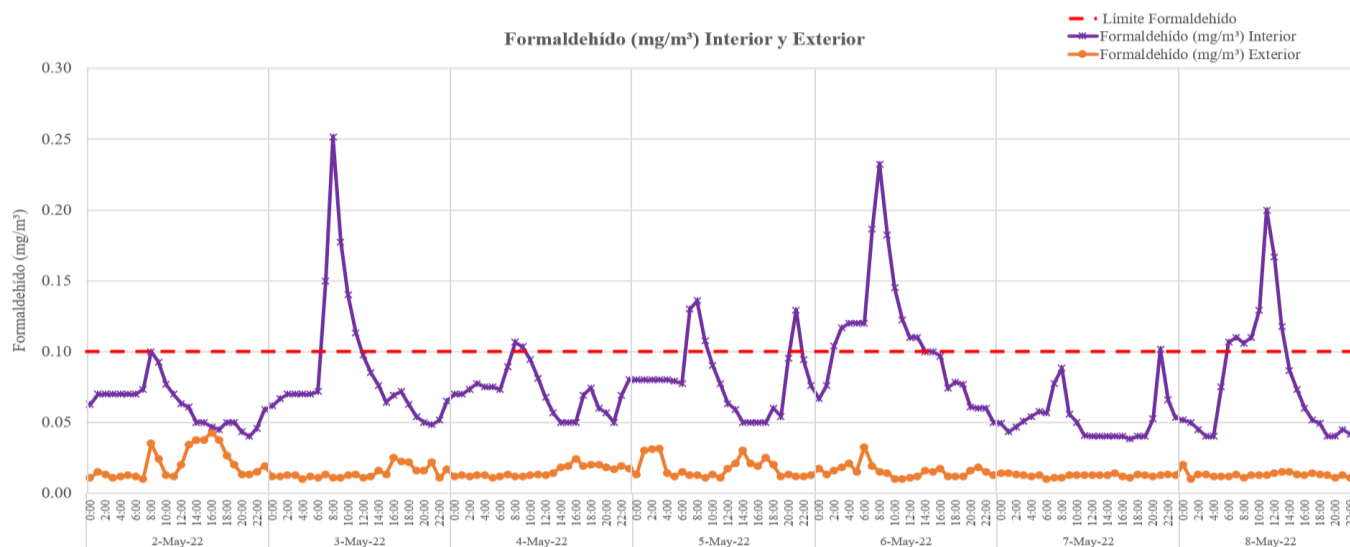
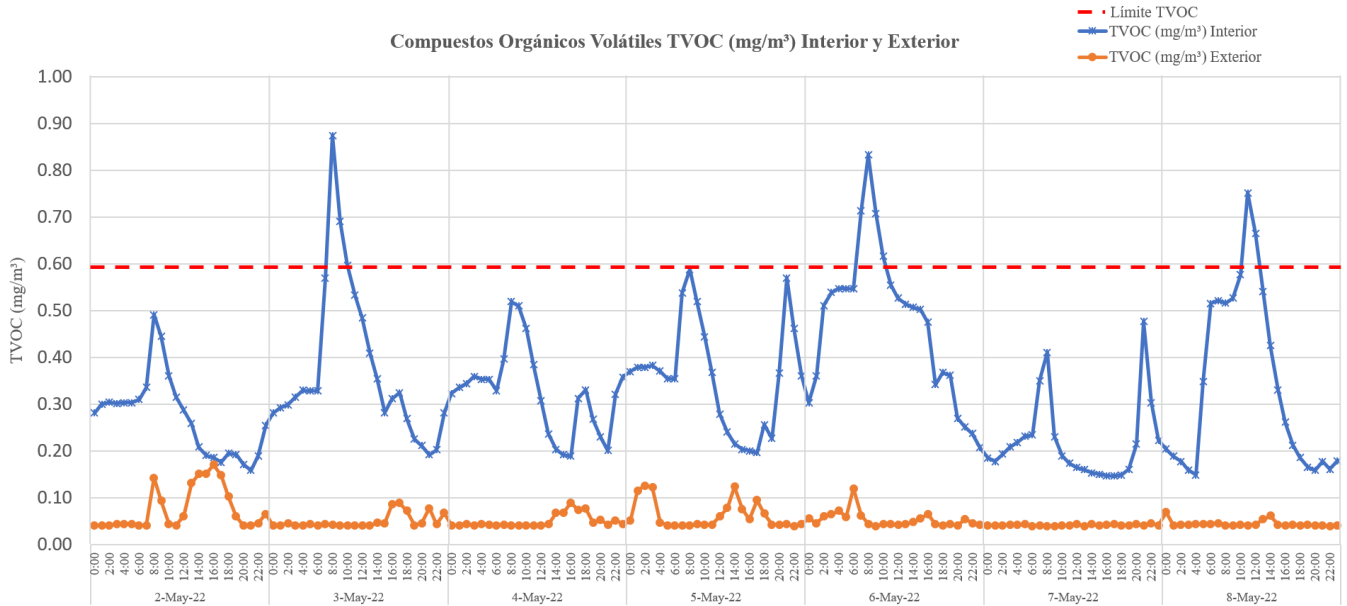


Figura 19. Formaldehído Interior y Exterior. Elaboración propia.

Por otro lado, las emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles en el aire interior permanecieron la mayoría del tiempo dentro de la clasificación buena, a excepción de los valores máximos observados el 3, 6 y 8 de mayo, asociados a la operación de la estufa. Se registró una máxima de 0.87 mg/m^3 y, al igual que con el formaldehído, transcurridas 2 horas después de cocinar, los valores disminuyen hasta volver a valores de buena calidad (figura 20).



4.2.4 MONITOREO DE DIÓXIDO DE CARBONO

A su vez, los niveles de dióxido de carbono en el aire exterior permanecieron por debajo de las 500 ppm, obteniendo el indicador de buena calidad del aire durante todo el periodo de monitoreo. Sin embargo, al interior, la mayor parte del tiempo los valores permanecieron arriba de las 1000ppm, con una máxima de 2942 ppm, aproximadamente 3 veces el límite establecido por la ASHRAE (figura 21)

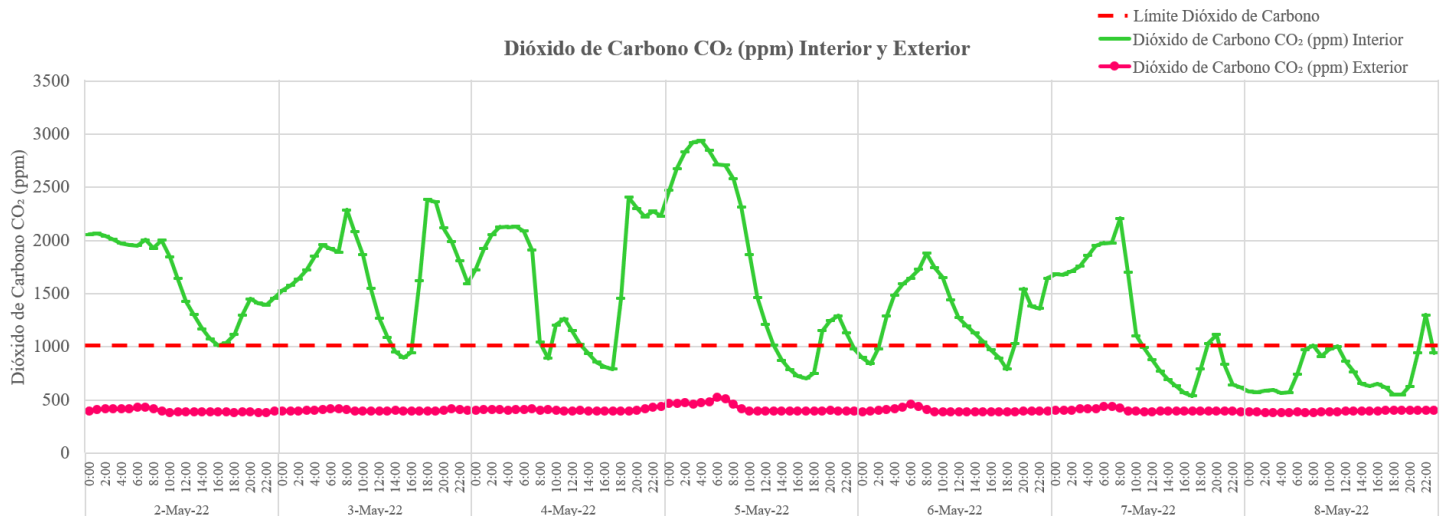


Figura 21. Dióxido de Carbono Interior y Exterior. Elaboración propia.

4.2.4 MONITOREO EN DÍA TIPO

Como se muestra en la figura 22, las emisiones al interior de los espacios están asociadas directamente a la operación de la estufa y la preparación de alimentos. Sin embargo, podemos observar que, no todos los contaminantes se disuelven con la misma rapidez. Aproximadamente dos horas después de cocinar la materia particulada PM10 y PM2.5 regresa a valores por debajo de la máxima, mientras que el formaldehído demora aproximadamente 5 horas.

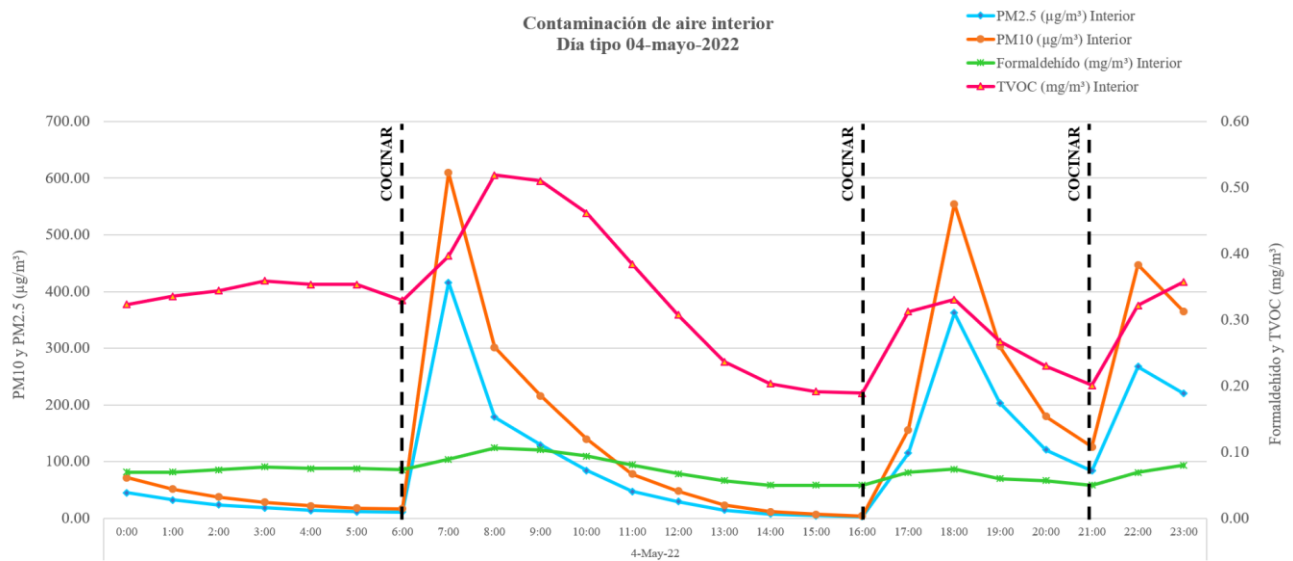


Figura 22. Contaminación del aire interior en día tipo. Elaboración propia

5. CONCLUSIONES PRUEBA PILOTO

De acuerdo a los resultados obtenidos del monitoreo piloto comprendido entre el 02 y el 08 de mayo del 2022 en el caso de estudio designado para esta investigación, se establecen las siguientes conclusiones.

Cocinar es la actividad que genera el mayor impacto negativo a la calidad del aire en los espacios interiores, incluso hasta dos horas después de concluir la actividad. Durante el monitoreo se observó que al cocinar a la plancha las emisiones de materia particulada alcanzan valores entre los 250 y 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2.5 y valores entre los 400 y 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10. Sin embargo, al freír alimentos, estos valores se incrementan notablemente, alcanzando valores máximos de 785 y 965 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

Por lo que respecta al formaldehído, sus emisiones también se encuentran asociadas directamente a la combustión en cocinas y a la carente ventilación del espacio. En promedio, y al igual que la materia particulada, transcurren aproximadamente dos horas para que su concentración disminuya a valores saludables.

A su vez, las emisiones de compuestos orgánicos volátiles están asociadas a la utilización de productos de limpieza, sin embargo, podemos observar que, aunque se muestra un incremento, los niveles de TVOC en el aire interior, los valores registrados permanecieron por debajo del límite establecido por la EPA la mayor parte del tiempo.

Para terminar, las emisiones de dióxido de carbono son atribuibles en su mayoría a la respiración de los habitantes en el espacio. Los resultados denotan como a las 8 horas, la concentración comienza a decrecer diariamente, ya que en ese horario el espacio solo es habitado por una sola persona y las dos mascotas. Mientras que, entre las 16 y 18 horas, cuando el espacio es habitado por los dos adultos, los niveles se muestran al alza. Cabe mencionar que, el usuario reportó fumar habitualmente y que este incremento también puede estar asociado al humo de segunda y tercera mano.

Es importante recalcar que durante el monitoreo la ventilación del espacio fue mínima, la cocina no cuenta con un sistema de extracción y las ventanas permanecieron cerradas debido a la operación constante del sistema de aire acondicionado.

Estos resultados denotan y enfatizan la necesidad de la reforma de la reglamentación vigente pertinente al diseño y aprobación de prototipos de vivienda en serie de la región. La ventilación mecánica en cocinas es indispensable para garantizar el bienestar integral de los habitantes de vivienda de cualquier tipología, sobre todo en aquellas diseñadas con los mínimos reglamentarios, como son las viviendas de interés social.

4. RESULTADOS

El siguiente capítulo presenta los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología previamente descrita; estos se dividieron en tres secciones: aplicación de encuesta, monitoreo ambiental y simulación de calidad del aire.

4.1 ENCUESTA

La encuesta se aplicó a una población finita comprendida por habitantes de viviendas de interés social ubicadas en la ciudad de Mexicali, Baja California. La ficha técnica del estudio aparece en la tabla 18.

Universo	Créditos de vivienda otorgados por INFONAVIT en la ciudad de Mexicali entre 2005 y 2019 (100,215 créditos)
Contexto geográfico	Mexicali, Baja California
Diseño de cuestionario	Elaboración propia
Tamaño muestral	60 cuestionarios
Procedimiento de muestreo	Aplicación de cuestionario en formato físico y en línea
Realización de trabajo de campo	Elaboración propia
Fecha de realización	abril 2022 - agosto 2022
Análisis y elaboración de informes	Elaboración propia

Tabla 18. Ficha técnica de encuesta. Elaboración propia

El muestreo se capturó digitalmente en el programa de cómputo Microsoft Excel; para el tratamiento de los datos se emplearon técnicas de estadística descriptiva y se seleccionaron gráficas de pastel y de barras como figuras de representación de los resultados.

Para facilitar la interpretación de la información proveniente de la aplicación de la encuesta, los resultados se clasificaron de la siguiente forma: análisis del usuario, análisis de sistemas de ventilación en la vivienda y hábitos de los usuarios.

4.1.1 ANÁLISIS DEL USUARIO

Con el objetivo de identificar la dimensión poblacional con alto grado de vulnerabilidad a la contaminación del aire interior en viviendas; la pregunta 1 del anexo 1 cuestionó a la muestra si alguno de los habitantes de su vivienda padece una enfermedad respiratoria.

Como se muestra en la figura 23, el 40.6% de los encuestados respondieron afirmativamente, mientras que el 59.6% restante indicó que no. De acuerdo a lo indicado por la OMS (2010), las personas con padecimientos respiratorios, infantes y ancianos son la población mas vulnerable a los efectos de la contaminación del aire interior y, si bien, no se puede atribuir directamente a la calidad del aire interior como la causa de las enfermedades respiratorias agudas, ISESALUD (2015) la identifica como uno de los principales factores de riesgo en Baja California.

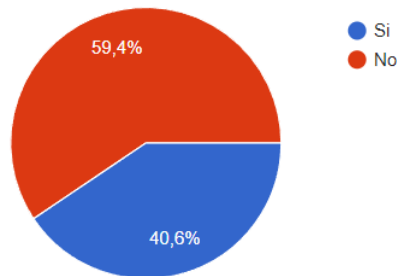


Figura 23. Habitantes de viviendas con enfermedades respiratorias. Elaboración propia.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) en su guía de calidad del aire interior (2008) identifica al humo del tabaco como uno de los principales contaminantes del aire interior. Es por ellos que la pregunta 2 del anexo 1 hace referencia a las emisiones de esta índole. El 44.9% de la muestra manifestó que algún habitante de su vivienda fuma de manera habitual; el 55.1% respondió de manera negativa (figura 24).

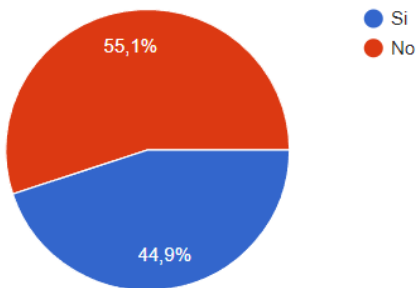


Figura 24. Habitantes de viviendas que fuman habitualmente. Elaboración propia.

De manera correlacional a la pregunta anterior; para identificar la exposición de los habitantes a humo de segunda mano; se cuestionó a la muestra si habitualmente fuman al interior de su vivienda. Los resultados, representados en la figura 29, destacan que el 32.3% de los habitantes fuman al interior de la vivienda, mientras que el 67.7% opta por fumar al exterior. Esto es alarmante ya que la exposición al humo de segunda mano se encuentra en el grupo 1 de la clasificación de cancerígenos de la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (Carreras et al., 2019).

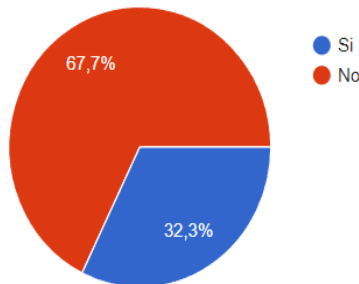


Figura 29. Habitantes que fuman al interior de la vivienda. Elaboración propia.

4.1.2 VENTILACIÓN EN LA VIVIENDA

Esta sección del cuestionario recolectó información referente a la implementación de sistemas de ventilación mecánica en la vivienda. La ASHRAE, en su norma 62.2-2019 de Ventilación y Calidad del aire interior en edificios residenciales, estipula que la instalación de sistemas de extracción en cocinas y baños es obligatoria; sin embargo, la normativa regional aplicable al diseño de viviendas en Baja California solo indica como obligatoria su instalación en espacios no habitables sin ventilación natural.

Como se muestra en la figura 30, para la pregunta 4 del anexo 1, el 73.9% de los encuestados indicó que no cuenta con un sistema de extracción mecánica de aire en cocina; solo el 26.1% contestó afirmativamente.

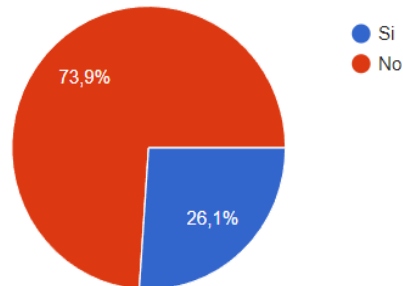


Figura 30. Sistemas de extracción mecánica en cocina. Elaboración propia.

Así mismo, se cuestionó a la muestra sobre la instalación de este tipo de sistemas en baños. De igual manera, el 73.9% señaló que no se integra ningún sistema de extracción mecánica de aire en el baño de su vivienda (figura 31).

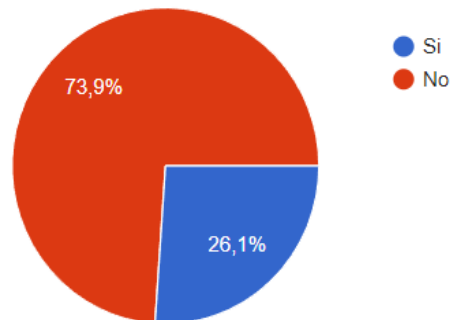


Figura 31. Sistemas de extracción mecánica en baño. Elaboración propia.

Una de las mejores estrategias para disminuir la contaminación del aire interior, alternativa a los sistemas de extracción y ventilación mecánica, es la implementación de purificadores de aire. Cheek et al. (2021) comprobaron su eficiencia ante las emisiones de materia particulada PM2.5 en las viviendas. Sin embargo, la interrogante 6 del cuestionario, como se muestra en la figura 32; destaca mayormente que el 99.3% de los encuestados no cuenta con purificadores de aire en su vivienda.

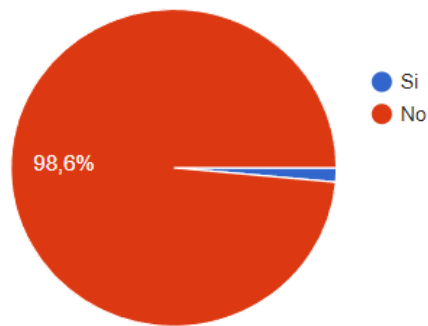


Figura 32. Purificadores de aire en la vivienda. Elaboración propia.

Finalmente se indagó sobre los sistemas de aire acondicionado, con el objetivo de relacionar los resultados con la estratificación de aire y los cambios de aire por hora. El mayor porcentaje de la muestra (91.3%) reportó utilizar aires acondicionados tipo Mini Split; el 8.7% equipos de ventana y ninguno de los encuestados indicó emplear coolers (Figura 33). El uso de los sistemas de aire acondicionado tipo mini Split y de ventana disminuyen la calidad del aire interior, ya que reducen los cambios de aire por hora, debido a que recirculan el aire interior, en lugar de introducir aire exterior (Cheung y Jim, 2019).

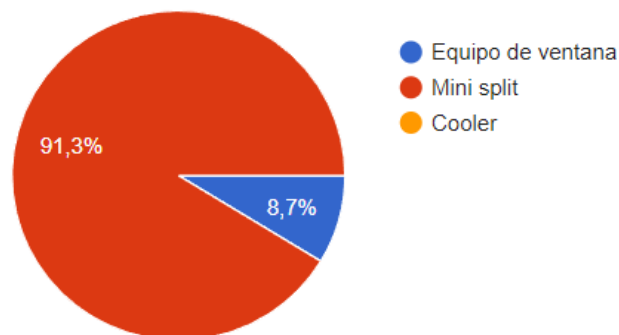


Figura 33. Sistemas de aire acondicionado utilizados en la vivienda. Elaboración propia.

4.1.3 HÁBITOS DE LOS USUARIOS

La tercera parte de la encuesta analizó la influencia de las actividades realizadas por los usuarios a la calidad del aire interior de sus viviendas. De acuerdo a lo mencionado por José, Pérez y Gonzalez-Barras (2020), cocinar es la actividad que más deteriora la calidad del aire, ya que la combustión en estufas es fuente de formaldehído, dióxido de carbono y materia particulada. La pregunta 8 del anexo 1 analiza el método

de ventilación preferente de los usuarios al cocinar. Los resultados señalan que la mayor parte de la muestra cocina sin ventilación de ningún tipo (37.7%), el 36.2% solo ventila el espacio cuando detecta humo y solo el 26.1% de los encuestados mantiene ventilado el espacio durante todo el proceso (figura 34).

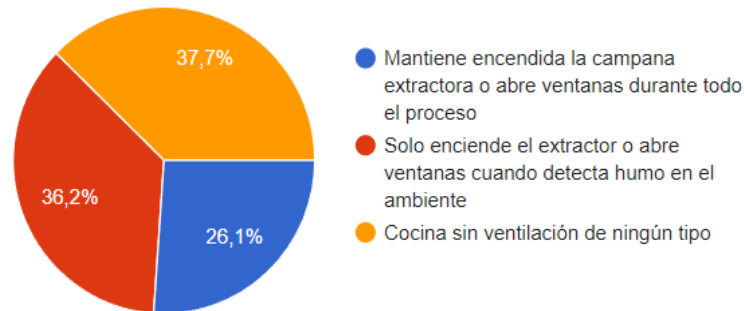


Figura 34. Ventilación al cocinar en la vivienda. Elaboración propia.

A su vez, otra de las principales fuentes de contaminación del aire interior en la vivienda proviene de la utilización de productos de limpieza. Carslaw y Shaw (2022) recomiendan realizar la limpieza en la mañana, debido a que esas emisiones de contaminantes reaccionan al ozono, que, en las zonas urbanas su concentración es generalmente más alta por las noches. Los resultados de la pregunta 8 del anexo 1 indican que el 49.3% de la muestra realiza la limpieza durante la mañana, el 36.2% por la tarde y solo el 14.5% durante la noche, por lo que el riesgo de reacción al ozono es mínimo (figura 35).

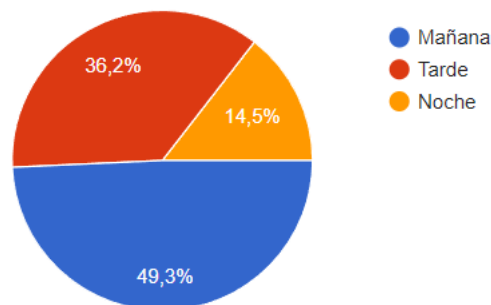


Figura 35. Horario preferencial para realizar la limpieza de la vivienda. Elaboración propia.

Así mismo, se cuestionó a los encuestados acerca del método de ventilación que utilizan al realizar la limpieza de la vivienda. A diferencia de la ventilación al cocinar, la mayor parte de la muestra (65.2%) indicó que al limpiar mantiene encendidos los sistemas de ventilación natural y mecánica, mientras que el 34.8% realiza la limpieza sin ventilación de ningún tipo (figura 36).

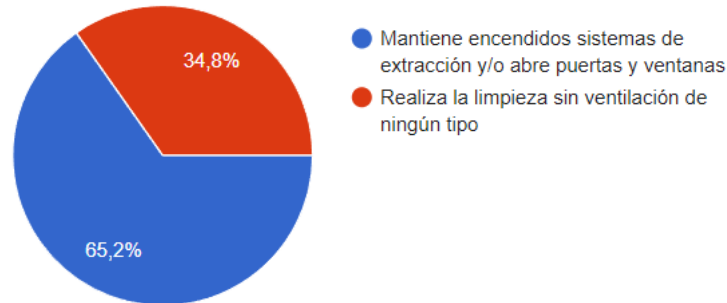


Figura 36. Ventilación al realizar la limpieza de la vivienda. Elaboración propia.

Continuando con las emisiones expeditas por los productos de limpieza, Carslaw y Shaw (2022) aconsejan no utilizar productos con fragancia de pino, ya que estos liberan altas emisiones de materia particulada; mientras que los de olor limón producen nitrato. Así mismo, no es recomendable mezclarlos, ya que su reacción libera formaldehído. La pregunta 10 del cuestionario solicitó a los encuestados indicar que tipo de productos utilizan para limpiar su vivienda; el 52.2% señaló utilizar productos con fragancia de limón, mientras que el 60.9% utiliza fragancia de pino (figura 37).

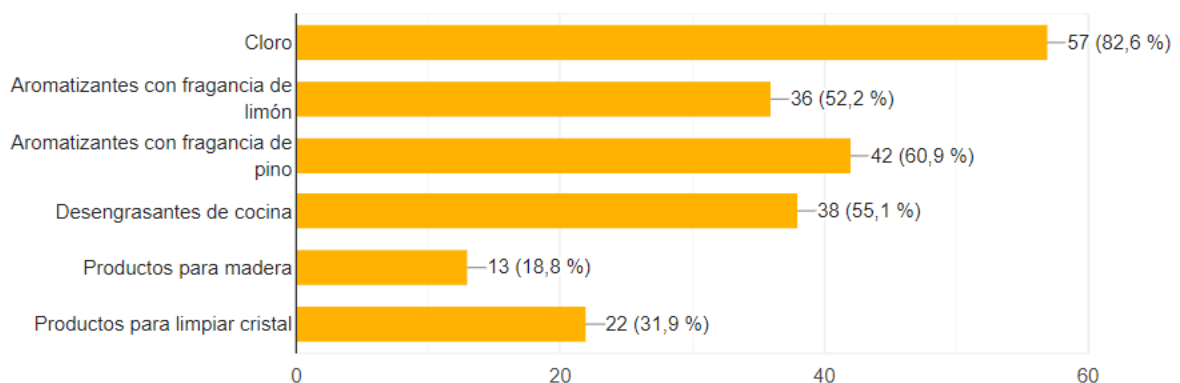


Figura 37. Productos utilizados para la limpieza de la vivienda. Elaboración propia.

La última sección del cuestionario se enfocó en las fuentes de alérgenos; primeramente, se cuestionó a los encuestados acerca de las mascotas, haciendo hincapié en aquellas que no habitan contenedores cerrados. Como se muestra en la figura 38, el 58% de la muestra indicó que las mascotas habitan al interior de sus viviendas y el 42% las mantiene al exterior. Esto se atribuye mayormente a las altas temperaturas de la región, que pueden afectar al bienestar de las mascotas.

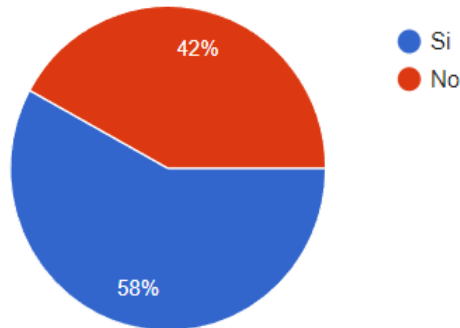


Figura 38. Viviendas con mascotas habitando al interior. Elaboración propia.

Por su parte, para examinar la problemática ocasionada por la presencia de ácaros en las superficies textiles, se preguntó a la muestra con que frecuencia lavan la ropa de cama. El 65.2% señaló que realiza la limpieza cada dos semanas; el 27.5% cada uno o dos meses y el 7.2% cada seis meses o mas (Figura 39). Los ácaros colonizan mayormente los colchones, alfombras y superficies textiles. Entre sus efectos a la salud se encuentran las alergias. Se recomienda lavar la ropa de cama cada 2 semanas con agua caliente y reducir la humedad a menos del 50% para disminuir la proliferación (Seguel, Merrill, Seguel y Campagna, 2017).

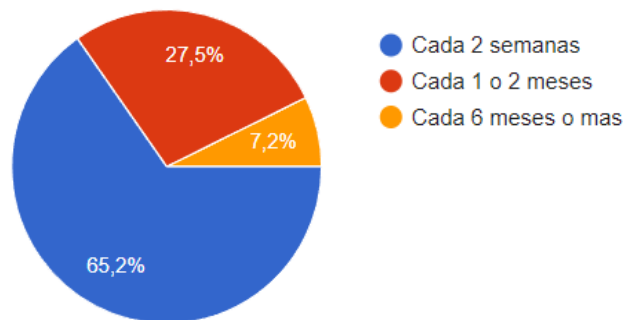


Figura 39. Frecuencia de lavado de ropa de cama. Elaboración propia.

Para finalizar y continuando con el análisis de superficies textiles, la muestra de encuestados reveló que solo el 15.9% cuenta con alfombrado en algún espacio de la vivienda (Figura 40).

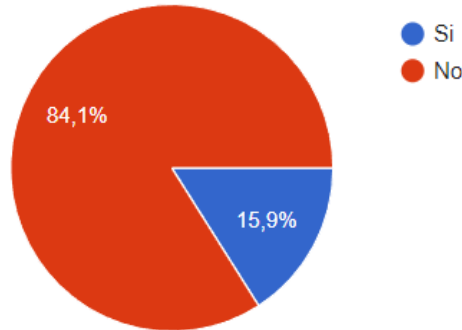


Figura 40. Alfombrado en vivienda. Elaboración propia.

4.2 MONITOREO AMBIENTAL

El monitoreo ambiental se efectuó en dos periodos, seleccionados de acuerdo a la estadística de emisiones de contaminantes ambientales reportados por la Fundación para la Investigación de Calidad del Aire en su Informe sobre calidad del aire en Mexicali durante 2020.

El primer periodo comprendió la etapa del año con mejor calidad del aire, del 11 de julio al 07 de agosto de 2022. Este a su vez se dividió en dos fases de monitoreo; con el caso de estudio deshabitado los primeros 14 días y con la vivienda habitada los 14 días restantes.

El segundo periodo integra los días identificados con la mayor concentración anual de contaminantes ambientales; del 19 de diciembre de 2022 al 15 de enero de 2023. Así mismo, se dividió en las dos fases anteriormente mencionadas, de 14 días respectivamente.

Se monitorearon variables de calidad del aire: dióxido de carbono (ppm), formaldehído (mg/m^3), materia particulada PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y compuestos orgánico volátiles (mg/m^3), así como variables de habitabilidad térmica: Temperatura de Bulbo Seco ($^{\circ}\text{C}$) y Humedad Relativa (%). Para la medición, tanto en el aire interior como exterior, se colocaron 15 registradores de datos, distribuidos en los diferentes espacios de la vivienda, como muestra la figura 41.

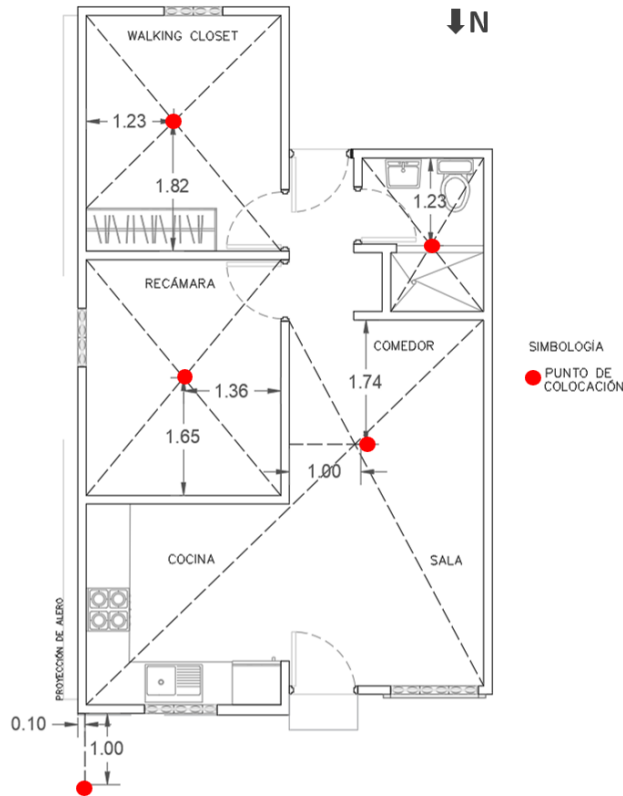


Figura 41. Ubicación de instrumentos a utilizados durante el monitoreo ambiental. Elaboración propia

Se recolectaron muestras de cada una de las variables, cada 5 minutos durante las 1344 horas que comprendió el monitoreo; a excepción del dióxido de carbono, cuya muestra fue un promedio horario.

Para la protección del equipo colocado para las mediciones al exterior del caso de estudio se colocó una cubierta de radiación solar (figura 42). Se seleccionó el propileno como material de dicha cubierta para prevenir puentes térmicos que pudieran alterar las mediciones, y para prevenir emisiones de formaldehído (ISO, 2004). Se realizaron

orificios en todas las caras de la cubierta para garantizar el flujo de aire, sin embargo, el día 25 de julio, se añadió un plástico traslucido para proteger el equipo de la lluvia, entre las 7:00 y 12:00 horas (Figura 43).



Figura 42. Cubierta de radiación solar. Elaboración propia ante



Figura 43. Protección de sensores exteriores ligeras lluvias. Elaboración propia

A su vez, para que la colocación de los registradores de datos al interior, se diseñaron unas bases que no obstaculizaran a los usuarios y les permitieran realizar sus actividades cotidianas, pero que a su vez protegieran el equipo de las mascotas. Como se muestra en la figura 44, se seleccionó el cartón como el material, por su baja conductividad térmica y para prevenir emisiones de formaldehído que pudieran intervenir con el muestreo (ISO, 2004).



Figura 44. Base para colocación de sensores al interior de la vivienda. Elaboración propia

4.2.1 MONITOREO DE VERANO

Durante la primera fase del monitoreo de verano, correspondiente a la vivienda deshabitada, se pudo observar que las temperaturas del armario y el baño presentaron las temperaturas de bulbo seco más elevadas, alcanzando valores de hasta 37.6 °C y 35.9 °C respectivamente. Esto es atribuible a que estos espacios se encuentran orientados hacia la fachada sur, que, a pesar de sufrir un asoleamiento elevado, no cuenta con ningún sistema de aislamiento térmico (Figura 45).

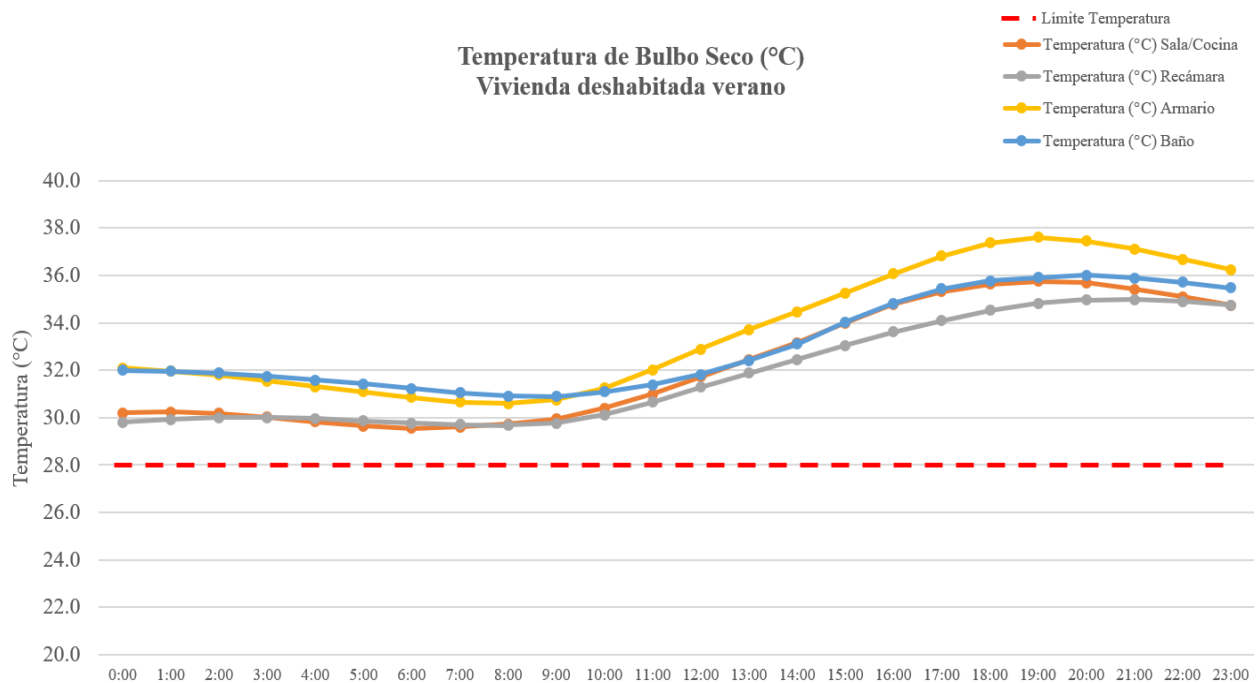


Figura 45. Temperatura de Bulbo Seco (°C) Vivienda deshabitada verano. Elaboración propia

Así mismo, los niveles del porcentaje de humedad relativa (%) se encontraron por arriba del límite establecido por ASHRAE en todos los espacios de la vivienda. Como muestra la figura 46. los niveles más altos de humedad relativa con la vivienda deshabitada se presentaron en el baño, alcanzando un nivel máximo de hasta el 50.1%. De igual manera, esto es atribuible a las altas temperaturas registradas por la orientación del espacio y la falta de aislamiento térmico en muros.

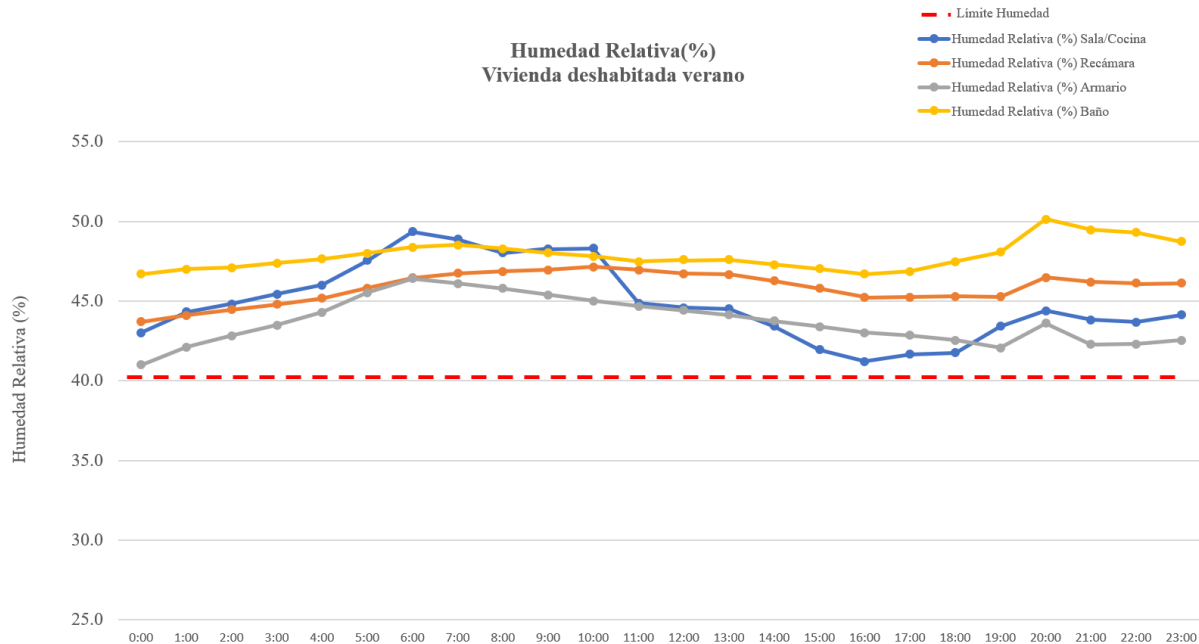


Figura 46. Humedad Relativa (%) Vivienda deshabitada verano. Elaboración propia

Por lo que respecta a las concentraciones de materia particulada PM10 y PM2.5, se observó que, cuando la vivienda se encuentra deshabitada en verano, las concentraciones permanecen muy por debajo del límite establecido por la EPA. Es importante recalcar que esta temporada de monitoreo se presenta la mejor calidad del aire exterior, que es un factor crítico a tomar en consideración.

No obstante, los niveles de formaldehído registrados en la vivienda desocupada en verano se encuentran en niveles superiores a 0.10 mg/m³, clasificados por la EPA como insalubres. Como se muestra en la figura 47, el baño y armario fueron los espacios con la mayor concentración de formaldehído, donde permaneció hasta 8 horas en valores superiores al límite de calidad del aire.

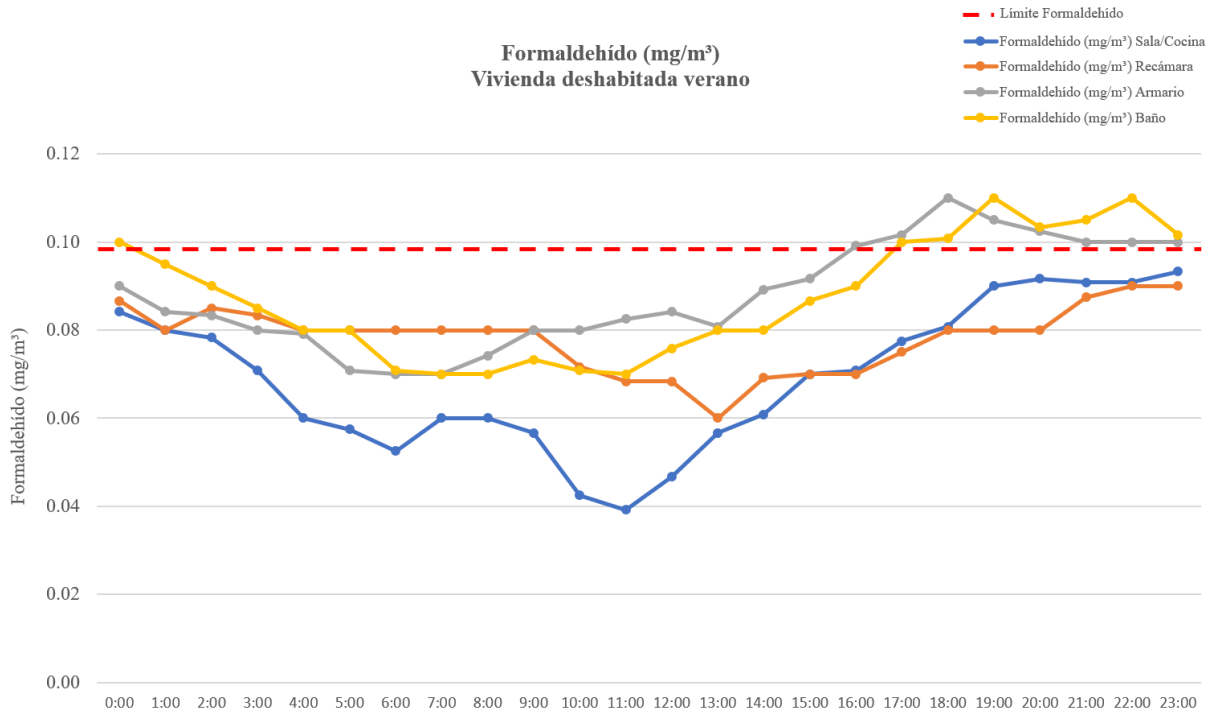


Figura 47. Formaldehído (mg/m³) Vivienda deshabitada verano. Elaboración propia

Estas elevadas concentraciones de formaldehído se atribuyen a la relación directa del contaminante con la temperatura ambiental del espacio. La figura 48. muestra como al elevarse la temperatura de bulbo seco, los niveles de formaldehído comienzan a incrementarse.

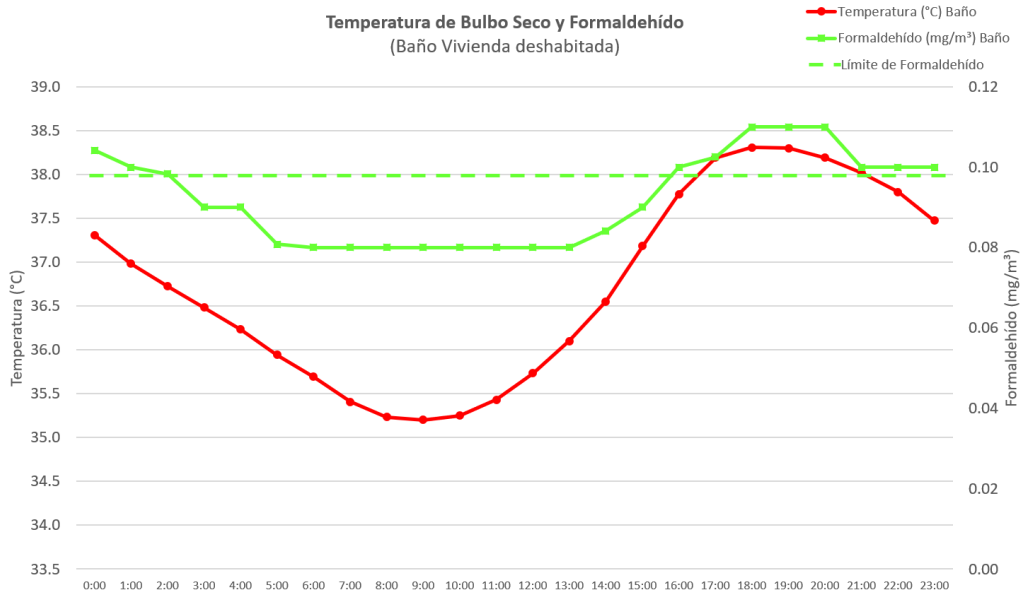


Figura 48. Relación del Formaldehído (mg/m³) y la Temperatura de bulbo seco (°C) Vivienda deshabitada verano. Elaboración propia.

En cuanto a las emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles, están fuertemente asociadas a los materiales de construcción y revestimientos. Se analizaron las concentraciones en todos los espacios de la vivienda deshabitada, comprobando que, aunque ninguno sobrepasa los límites de salubridad, los valores son hasta 5 veces mayores al interior que al exterior. Como se muestra en la Figura 49, el espacio con la mayor concentración de TVOC fue el baño, atribuible a su reducido volumen de aire y carente ventilación natural.

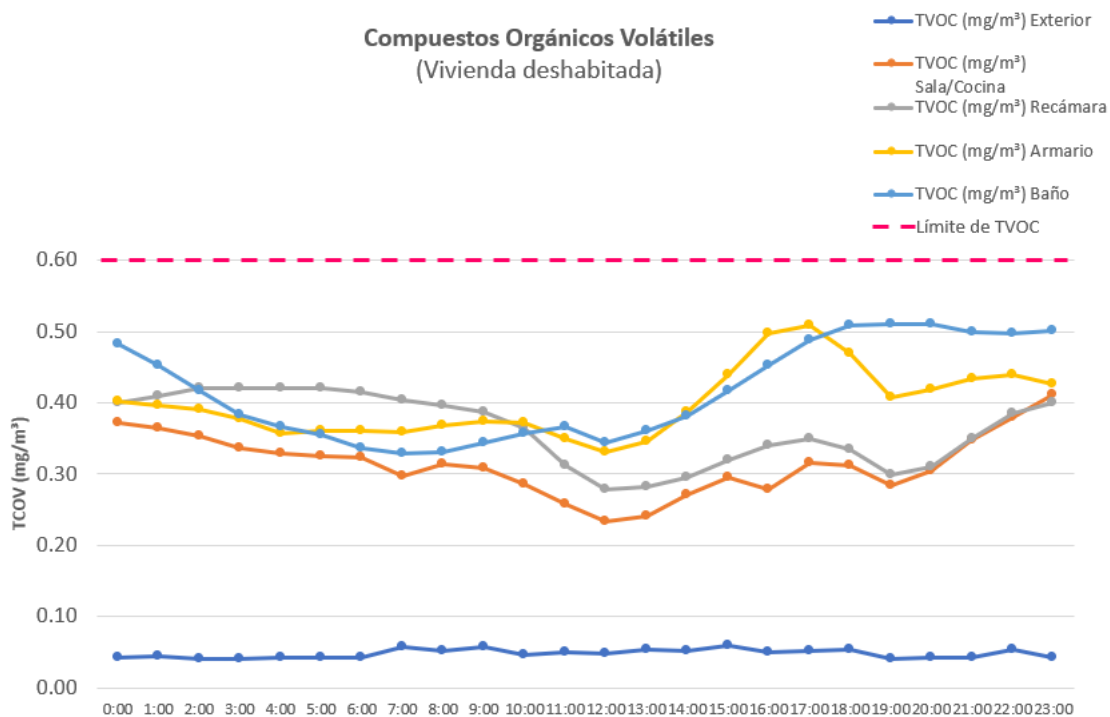


Figura 49. Compuestos Orgánicos Volátiles (mg/m³) Vivienda deshabitada verano. Elaboración propia

Por lo que respecta a las emisiones de contaminantes cuando la vivienda se encuentra habitada, se confirmó que la actividad que más deteriora la calidad del aire interior es la combustión en cocinas. La Figura 50. muestra los niveles de materia particulada PM₁₀ y PM_{2.5} al cocinar; se puede observar cómo se registró una máxima de 909 µg/m³ y 579 µg/m³ respectivamente. Estos niveles alarmantes de materia particulada se imputan a la falta de ventilación en la cocina y a la operación constante del sistema de aire acondicionado tipo mini Split.

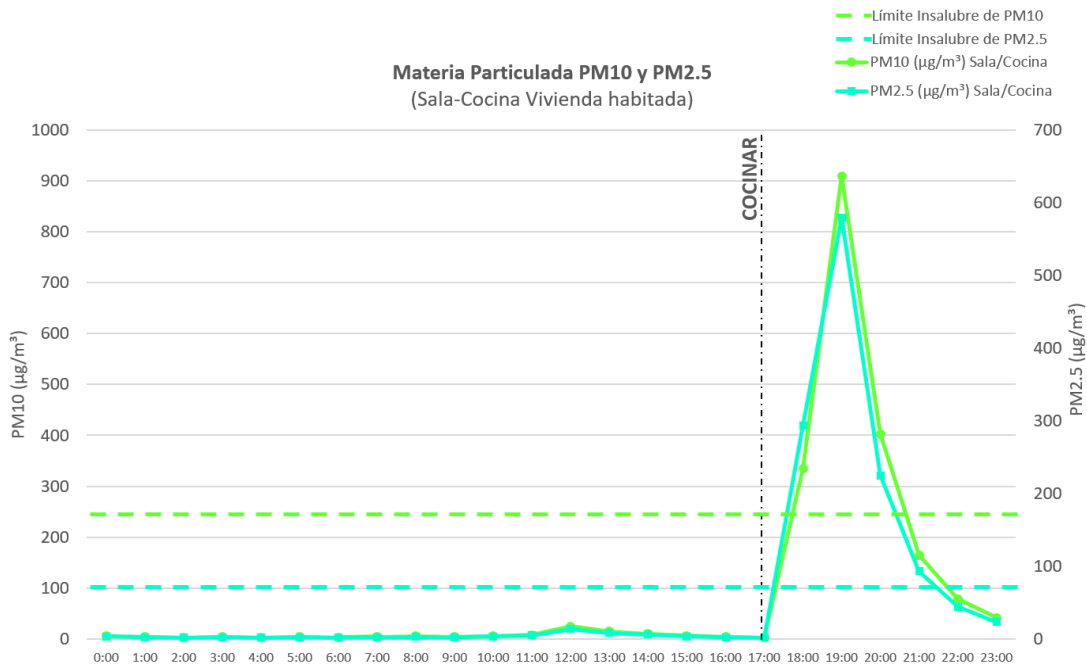


Figura 50. Materia particulada PM10 y PM2.5 al cocinar. Vivienda en verano. Elaboración propia.

A su vez, la figura 51. muestra cómo, aunque la fuente emisora se encuentra en la cocina; el flujo de aire interno en la vivienda ocasiona que la contaminación se infiltre en los demás espacios, concentrándose mayormente en la recámara y el armario.

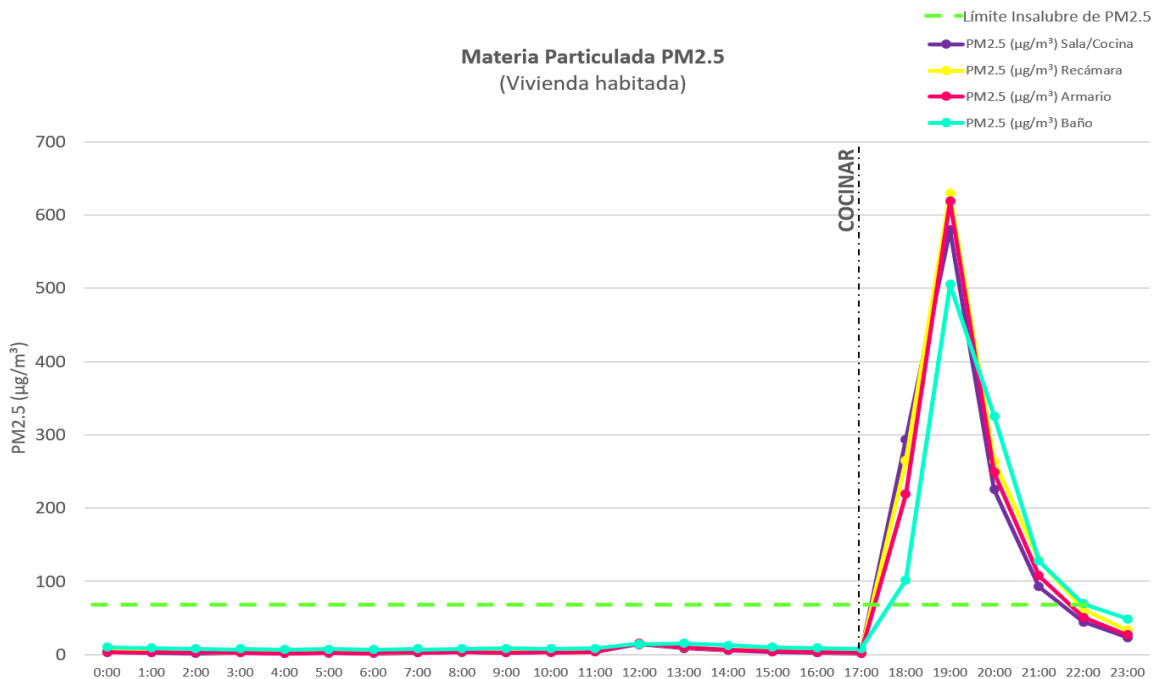


Figura 51. Materia particulada PM10 y PM2.5 al cocinar, infiltración a diferentes espacios. Vivienda en verano. Elaboración propia

Otro factor importante durante el verano es la operación del aire acondicionado, la figura 52. muestra como mientras el aire acondicionado se encuentra encendido en la recámara, los niveles de formaldehído en el aire se mantienen por debajo del límite establecido por la EPA. Sin embargo, una vez interrumpida su operación, se alcanzan niveles mas de tres veces por arriba del nivel recomendado.

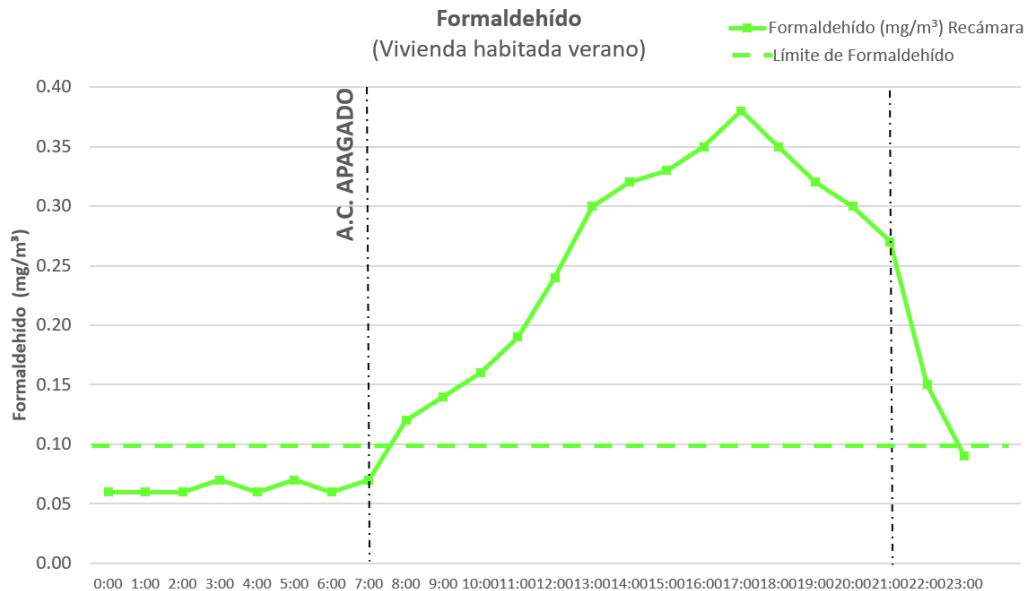


Figura 52. Formaldehído en la recámara habitada. Vivienda en verano. Elaboración propia

Aunque es un caso aislado, el día 21 de julio de 2022 se realizó un asado en el patio norte del caso del estudio, esto permitió analizar la infiltración de contaminantes ante la presencia de una fuente emisora fija. Al examinar los niveles registrados, se puede observar como el formaldehído se concentró mayormente en el baño, donde se alcanzó un valor máximo de 0.68 mg/m³, casi 7 veces por arriba del límite establecido por la EPA como seguro y le tomó aproximadamente 16 horas en disminuir a niveles aceptables. Nuevamente atribuible a las altas temperaturas, en conjunción a que el baño es el espacio con el menor volumen de aire, derivado de sus reducidas dimensiones, además de no contar con ventilación natural (figura 53).

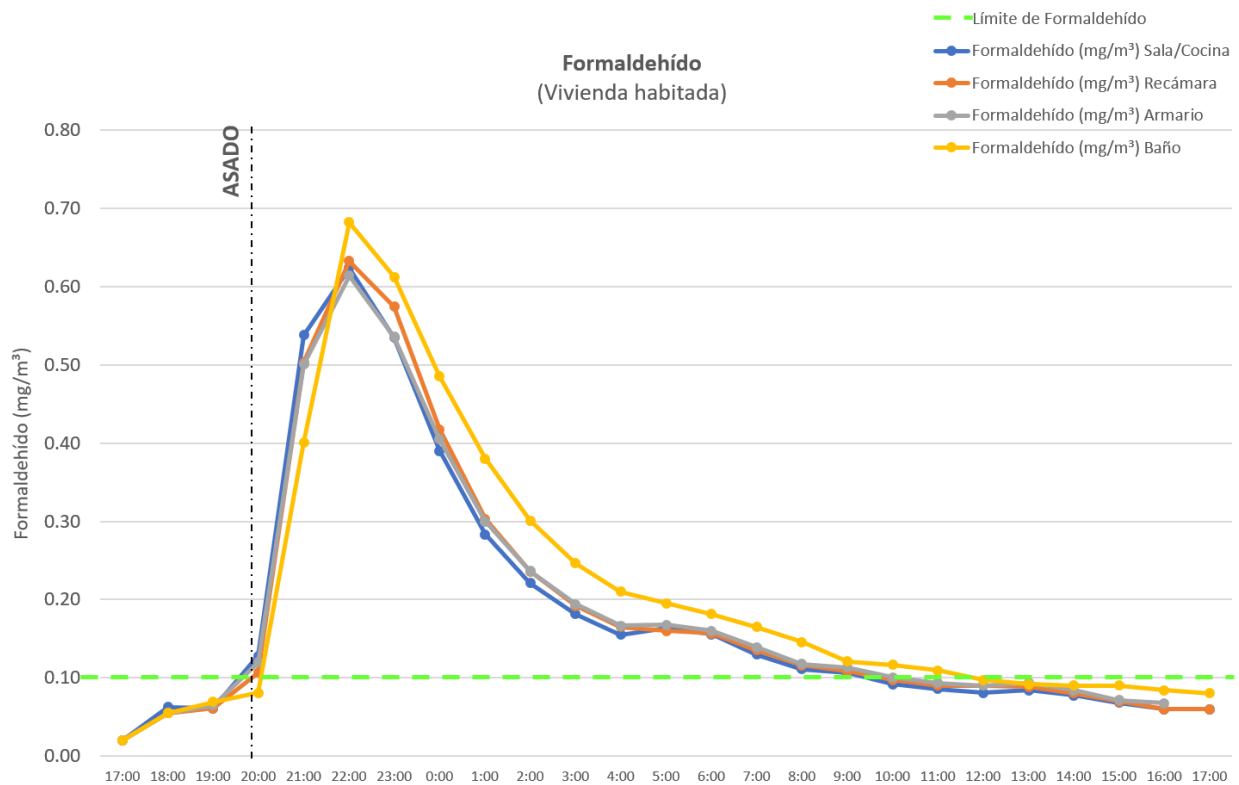


Figura 53. Infiltración de Formaldehído con una fuente emisora fija. Vivienda en verano. Elaboración propia

4.2.2 MONITOREO DE INVIERNO

Durante el invierno, como se muestra en la figura 54, se observó que, durante el periodo deshabitado, la infiltración de materia particulada PM2.5 proveniente del aire exterior, coadyuvó a que en todos los espacios de la vivienda se presentaran niveles clasificados por la EPA como insalubres para grupos sensibles. Cabe señalar que, durante el periodo comprendido entre las 4:00 y las 17:00 horas, se observó una tendencia de concentración de PM2.5 mayormente en el baño, lo cual es atribuible a la carente ventilación del espacio.

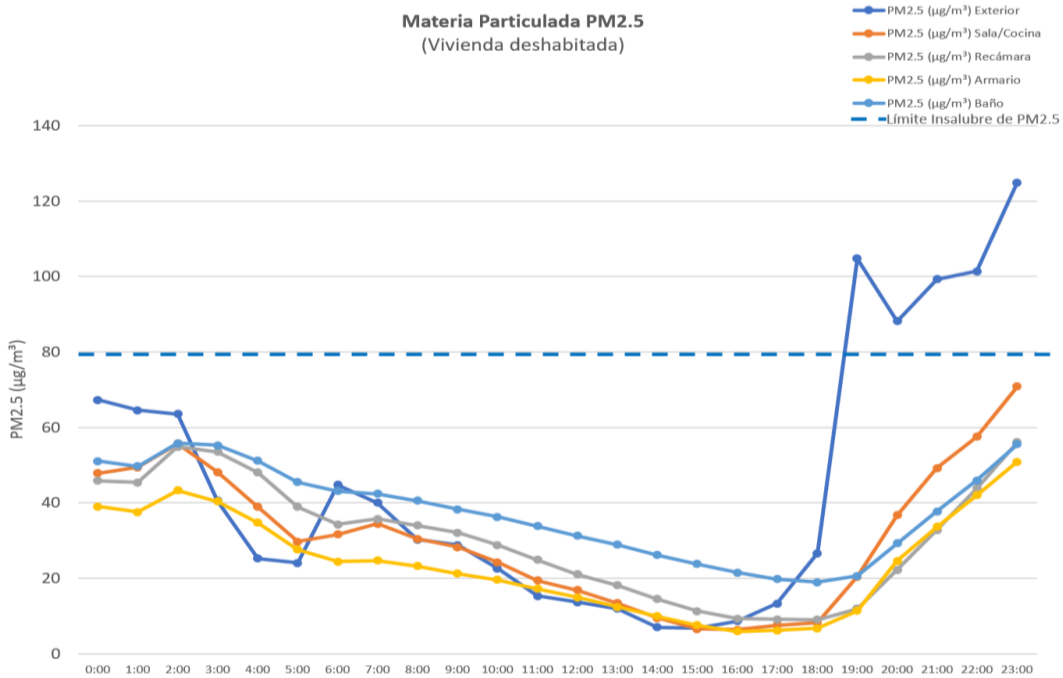


Figura 54. Materia particulada PM2.5. Vivienda deshabitada en invierno. Elaboración propia

Al cocinar en el invierno se observa que los niveles de materia particulada PM_{2.5} sobrepasan hasta por mas del doble el límite establecido por la EPA como peligroso. La figura 55 muestra, además, una tendencia de acumulación en el aire de la recámara y el baño, donde transcurren 4 y 6 horas respectivamente para disminuir su concentración.

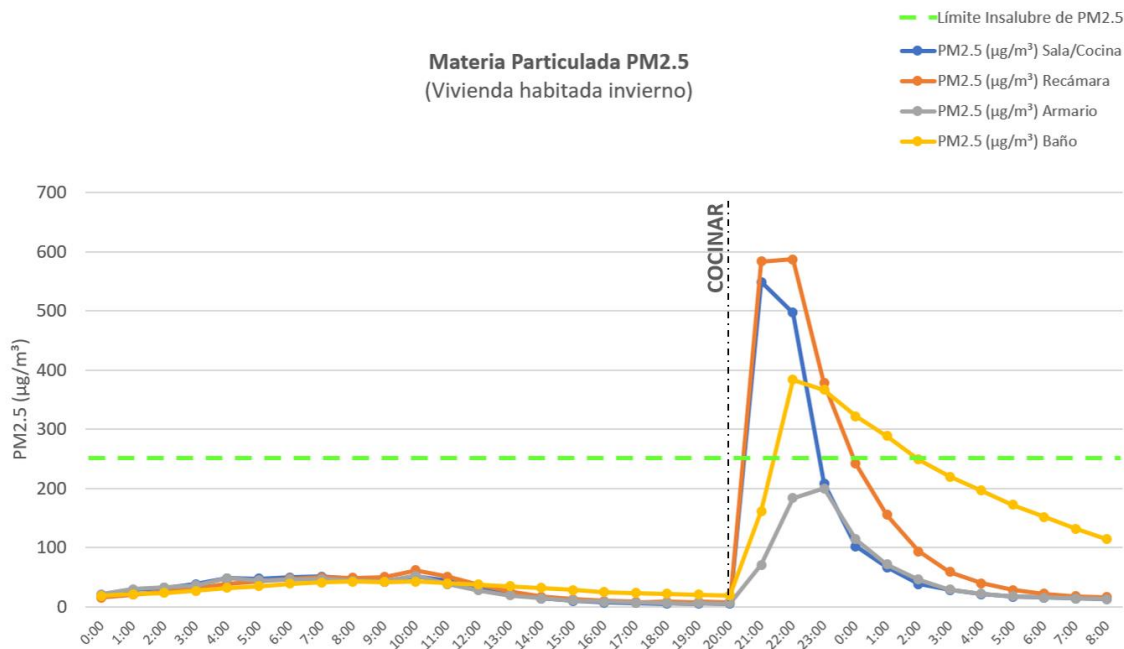


Figura 55. Materia particulada PM2.5. Vivienda habitada en invierno. Elaboración propia

De manera similar, las emisiones de materia particulada PM₁₀ también se concentran en la recámara y el baño, demorando 4 y 6hrs respectivamente para disminuir de la categoría de peligroso. La tabla 56 además muestra como la concentración de PM₁₀ al cocinar en el invierno sobrepasa por mas del doble el límite establecido por la EPA.

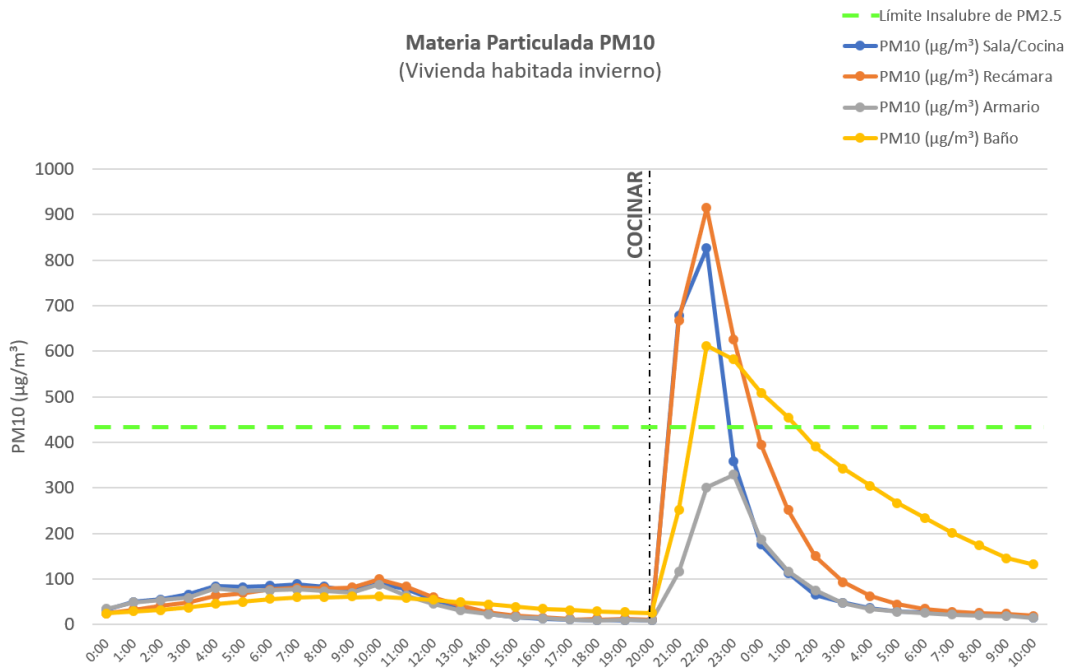


Figura 56. Materia particulada PM₁₀. Vivienda habitada en invierno. Elaboración propia

Aún cuando las emisiones de materia particulada son similares en el verano y en el invierno, el tiempo transcurrido para su dispersión varía considerablemente. Esto es atribuible a los niveles de contaminación exterior, a la operación del aire acondicionado y a un diferencial entre la temperatura de bulbo seco de hasta 4 °C (Verano con un promedio de 22 °C e invierno con 18 °C). El movimiento de las partículas en el aire es proporcional a la temperatura de bulbo seco, ya que aumenta su energía cinética. La vivienda, al no contar con un sistema de aislamiento térmico, presenta temperaturas bajas en invierno, lo que ocasiona que transcurran hasta 10 horas después de la emisión de materia particulada para disminuir a los niveles clasificados como buenos por la EPA (figura 57).

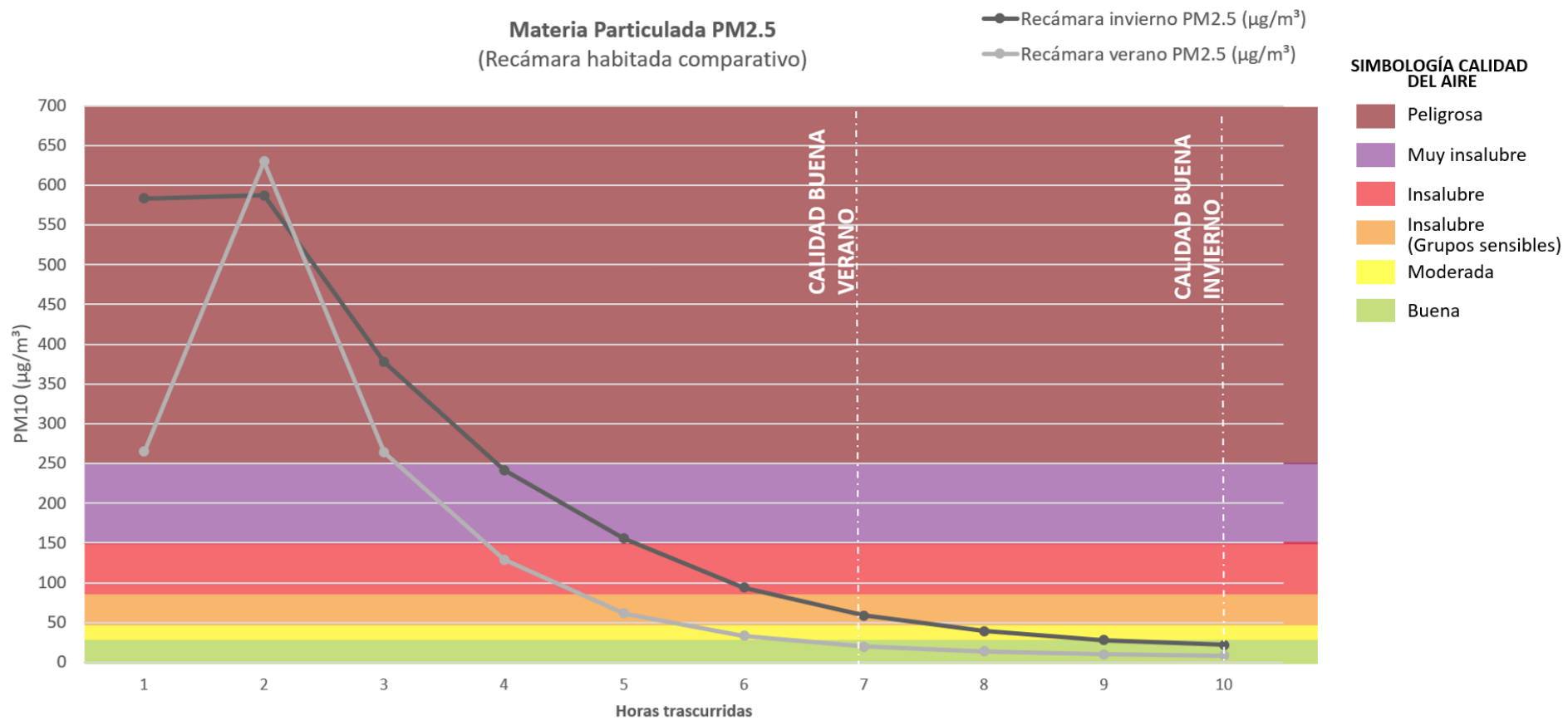


Figura 57. Materia particulada PM10. Vivienda habitada en invierno. Elaboración propia

4.3 SIMULACIÓN DE CONTAMINACIÓN DEL AIRE INTERIOR

La simulación computacional de contaminación en el aire permite evaluar diferentes escenarios para establecer estrategias que permitan mejorar la calidad del aire interior. Para esta investigación se utilizó el software CONTAM versión 3.4.0.1, que es un programa de licencia abierta desarrollado por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología.

Se comenzó por modelar el proyecto arquitectónico con precisión, así como los datos meteorológicos de la zona (temperatura de bulbo seco, humedad, dirección y velocidad del viento, presión atmosférica y contaminación exterior). A su vez se dieron de alta datos de los contaminantes a evaluar y fuentes emisoras (Figura 58).

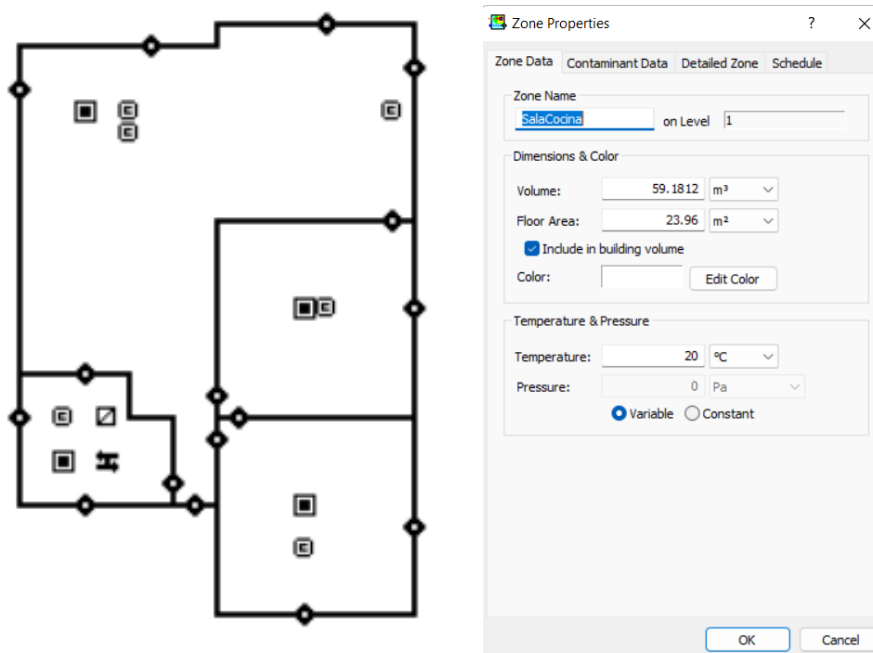


Figura 58. Modelado de caso de estudio para simulación en CONTAM. Elaboración propia

4.3.1 CALIBRACIÓN DE LA SIMULACIÓN

Se realizó una comparación de los datos simulados de las emisiones de materia particulada PM_{2.5} en la vivienda y los datos recabados en el proceso de monitoreo, con la finalidad de verificar el modelo.

Se utilizó el método de correlación de Pearson, que de acuerdo con Fulanito (2020) es una medida que mide la relación estadística entre dos variables continuas. Cuando la asociación de los elementos es lineal, el coeficiente se representa adecuadamente. Para su cálculo se utiliza la siguiente fórmula:

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{(n-1) s_x s_y} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}$$

Donde:

- Si la correlación es menor a cero: las variables se relacionan inversamente
- Si la correlación es mayor a cero: las variables se relacionan directamente
- Si la correlación es igual a cero: no es posible determinar una correlación, pero no significa que no exista

Los datos del monitoreo ambiental y de la simulación fueron procesados en una hoja de cálculo de Microsoft Excel, que permitió estimar un valor de 0.95, lo que demuestra una relación directa entre el conjunto de variables. Esto se muestra gráficamente en la figura 59.

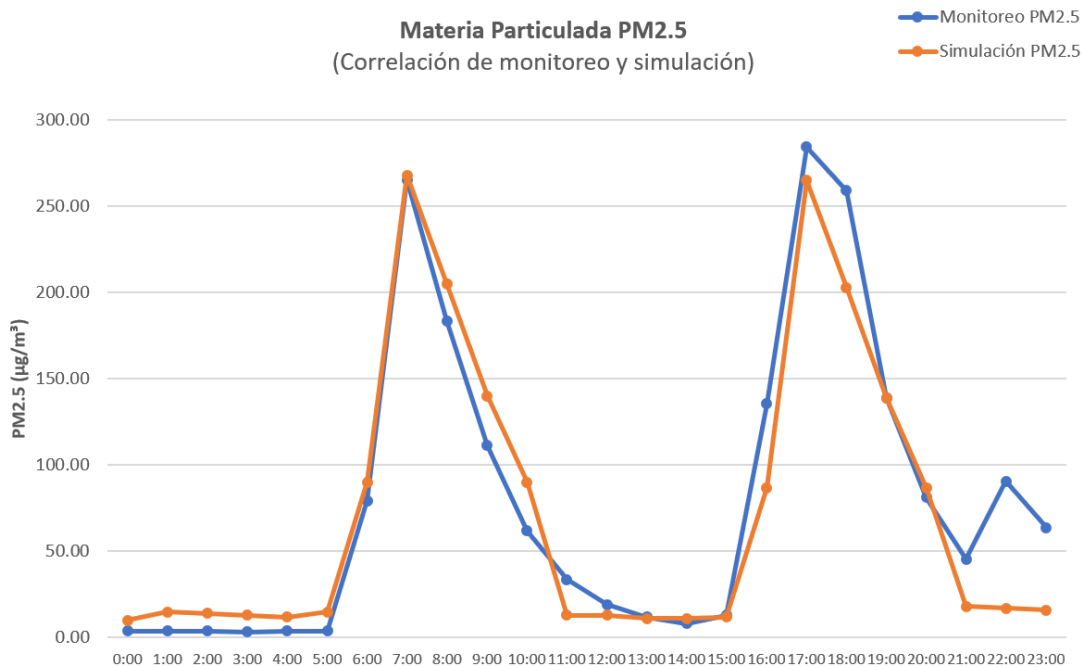


Figura 59. Correlación de monitoreo y simulación de PM2.5. Elaboración propia

4.3.3 ESCENARIOS PARA LA SIMULACIÓN

Esta investigación propone dos estrategias para disminuir la contaminación del aire interior. La primera es la instalación de un sistema de extracción mecánica en cocina y la segunda es un cambio en la tipología del diseño de la vivienda; la instalación de un muro divisorio entre la sala y la cocina para impedir la dispersión de contaminantes de una de las principales fuentes emisoras de materia particulada, la combustión en estufas.

4.3.3.1 ESCENARIO 1: CONDICIONES ACTUALES

En ese escenario se simuló la vivienda con sus condiciones actuales, para poder utilizarse como referencia para evaluar el rendimiento de las estrategias propuestas. En este modelo, la vivienda cuenta con ventilación natural por ventanas y grietas en la envolvente y un sistema de extracción mecánica en el baño (figura 60).

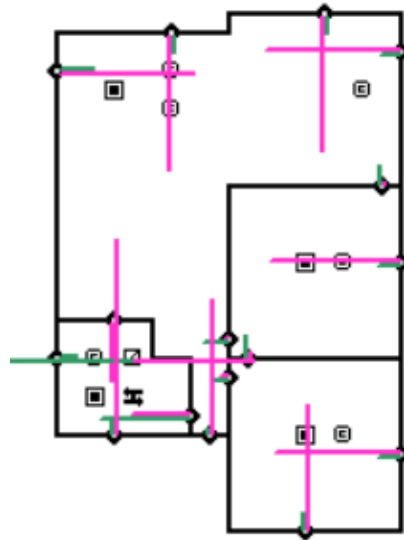


Figura 60. Escenario de simulación 1: La vivienda en sus condiciones actuales. Elaboración propia

4.3.3.2 ESCENARIO 2: SISTEMA DE EXTRACCIÓN MECÁNICA EN COCINA

Para este modelo de simulación se integró un sistema de extracción mecánica en la cocina; una campana con una capacidad de extracción de 300 m³/hr. La programación

de operación de la campana se fijó a 1hr, lo equivalente a permanecer encendida mientras se cocina únicamente. (figura 61).

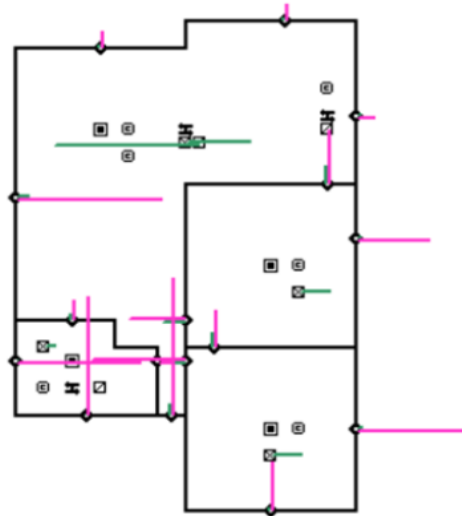


Figura 61. Escenario de simulación 2: La vivienda con un sistema de extracción mecánica en muros. Elaboración propia

4.3.3.2 ESCENARIO 3: MURO DIVISORIO EN COCINA

Finalmente, para este tercer escenario se integró un muro divisorio entre la sala y la cocina. Las características del muro se dieron de alta con el mismo sistema constructivo de la envolvente, mampostería de block común 12cm asentado con mortero cemento arena. El objetivo del muro es impedir la libre dispersión de los contaminantes emitidos al cocinar, que durante el monitoreo se concluyó es uno de los principales retos del control de flujos de aire interno en la vivienda (figura 62).

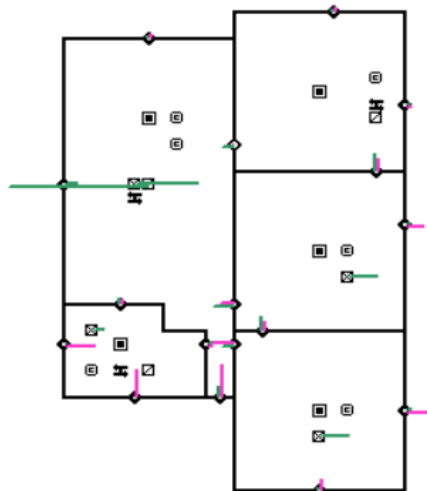


Figura 62. Escenario de simulación 3: La vivienda con un sistema de extracción mecánica en muros. Elaboración propia

4.4 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En cuanto a los valores máximos registrados al cocinar, para el primer escenario (sin ventilación) se registro una máxima de hasta 270 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, clasificado como peligroso por la EPA, para el segundo escenario (con extractor mecánico en cocina) se observa una máxima de 135 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y para el tercer escenario (con un muro divisorio en cocina) la concentración mas alta registrada fue de 165 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esto representa una reducción en la contaminación de materia particulada $\text{PM}_{2.5}$ del 50% y del 38.88% respectivamente. Los resultados se muestran de forma gráfica en la figura 63.

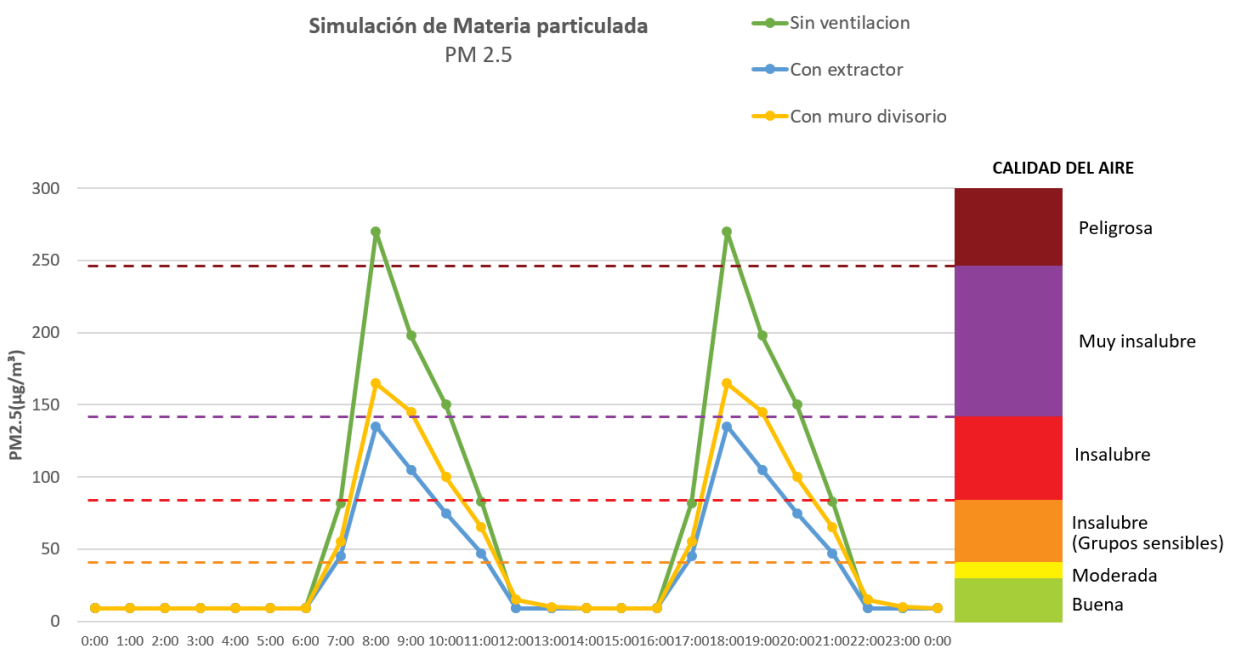


Figura 63. Resultados de la simulación de materia particulada $\text{PM}_{2.5}$. Elaboración propia

Cabe recalcar que, la eficiencia de la instalación del muro divisorio recae en el impedimento de la dispersión de contaminantes por todos los espacios de la vivienda, sin embargo, se recomienda de igual forma la instalación de un sistema de extracción mecánico o la apertura de ventanas para evitar elevar los niveles en la cocina.

5. CONCLUSIONES

La ciudad de Mexicali presenta una notable desventaja en materia de calidad del aire, derivado de sus características topográficas y meteorológicas, que en algunos casos complican la dispersión de contaminantes atmosféricos.

Las temperaturas extremas, en conjunción al diseño de las envolventes habitacionales de interés social en la región, reducen las renovaciones de aire en los espacios; al no contar con ventilación mecánica y al imposibilitar la apertura de ventanas por temas de ahorro energético.

Partiendo desde la concepción de que la vivienda es un producto y que cada producto debe contar con un instructivo para el uso adecuado; los manuales de post venta entregados por las desarrolladoras al adquirir una vivienda nueva deben incluir un apartado con recomendaciones para mejorar la calidad del aire interior en las diferentes habitaciones de las viviendas.

De acuerdo a los resultados de la aplicación de la encuesta de esta investigación, es importante reforzar la educación del usuario para guiarlo a las prácticas correctas de renovación de aire interior al cocinar. Se recomienda utilizar un sistema de extracción mecánica o la apertura de ventanas durante todo el proceso y al menos una hora después de su conclusión.

Por otra parte, se sugiere disminuir la cantidad de productos utilizados para realizar la limpieza del hogar, y sobre todo evitar mezclarlos para prevenir reacciones químicas que puedan liberar otros compuestos nocivos para la salud.

El monitoreo ambiental logró comprobar lo estipulado por otros autores durante la revisión del estado del arte de esta investigación; cocinar es la actividad que deteriora en mayor medida la calidad del aire interior en viviendas. Sin embargo, también se identificó que la concentración depende directamente del método de cocción utilizado, siendo el método de hervido el que genera un menor impacto y el de sofreído el que genera mayores emisiones de formaldehído, dióxido de carbono, materia particulada PM10 y PM2.5.

Por lo que respecta a las fuentes de emisión de contaminantes que no están relacionadas con las actividades de los habitantes, en el verano, la alta concentración de formaldehído registrada se atribuyó a su relación directa con la temperatura de bulbo seco y la carencia de un sistema de aislamiento térmico en muros. Mientras que, en el invierno, que es la época del año con los mayores índices de contaminación ambiental, la infiltración de materia particulada PM2.5 se identificó como la principal fuente emisora.

Por lo que respecta a las estrategias para disminuir la contaminación del aire interior, la simulación computacional permitió comprobar que la instalación de sistemas de extracción mecánica en cocinas disminuye los niveles de materia particulada en aproximadamente un 40%; mientras que la colocación de muros divisorios presenta un rendimiento del 37%, por lo que esta investigación prioriza su utilización, al ser una estrategia pasiva que no requiere el uso de energía eléctrica.

Es latente la necesidad de reformar el marco normativo que rige el diseño de vivienda de interés social en la región, de manera que se pueda incluir la obligatoriedad de sistemas de extracción mecánica, sobre todo en cocinas y baños.

6. RECOMENDACIONES

Actualmente, los artículos 63 y 64 del Reglamento de Edificaciones para el Municipio de Mexicali, establecen los requerimientos para ventilación de piezas habitables y de servicios en edificaciones habitacionales. Esta investigación propone una reforma a dichos artículos, como se muestra a continuación:

Artículo 63.- *En edificaciones tipo habitacional o de alojamiento, se aplicará lo siguiente para piezas habitables:*

I.- Para iluminación, deberá proporcionarse el 10%, y no menos de 0.75m²

II. Para ventilación, se proporcionará el 30%.

Artículo 64.- *En las edificaciones tipo habitacional, se aplicará lo siguiente para piezas de servicio:*

I.- La iluminación podrá ser natural o artificial;

II.- Para ventilación, se proporcionará el 50% o mediante sistema de extracción mecánica

III.- La iluminación natural podrá brindarse a través de domos o tragaluces debiendo proporcionarse el 2% de la superficie de piso de la pieza.

IV.- Para cocinas al interior de la edificación, se proporcionará ventilación mecánica con una capacidad de al menos 10m³/hr por cada metro cuadrado de área construida.

A su vez, el INFONAVIT creó el programa de Hipoteca Verde con el objetivo mejorar la calidad de vida de los acreditados; y, aunque en el catálogo de ecotecnologías destaca la integración de atributos sustentables en materia de ahorro energético y del agua; esta investigación propone la incorporación de una nueva línea de ecotecnologías en materia de calidad del aire (figura x).

LISTADO DE REFERENCIAS

- Aarne, P., Peirce, J., Weiner, R. (1990). *Environmental pollution and control*. (3era edición) Butterworth-Heinemann.
- Ahmed, T., Kumar, P., Mottet, L. (2021). *Natural ventilation in warm climates: The challenges of thermal comfort, heatwave resilience and indoor air quality*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 138 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110669>
- Ajibade, F. et al (2021). *Environmental pollution and their socioeconomic impacts. Microbe Mediated Remediation of Environmental Contaminants*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821199-1.00025-0>
- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos EPA (2008). *Care for Your Air: A Guide to Indoor Air Quality*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-08/documents/careforyourair.pdf>
- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos EPA (2014). *Air Quality Index. A guide to air quality and your health* https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-04/aqi_brochure_02_14_0.pdf
- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos EPA (2016). *Guía de la calidad del aire sobre la contaminación por partículas* https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-05/air-quality-guide_particle_SPA.pdf
- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos EPA (S/f). *Impacto de los contaminantes biológicos en la calidad del aire interior*. <https://espanol.epa.gov/cai/impacto-de-los-contaminantes-biologicos-en-la-calidad-del-aire-interior>
- Agarwal, N., Meena, C., Raj, B., Saini, L., Kumar, A., Gopalakrishnan, N., Kumar, A., Balam, N., Alam, T., Kapoor, N., Aggarwal, V. (2021). *Indoor air quality improvement in COVID-19 pandemic: Review*. *Sustainable Cities and Society* Vol. 70 <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102942>

Ayuntamiento de Mexicali. (1998). *Reglamento de Edificaciones para el Municipio de Mexicali*.

<http://www.mexicali.gob.mx/transparencia/normatividad/reglamentos/pdf/edificaciones.pdf>

Bas, E. (2004). *Indoor Air Quality: Guide for Facility Managers*. Estados Unidos de América: The Fairmont Press, Inc.

Cakyova, K., Figueiredo, A., Oliveira, R., Rebelo, F., Vicente, R., Fokaides, P. (2021). *Simulation of passive ventilation strategies towards indoor CO2 concentration reduction for passive houses*. Journal of Building Engineering Vol. 43 <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103108>

Hernández, A., Martí, M. (s/f). Contaminantes biológicos: evaluación de ambientes laborales. Centro Nacional de Condiciones de Trabajo Barcelona. https://www.cso.go.cr/legislacion/notas_tecnicas_preventivas_insht/NTP%20203%20-%20Contaminantes%20biologicos%20evaluacion%20en%20ambientes%20laborales.pdf

Carazo, L., Fernández, R., González, F., Rodríguez, J. (2012). *Contaminación del aire interior y su impacto en la patología respiratoria*. Archivos de Bronconeumología vol. 49 (pp. 22-27) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300289612001196>

Carreras et al. (2019). *Burden of disease attributable to second-hand smoke exposure: A systematic review*. Preventive Medicine vol. 129 <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2019.105833>

Cervera, L., Rojas, H., Balarezo, T. (2015). *Detección de pavimentación y carga vehicular. Calidad del aire y sus efectos a la salud en Mexicali, Baja California*. Memorias de resúmenes en extensos SELPER-XXI-México-UACJ

Chan, D. (2010). *Principios de Arquitectura Sustentable y la vivienda de Interés Social. Caso: la vivienda de interés social en la ciudad de Mexicali, Baja California, México*. México. A International Conference Virtual City and Territory. 6to Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual, Mexicali, 5,6,7 Octubre 2010

- https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/12843/06_Chan%20Lopez_Delia.pdf
- Cheek, E., Guercio, V., Shrubsole, C., Dimitroulopoulou S. (2021) *Portable air purification: Review of impacts on indoor air quality and health*. Science of The Total Environment Vol. 766 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142585>
- Cheung, P., Jim, C.Y. (2019). *Impacts of air conditioning on air quality in tiny homes in Hong Kong*. Science of The Total Environment Vol. 684 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.354>
- Cheung, P., Jim, C.Y. (2019). *Indoor air quality in substandard housing in Hong Kong*. Sustainable Cities and Society Vol. 48 <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101583>
- Conde Williams, A. d. (2013). Efectos nocivos de la contaminación ambiental sobre la embarazada. Revista Cubana de Higiene y Epidemiología. <https://www.redalyc.org/pdf/2232/223229324011.pdf>
- Cruz, A (2014). *Factores que afectan el Desarrollo de Vivienda Bioclimática Unifamiliar en el México Urbano Actual y Alternativas para fomentarlo*. <https://core.ac.uk/download/pdf/128742712.pdf>
- Cuce, E., Sher, F., Sadiq, H., Mert, P., Guclu, T., Besir, A. (2019). Sustainable ventilation strategies in buildings: CFD research. Sustainable Energy Technologies and Assessments Vol. 36 <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100540>
- Corona, E., Rojas, R. (2009). *Calidad del aire y su incorporación en la planeación urbana: Mexicali, Baja California, México*. Estudios Fronterizos (vol. 10) https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-69612009000200003&script=sci_arttext
- Diario Oficial de la Federación (2019). *NORMA Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud*. <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/noms/NOM-172-SEMARNAT-2019-Indice-AIRE-y-SALUD.pdf>

- Doll, S., Davison, E., Painting, B. (2016). *Weatherization impacts and baseline indoor environmental quality in low income single-family homes*. Building and Environment vol. 107 (pp. 181-190)
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132316302281>
- Domingo, A. (2016). *Medio ambiente y exposición laboral a los agentes físicos, químicos o biológicos*. Universitas Miguel Hernández
- Dominguez, H. (2004). *Nuestra atmósfera: como comprender los cambios climáticos*. Lectorum S.A. de C.V.
- Fernández-Agüera, J., Domínguez-Amarillo, S., Alonso, C., Martín-Consuegra, F. (2019). *Thermal comfort and indoor air quality in low-income housing in Spain: The influence of airtightness and occupant behavior*. Energy and Buildings Vol. 199
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.052>
- Flores, J., Moreno, S., Albert, L. (1995). *La contaminación y sus efectos en la salud y el ambiente*. Centro de Ecología y Desarrollo. Universidad de Texas.
- Fundación para la Investigación de la Calidad del Aire A.C. (s/f). *Informe sobre la calidad del aire en Mexicali durante 2020*. Consultado el 7 de abril de 2021 de:
<https://www.redspira.org/images/Medios/Informe-calidad-del-aire-en-Mexicali-Redspira-2020.pdf>
- García et al (2011) *Confort térmico y Consumo energético por uso de Sistemas Constructivos para muros en Mexicali, Baja California*. Conferencia: Semana Nacional de Energía Solar. Chihuahua, Chihuahua, México Vol. XXXV
https://www.researchgate.net/publication/315584401_Confort_Termico_y_Consumo_Energetico_por_uso_de_Sistemas_Constructivos_para_Muros_en_Mexicali_Baja_California
- Greenpeace (s/f). *El aire que respiro. El estado de la calidad del aire*.
https://www.greenpeace.org/static/planet4-mexico-stateless/2018/11/ff412966-ff412966-aire_que_respiro_ok_emr.pdf
- Grijalva, A., Jiménez, M., Ponce, H. (2020). Contaminación del aire y del agua por agentes químicos. Revista Científica Mundo de la Investigación y el Conocimiento.
<https://recimundo.com/index.php/es/article/view/883>

- Guardino, X. (2012). *Medición de contaminantes biológicos en el aire*. Universidad Oberta de Cataluña.
- Health Canadá (2006). *Residential Indoor Air Quality Guideline*.
<https://www.canada.ca/content/dam/canada/health-canada/migration/healthy-canadians/publications/healthy-living-vie-saine/formaldehyde/alt/formaldehyde-eng.pdf>
- Instituto del Fondo Nacional para la Vivienda de los Trabajadores INFONAVIT. (2015). *Atlas del Abandono de vivienda*.
<https://infonavit.janium.net/janium/Documentos/67994.pdf>
- Instituto del Fondo Nacional para la Vivienda de los Trabajadores INFONAVIT. (2015). *Plan Maestro para la Regeneración de la Unidad Habitacional “Valle de Puebla”*
<https://infonavit.janium.net/janium/Documentos/70310.pdf>
- Instituto Mexicano para la Competividad (IMCO). (2013). *¿Cuánto nos cuesta la contaminación del aire en México?* Consultado el 7 de abril de 2021 de:
<http://imco.org.mx/wp-content/uploads/2013/09/Anexo-MetodoI%C3%B3gico-24Sep13.pdf>
- Instituto Municipal de Investigación y Planeación Urbana de Mexicali IMIP (2007). *Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Mexicali, B.C. 2025*.
<http://www.mexicali.gob.mx/XXIII/pdf/AdministracionUrbana/pduc2025.pdf>
- Instituto Navarro de Salud Laboral (s/f). Riesgos por agentes contaminantes. Gobierno de Navarra <https://www.navarra.es/NR/ronlyres/2EFDBE3F-EA49-4BDE-9CFB-7EEF169F4ECA/0/m2ud2.pdf>
- Jones, E., Cedeño, J., Young, A., MacNaughton, P., Coull, B., Spengler, J., Allen, J. (2021). *The effects of ventilation and filtration on indoor PM2.5 in office buildings in four countries*. Building and Environment Vol. 200
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107975>
- Kaiser, J., Wenbin, P., Wei, S., Calautit, K., Hughes, B. (2020). *Numerical and experimental investigation of the indoor air quality and thermal comfort performance of a low energy cooling windcatcher with heat pipes and extended surfaces*, Renewable Energy Vol. 145
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.040>.

- Kang, I., McCreery, A., Azimi, P., Gramigna, A., Baca, G., Abromitis, K., Wang, M., Zeng, Y., Scheu, R., Crowder, T., Evens, A., Stephens, B. (2022) *Indoor air quality impacts of residential mechanical ventilation system retrofits in existing homes in Chicago, IL*. Science of The Total Environment Vol. 804 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150129>
- Katiyar, V., Khare, M. (2008). *Indoor air quality- An emerging Environmental Challenge*. https://www.researchgate.net/publication/236605730_Indoor_Air_Quality-An_Emerging_Environmental_Challenge
- Laquatra, J. (2018). Indoor air quality. IntechOpen. DOI:[10.5772/intechopen.81192](https://doi.org/10.5772/intechopen.81192)
- Lei, W., Liu, C., Wang, L., Li, N. (2017). *Effect of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort in dormitory during winter*. Building and Environment Vol. 125 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.051>
- Leon, R. (2019). *Contaminación ambiental y sus efectos en la salud. Una revisión de la literatura científica*. Universidad Privada del Norte. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/26511/Leon%20Rojas%2c%20Roberto%20Carlos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Li, C., Bai, L., He, Z., Liu, X., Xu, X. (2021). *The effect of air purifiers on the reduction in indoor PM2.5 concentrations and population health improvement*. Sustainable Cities and Society Vol. 75 <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103298>
- Molina, E. (2015). *Contaminantes biológicos del aire interior de la vivienda: factores contribuyentes, afecciones relacionadas y medidas correctivas*. Revista Cubana de Higiene y Epidemiología vol. 53 <http://www.revepidemiologia.sld.cu/index.php/hie/article/view/8/8>
- Nieblas, E., Quintero, M. (2006). Gestión ambiental transfronteriza para la generación eléctrica en la región California, Estados Unidos-Baja California, en *Región y Sociedad*, colson, núm. 37, pp. 3-35

- Organización Mundial de la Salud (s/f). *Air quality, energy and health*.
<https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants>
- Organización Mundial de la Salud. (2018). *Calidad de Aire y salud*. Nota descriptiva Consultado el 21 de marzo de 2021 de:[https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Organización Mundial de la Salud (2023). *Contaminación del aire doméstico*.
<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>
- Organización Mundial de la Salud. (2018). *Contaminación del aire de interiores y salud*. Nota descriptiva. Consultado el 21 de marzo de 2021 de:<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>
- Organización mundial de la salud. (2022). *Contaminación del aire ambiente (exterior)*
[https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Organización Mundial de la Salud (2000). *Guidelines for air quality*.
https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/66537/WHO_SDE_OEH_00.02-eng.pdf?sequence=18
- Palacios, I., Moreno, D. (2022). *Contaminación ambiental*. Revista Científica Mundo de la Investigación y el Conocimiento.
<https://recimundo.com/index.php/es/article/view/1545/1979>
- Peñalver et al. (2016). *¿Se puede controlar el formaldehído?* Revista de la Asociación Española de Especialistas en Medicina del Trabajo (vol. 25)
<https://scielo.isciii.es/pdf/medtra/v25n4/original1.pdf>
- Ramos et al (2015). *Desarrollo Sustentable y Finanzas*. Ecorfan. Bolivia.
- Robles, D., Kramer, S., (2017). *Improving Indoor Air Quality Through The Use of Ultraviolet Technology In Commercial Buildings*. Procedia Engineering Vol. 196
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

- Saif, J., Wright, A., Khattak, S., Elfadli, K. (2021). *Keeping Cool in the Desert: Using Wind Catchers for Improved Thermal Comfort and Indoor Air Quality at Half the Energy*. Buildings, 11(3), 100. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings11030100>
- San Jose, R., Pérez, J.L., Gonzalez-Barras, R.M. (2021). *Multizone airflow and pollution simulations of indoor emission sources*. Science of The Total Environment vol. 766 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142593>
- Sánchez, J. (2012). *La vivienda "social" en México*. México: JSa
- Santillan-Soto et al. (2016) *Análisis comparativo de emisiones de CO2 y su impacto económico en dos complejos habitacionales de Mexicali, México*. X Congreso Internacional AEC: Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio <http://dx.doi.org/10.14198/XCongresoAECAlicante2016-58>
- Sanz, R., Ribas, J. (1989). *Ingeniería ambiental: Contaminación y tratamientos*. España: Boixareu Editores
- Secretaria de Protección al Ambiente. (2018). *Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Baja California 2018-2027*. Consultado el 6 de abril de 2021 de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/310361/24_ProAire_Baja_California.pdf
- Singh, K., Tripathi, D. (2021). *Particulate matter and human health*. DOI:10.5772/intechopen.100550
- Sireesha, N.L. (2017). *Correlation amongst Indoor Air Quality, Ventilation and Carbon Dioxide*. Journal of Scientific Research. : <http://dx.doi.org/10.3329/jsr.v9i2.31107>
- Slezakova, K., Morais, S., Pereira, M. (2012). *Indoor air pollutants: Relevant Aspects and Health Impacts*. Environmental Health – Emerging Issues and Practice. Cap. 6. IntechOpen
- Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Acondicionamiento de aire Inc. ASHRAE. (2007). *Ventilación para una Calidad Aceptable de Aire Interior*. http://www.ditar.cl/archivos/Normas_ASHRAE/T0120ASHRAE-62.1-2007-sp-Ventil-p-CAAI.pdf
- Solórzano, O. (2014). *Manual de conceptos de Riesgos y Factores de Riesgo para análisis de peligrosidad*. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Gestión

Institucional de Recursos Humanos Gestión de Salud.
https://www.mag.go.cr/acerca_del_mag/circulares/rec_hum-manual-riesgos-peligrosidad.pdf

Souza, I., Lopes, J., Moura, L., Moura, M. (2019). *Carbon Dioxide: Problems and Decisions II*. Applied Mechanics and Materials. Vol. 965

Spellman, F. (2017). *The Science of environmental pollution. Third edition*. Taylor & Francis Group.

Sui, X., Tian, Z., Liu, H., Chen, H., Wang, D. (2021). *Field measurements on indoor air quality of a residential building in Xi'an under different ventilation modes in winter*. Journal of Building Engineering Vol. 42 <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103040>

Sumei Liu et al. (2020). *Improving indoor air quality and thermal comfort in residential kitchens with a new ventilation system*. Building and Environment Vol. 180 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107016>

Superintendencia de Riesgos del Trabajo (2016). *Contaminantes químicos en el ambiente laboral*. Ministerio de Trabajo, Empleo y Seguridad Social.
https://www.srt.gob.ar/wp-content/uploads/2016/10/Contaminantes_Quimicos_Guia_tecnica.pdf

Tran, V., Park, D., Lee, Y. (2020). *Indoor air pollution, Related Human Diseases, and Recent Trends in the Control and Improvement of Indoor Air Quality*. International Journal of Environmental Research and Public Health vol. 17 <https://doi.org/10.3390/ijerph17082927>

Underhill, L., Milando, C., Levy, J., Dols, W., Lee, S., Fabian, M. (2020). *Simulation of indoor and outdoor air quality and health impacts following installation of energy-efficient retrofits in a multifamily housing unit*. Building and Environment vol. 170 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106507>

Yunus, M. (2009). *Particulate. Sources, effects and control*. Conference: National Conference on Cleaner Production Technologies At: National Institute of Technical Teachers' Training and Research (NITTTR), Chandigarh.

<https://www.researchgate.net/publication/318647965> PARTICULATE SOURCE

S EFF

Zhang, Y. (2005). Indoor air quality engineering. Estados Unidos de América: CRC Press LLC

Zhao, L., Liu, J. (2020). *Operating behavior and corresponding performance of mechanical ventilation systems in Chinese residential buildings*. Building and Environment Vol. 170 <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106600>