



**Universidad Juárez Autónoma de Tabasco**  
**División Académica de Ciencias Biológicas**



---

---

**Modelo para el comportamiento temporal del material  
particulado debido a actividades cotidianas en interiores**

**Tesis**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Ambiental**

Presenta

**Rubí Espinoza Sánchez**

Directores

**M.I.S.A. Elizabeth Magaña Villegas**

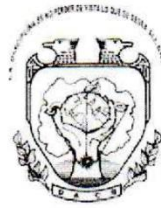
**M.I.A. Jesús Manuel Carrera Velueta**

Villahermosa, Tabasco. Abril de 2024.



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**2024**  
**Felipe Carrillo  
PUERTO**

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN**

Villahermosa, Tab., a 07 de Marzo de 2024


**ASUNTO:** Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON  
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION  
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES  
P R E S E N T E**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza a la **C. RUBÍ ESPINOZA SÁNCHEZ** egresada de la Lic. en **ING. AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis denominado: **"MODELO PARA EL COMPORTAMIENTO TEMPORAL DEL MATERIAL PARTICULADO DEBIDO A ACTIVIDADES COTIDIANAS EN INTERIORES"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E

  
**DR. ARTURO GARRIDO MORA  
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica  
C.c.p.- Interesado





**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**2024**  
**Felipe Carrillo**  
**PUERTO**  
GOBIERNO DE  
MÉXICO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN

07 de febrero de 2024

**C. Rubí Espinoza Sánchez**  
**Pasante de la Lic. en Ingeniería Ambiental**  
**PRESENTE**

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, se implementó la revisión del trabajo recepcional (Tesis), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad y el Código Institucional de Ética para la Investigación.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones, el índice de similitud y el reporte de originalidad obtenido a través de la **revisión en la plataforma iThenticate** de su documento de Tesis "**Modelo para el comportamiento temporal del material particulado debido a actividades cotidianas en interiores**".

OBSERVACIONES:

Se excluyeron citas, referencias bibliográficas, fuentes pequeñas (o palabras) y se limitó el número de coincidencias a 15 palabras.

<b>RESULTADO DE SIMILITUD</b>	<b>0 %</b>
	<b>14266 palabras, &lt;15 coincidencias y &lt;10% fuentes</b>

Finalmente, se le solicita al **C. Rubí Espinoza Sánchez** integrar en la versión final del trabajo recepcional (Tesis), este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE  
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

**DR. ARTURO GARRIDO MORA**  
**DIRECTOR**



C.c.p. M.I.S.A. Elizabeth Magaña Villegas. Director del trabajo recepcional (Tesis)  
C.c.p. M.I.A. Jesús Manuel Carrera Velueta. CoDirector del trabajo recepcional (Tesis)  
C.c.p. Archivo

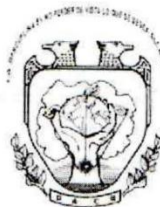
KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA  
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6401 y 6401, e-mail: direccion.dacbiol@ujat.mx

Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques



UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2024  
Felipe Carrillo  
PUERTO  
MEXICO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN

MARZO 07 DE 2024

**C. RUBÍ ESPINOZA SÁNCHEZ**  
**PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL**  
**P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **"MODELO PARA EL COMPORTAMIENTO TEMPORAL DEL MATERIAL PARTICULADO DEBIDO A ACTIVIDADES COTIDIANAS EN INTERIORES"**, asesorado por la M.I.S.A. Elizabeth Magaña Villegas y M.I.A. Jesús Manuel Carrera Velueta, sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por el Dr. José Roberto Hernández Barajas, M.I.P.A. Sergio Ramos Herrera, M.I.S.A. Elizabeth Magaña Villegas, Dra. Melina del Carmen Uribe López y Dr. Idefonso Jesús Díaz Ramírez.

**ATENTAMENTE**  
**ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE**

  
**DR. ARTURO GARRIDO MORA**  
**DIRECTOR**

C.c.p.- Expediente del Alumno.  
Archivo.



## CARTA AUTORIZACIÓN

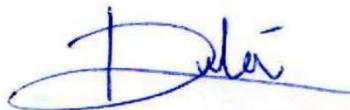
El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Licenciatura denominado: **“MODELO PARA EL COMPORTAMIENTO TEMPORAL DEL MATERIAL PARTICULADO DEBIDO A ACTIVIDADES COTIDIANAS EN INTERIORES”**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro, autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en este documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el Día 07 de Marzo de Dos Mil Veinticuatro.

AUTORIZO



---

RUBÍ ESPINOZA SÁNCHEZ



## AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, quiero dedicar un especial agradecimiento a mis padres, quienes han sido mi pilar fundamental a lo largo de mi formación académica. Su amor incondicional y apoyo constante han sido la fuerza impulsora detrás de cada logro. A mamá y papá, gracias por siempre estar ahí, por alentarme en los momentos de duda y por guiarme con sabiduría en cada decisión importante. Este logro también es de ustedes, pues sin su amor y respaldo, nada de esto sería posible.

A mi hermana por su compañía, cariño y apoyo incondicional en todos los aspectos de la vida, así como por su apoyo durante la elaboración de esta tesis. Por brindarme su ayuda y perspectiva en los momentos en los que surgían las dudas y necesitaba claridad en alguna palabra o parte de la redacción. Su presencia fue reconfortante y su apoyo invaluable. Gracias Perlita, por ser mi confidente, mi apoyo inquebrantable y mi mejor amiga.

A mis asesores, la maestra Elizabeth Magaña Villegas y el maestro Jesús Manuel Carrera Velueta. Les quiero expresar mi más sincero agradecimiento por su incondicional apoyo y paciencia, por reconocer el potencial en mí y por guiarme a lo largo de este proceso, así como por alentarme a continuar a pesar de todas las dificultades que se presentaron. De igual manera, les agradezco profundamente por su dedicación no solo con esta tesis, sino también con mi crecimiento personal y académico, así como por siempre velar por el bienestar de todos sus alumnos. Esta tesis no hubiera sido posible sin ustedes.

A José Antonio Martínez de Dios (Toñito), por su compañía y apoyo durante este proceso y por proporcionar sus datos de investigación para la realización de este trabajo.

Al grupo sinodal conformado por el Dr. José Roberto Hernández Barajas, MIPA. Sergio Ramos Herrera, MISA. Elizabeth Magaña Villegas, Dra. Melina Del Carmen



Uribe López y Dr. Ildefonso Jesús Díaz Ramírez por el tiempo y esfuerzo que dedicaron al leer mi tesis. Sus comentarios y correcciones fueron de gran valor y contribuyeron enormemente a la mejora de este trabajo.

Al Dr. Carlos Manuel Burelo Ramos por su valioso apoyo durante la realización de esta tesis, al proporcionarnos equipo de cómputo para el desarrollo de esta. De igual manera, agradezco su confianza en nuestro trabajo y en los de mis compañeros Antonio y Karen al apoyarnos en la recaudación de fondos para poder presentar estos trabajos en Colombia.

A los profesores que formaron parte de mi carrera universitaria y desempeñaron un papel crucial en mi formación académica y profesional. A través de su dedicación y pasión por enseñar, aprendí lecciones valiosas que han dejado una marca indeleble en mi vida.

A mis amigos de la carrera Clau, Pau, Jenni, Zaira, Daria, Dani, Dianita, Gi, por compartir conmigo tantos momentos a lo largo de la carrera, pero principalmente por todo su apoyo, compañía y amistad.

Y finalmente, a mis compañeros de vida Jessy, Tobi y Spyke, por brindarme su amor incondicional y su compañía en todo momento. A mi Jessy, que estuviste conmigo durante gran parte de este proceso, tu recuerdo y tu presencia continúan viviendo en mi corazón. Tu amor incondicional y tu lealtad fueron una inspiración para mí, y nunca olvidaré los momentos que compartí contigo. A Tobi y Spyke, mis compañeros actuales, les agradezco cada día por formar parte de mi vida y compartir todo su amor y cariño conmigo. No hay palabras suficientes para expresar lo agradecida que estoy por tenerlos en mi vida.



## TABLA DE CONTENIDOS

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	6
<b>RESUMEN</b> .....	11
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	12
<b>2. MARCO CONCEPTUAL</b> .....	14
2.1. Calidad del aire en interiores.....	14
2.2. Contaminantes del aire y sus efectos a la salud .....	15
2.3. Modelación de la calidad del aire.....	16
2.4. Ventilación en espacios interiores.....	19
2.5. Velocidad del viento .....	19
2.6. Clasificación de PM según su proceso de formación y tamaño.....	22
2.7. Normas de referencia.....	24
<b>3. MARCO REFERENCIAL</b> .....	27
<b>4. OBJETIVOS</b> .....	29
4.1. Objetivo general.....	29
4.2. Objetivos específicos.....	29
<b>5. METODOLOGÍA</b> .....	30
5.1. Muestreo de PM.....	30
5.2. Conformación de la base de datos.....	32
5.3. Estimación de tasas de emisión y deposición.....	33
5.3.1. Tasas de emisión.....	33
5.3.2. Tasas de deposición.....	34
5.4. Calibración y validación de modelos.....	34
5.4.1. Modelo de caja simple en dos etapas.....	34
5.5. Cualificación de la calidad del aire.....	37
5.6. Diseño de interfaz.....	37
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	38
6.1. Obtención de tasas de emisión y deposición .....	38
6.2. Validación y modelación de la CAI.....	39
6.2.1. Modelo de caja simple.....	39
6.3. Simulación de la CAI.....	53



<b>6.4. Cualificación de la CAI con base en la modelación</b> .....	54
<b>6.5. Interfaz</b> .....	61
<b>7. Conclusiones</b> .....	64
<b>Referencias</b> .....	66
<b>Anexos</b> .....	71

## LISTA DE CUADROS

Tabla 1. Categorías representativas de la escala de Beaufort, y sus efectos en el mar y la superficie terrestre.....	20
Tabla 2. Categorías del índice Aire y Salud (NOM-172-SEMARNAT-2019).....	24
Tabla 3. Tasas de emisión y deposición estimados para cada actividad.....	38
Tabla 5. Resultados obtenidos de las simulaciones. ....	53

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comparación del tamaño de los tipos de PM.....	15
Figura 2. Diagrama del volumen de control para el modelo de caja simple (Ramos et al., 2015).....	17
Figura 3. Comportamiento típico del PM cuando se activa una fuente. ....	18
Figura 4. Clasificación de partículas por su proceso de formación y tamaño (Junta de Andalucía, s.f.).....	22
Figura 5. Unidad de muestreo.....	31
Figura 6. Comparación de simulación con monitoreos: Barrer (sin ventilación). a) Tendencia de los experimentos de 5 minutos, b) Tendencia de los experimentos de 10 minutos, c) Tendencia de los experimentos de 15 minutos, d) Tendencia global de los experimentos.....	41
Figura 7. Simulación con ventilación para la actividad de barrer. ....	42
Figura 8. Comparación de simulación con monitoreos: Velas aromáticas (apagado mediante soplado). a) Tendencia de los experimentos sin ventilación, b) Tendencia de los experimentos con ventilación. ....	44
Figura 9. Comparación de simulación con monitoreos: Velas aromáticas (apagado mediante trapo húmedo). a) Tendencia de los experimentos sin ventilación, b) Tendencia de los experimentos con ventilación. ....	45
Figura 10. Comparación de simulación con monitoreos: Velas religiosas (apagado mediante soplado). a) Tendencia de los experimentos sin ventilación, b) Tendencia de los experimentos con ventilación. ....	46
Figura 11. Comparación de simulación con monitoreos: Velas de cera de cumpleaños (sin ventilación).....	47
Figura 12. Simulación con ventilación para el uso de velas de cera de cumpleaños. ....	47



Figura 13. Comparación de simulación con monitoreos: Velas pirotécnicas de cumpleaños. a) Tendencia de los experimentos sin ventilación, b) Tendencia de los experimentos sin ventilación. ....	48
Figura 14. Comparación de simulación con monitoreos: Ahuyentadores de mosquitos en espiral (sin ventilación).....	49
Figura 15. Simulación con ventilación para el uso de ahuyentadores de mosquitos en espiral. ....	50
Figura 16. Comparación de simulación con monitoreos: Incienso. a) Tendencia de los experimentos sin ventilación, b) Tendencia de los experimentos con ventilación. ....	51
Figura 17. Comparación de monitoreos con simulación: Difusor de aceites (sin ventilación). ....	52
Figura 18. Monitoreos sin ventilación de uso de difusor de aceites. ....	53
Figura 19. Cualificación de la CAI para la actividad de barrer. ....	55
Figura 20. Cualificación de la CAI para el uso de velas aromáticas (apagado mediante soplado). ....	55
Figura 21. Cualificación de la CAI para el uso de velas aromáticas (apagado mediante trapo húmedo).....	56
Figura 22. Cualificación de la CAI para el uso de velas religiosas (apagado mediante soplado). ....	57
Figura 23. Cualificación de la CAI para el uso de velas de cera de cumpleaños.....	58
Figura 24. Cualificación de la CAI para el uso de velas pirotécnicas de cumpleaños.....	58
Figura 25. Cualificación de la CAI para el uso de ahuyentadores de mosquito en espiral...59	59
Figura 26. Cualificación de la CAI para el uso de incienso. ....	60
Figura 27. Cualificación de la CAI para el uso de difusor de aceites (sin ventilación). ....	61
Figura 28. Página introductoria de SIMOCAI. ....	61
Figura 29. Menú de Inicio de SIMOCAI. ....	62
Figura 30. Presentación de simulaciones dentro de SIMOCAI.....	63



## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo el desarrollo de modelos para la simulación de la calidad del aire interior en base al comportamiento de los contaminantes  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  para actividades cotidianas como barrer, uso de velas, incienso, ahuyentadores de mosquitos y difusores de aceites. Para esto, se hizo uso del modelo de caja simple en dos etapas, considerando la emisión y deposición del contaminante. Se consolidó una base de datos en donde se recopiló información de investigaciones previas y monitoreos propios, la cual se utilizó para estimar las tasas de emisión y deposición de cada actividad.

Los resultados más relevantes mostraron que actividades necesarias como barrer generan concentraciones significativas de  $PM_{10}$  debido a la resuspensión, independientemente de la duración de la actividad. Por otro lado, actividades consideradas como malos hábitos, como el uso de velas pirotécnicas y ahuyentadores de mosquitos, emiten altas concentraciones de  $PM_{2.5}$ , que persisten en el ambiente y representan un riesgo para la salud. De igual manera, se observó que el método de apagado de velas aromáticas y religiosas influye en las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , siendo más elevadas al apagarlas soplando en comparación con el uso de un trapo húmedo. Adicionalmente, se observó que la presencia de ventilación durante las actividades reduce significativamente las concentraciones de PM, demostrando su efectividad en la mejora de la calidad del aire en interiores.

Estos hallazgos subrayan la importancia de comprender cómo las actividades cotidianas en espacios interiores impactan en la calidad del aire y, por ende, en la salud de las personas. Implementar medidas para reducir las concentraciones de PM al realizar estas actividades, como procurar que exista una buena ventilación y adoptar prácticas seguras al usar velas y otros productos emisores, es esencial para promover ambientes interiores saludables.



## 1. INTRODUCCIÓN

La calidad del aire hace referencia a la presencia en mayor o menor medida de contaminantes en la atmósfera que pueden ser nocivos para la salud humana, el ambiente y otros bienes de cualquier naturaleza (Vidal, 2020). La mala calidad del aire es una problemática que no se da exclusivamente en el exterior, también se da en espacios interiores y es un determinante de la calidad de vida y el bienestar de las personas. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), la calidad del aire en interiores (CAI) considera a la calidad del aire dentro y alrededor de las estructuras y edificaciones, es decir, es el grado de contaminación del aire en dichos espacios que está asociado a la afectación de la salud de sus ocupantes. La CAI es un tema de suma importancia, debido a que las personas pasan desde un 65% hasta un 87% de su tiempo en espacios interiores, por lo que el aire que se respire en estos espacios puede afectar su salud (Marta *et al.*, 2010; Carazo *et al.*, 2012; Morawaska *et al.*, 2017; Hasager *et al.*, 2021). Una mala calidad del aire interior da como resultado afecciones de salud no deseadas, que derivan desde un cansancio o ligera molestia hasta sintomatología de alergias, infecciones y/o cáncer, pudiendo llegar a la muerte en los peores escenarios (Mannan & Al-Ghamdi, 2021).

Si bien existen varios contaminantes a los que una persona puede estar expuesta al realizar actividades dentro de un espacio cerrado, el material particulado (PM, por sus siglas en inglés) es el que mayor impacto tiene sobre su salud (Carazo *et al.*, 2012). La contaminación por PM incluye partículas con diámetros iguales o menores a 10  $\mu\text{m}$ , llamadas  $\text{PM}_{10}$  y partículas finas con diámetros iguales o menores a 2.5  $\mu\text{m}$ , llamadas  $\text{PM}_{2.5}$  (Manisalidis *et al.*, 2020). Entre las principales fuentes de PM en interiores se encuentran fumar, cocinar (particularmente con el uso de biomasa como combustible), uso de incienso y velas para partículas finas ( $\text{PM}_{2.5}$ ), así como actividades de limpieza (como barrer), presencia de mascotas y movimientos de personas para partículas gruesas ( $\text{PM}_{10}$ ) (Vardoulakis *et al.*, 2020).



Existen instrumentos para la evaluación y predicción de la CAI que permiten establecer estrategias de protección a la salud de las personas, como el modelo de caja simple, el cual asume que los contaminantes emitidos dentro de la caja y los que entran a esta se mezclan uniformemente y de forma inmediata con el aire disponible para la dilución en un volumen de dimensiones finitas (Ramos *et al.*, 2015). Sin embargo, es importante destacar que existe desconocimiento de cómo las actividades que se realizan cotidianamente en espacios interiores (casas, oficinas, centros comerciales, etc.), ya sean actividades indispensables, necesarias o no necesarias, generan PM que deterioran la calidad del aire y consecuentemente la salud de las personas.

El objetivo principal de la presente investigación fue el desarrollo de modelos que permitieran realizar la simulación de la CAI para los contaminantes  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  para diferentes actividades cotidianas. La propuesta del modelo se basó en un modelo de caja simple en dos etapas para simular el comportamiento de la CAI, correspondiendo la primera etapa a la activación de la fuente (emisión) y la segunda a la supresión de esta (deposición). El modelo fue alimentado mediante la conformación de una base de datos con información obtenida de investigaciones previas y monitoreos propios. A partir de esta información, se estimaron las tasas de emisión y deposición de cada actividad. De igual manera, se identificaron las categorías de calidad del aire en las series temporales de las simulaciones, con la finalidad de mostrar cómo estas actividades impactan a la CAI y por consiguiente, la salud de las personas.



## 2. MARCO CONCEPTUAL

### 2.1. Calidad del aire en interiores

La calidad del aire en interiores hace referencia a la presencia de contaminantes dentro y alrededor de las estructuras y edificaciones, así como valores inadecuados de parámetros de confort, que están asociados a la afectación de la salud, el bienestar y la comodidad de sus ocupantes (EPA, 2023).

La mala calidad del aire en interiores es uno de los mayores riesgos que existen para la salud. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (2018), de los 7 millones de muertes provocadas anualmente por la exposición a partículas finas, cerca de 4 millones son por cuestiones de mala calidad del aire en espacios interiores. Aunado a esto, la EPA (2023) establece que las concentraciones en interiores pueden ser de 2 a 5 veces más altas que las del exterior.

El deterioro de la CAI se debe principalmente a las actividades que las personas realizamos en estos espacios, las cuales se pueden considerar como indispensables, necesarias y no necesarias. Las indispensables son aquellas que se llevan a cabo para satisfacer nuestras necesidades básicas, como cocinar y dormir. Las necesarias son las que se realizan en nuestro día a día para una buena calidad de vida, pero que, a diferencia de las indispensables, podríamos seguir con vida aun cuando no se realicen y entre las que se encuentran actividades de limpieza como barrer, sacudir y aspirar. Finalmente, las no necesarias son actividades que no son indispensables ni necesarias pero que realizamos por costumbres, tendencias sociales, cultura o religión y que se convierten en hábitos, como el uso de velas, incienso, ahuyentadores de mosquitos, entre otros.

## 2.2. Contaminantes del aire y sus efectos a la salud

Existen diversos contaminantes en el aire a los que una persona puede exponerse al realizar sus actividades en un espacio interior, siendo el PM de los más significativos debido a los efectos que tiene en la salud.

El PM comprende materia en fase sólida y/o líquida suspendida en el aire y que puede tener composición química variada dependiendo de su origen. Este se caracteriza de acuerdo con su tamaño en tres tipos (Figura 1): gruesas o PM<sub>10</sub> con diámetros  $\leq 10 \mu\text{m}$ , finas o PM<sub>2.5</sub> con diámetros  $\leq 2.5 \mu\text{m}$  y ultrafinas con diámetros  $\leq 0.1 \mu\text{m}$  (Hasager *et al.*, 2021). Éstas representan el 1%, 9% y 90% del total de partículas transportadas en el aire, respectivamente (TMF, s.f.).

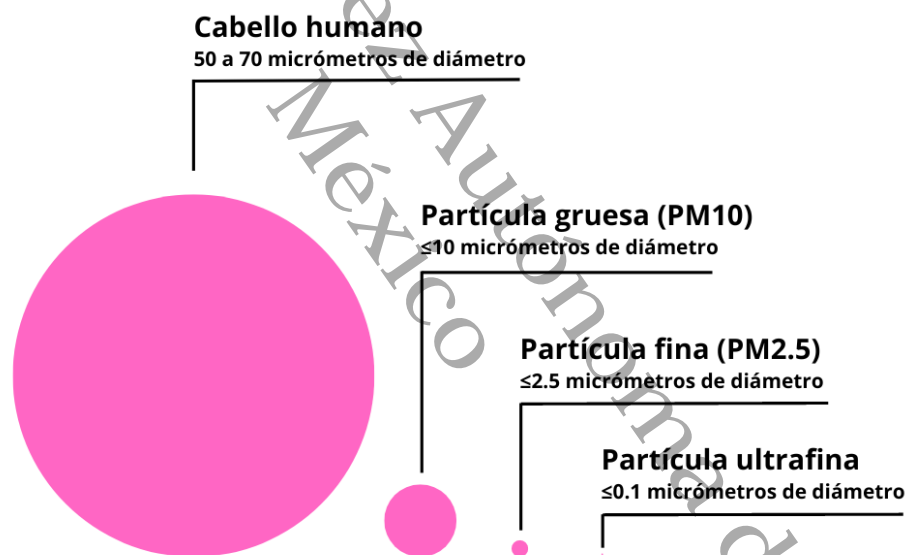


Figura 1. Comparación del tamaño de los tipos de PM.

El PM tiene efectos adversos en la salud de las personas, ya que su inhalación conduce al depósito de este en el tracto respiratorio y estos efectos dependen principalmente del tamaño de la partícula. Las partículas gruesas se depositan principalmente en el tracto respiratorio superior (nariz, cavidad nasal, boca, faringe y laringe) y sus efectos agudos en la salud están asociados principalmente con el



empeoramiento de enfermedades respiratorias, principalmente del asma y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC). Sus efectos crónicos pueden estar relacionados con mortalidad por enfermedades respiratorias (California Air Resources Board, 2023).

Por otro lado, las partículas finas y ultrafinas penetran profundamente en los pulmones depositándose en el tracto respiratorio inferior y los alveolos, donde introducen sustancias químicas extrañas directamente en el torrente sanguíneo, comprometiendo a cualquier órgano del cuerpo (Hasager *et al.*, 2021). Los efectos agudos de estas partículas están asociados con aumento de admisiones hospitalarias por causas cardíacas o pulmonares, bronquitis aguda y crónica, ataques de asma y restricción en la realización de actividades cotidianas. Sus efectos crónicos han sido relacionados con muertes prematuras, principalmente en personas que padecen enfermedades cardíacas o pulmonares crónicas, así como con reducción del crecimiento de la función pulmonar en niños (California Air Resources Board, 2023).

### 2.3. Modelación de la calidad del aire

Los modelos de transporte y destino de contaminantes en el aire son una herramienta útil para evaluar el impacto en la calidad del aire de nuevas fuentes de contaminación. Uno de los modelos más usados para evaluar la calidad del aire interior es el modelo de caja simple, el cual supone que los contaminantes emitidos se mezclan uniformemente en un volumen o caja de aire de dimensiones finitas y que las emisiones dentro de la caja y las que ingresan a esta se mezclan inmediatamente y por completo con el aire disponible para la dilución. Además, por simplicidad se considera que los contaminantes son químicamente estables y que permanecen en el aire (Ramos *et al.*, 2015).



La Figura 2 muestra una caja rectangular para el estudio de la calidad del aire, en donde  $C_e$  denota la concentración del contaminante que entra a través de una pared de la caja con dimensiones  $B \times H$  como una corriente de viento de velocidad  $u$  y que saldrá por una pared opuesta cruzando la caja de longitud  $L$ . Además, dentro de la caja existe una o varias fuentes que emiten más contaminante con una tasa de emisión por unidad de área ( $q_e$ ) dentro de la caja, siendo  $C$  la concentración dentro de la caja en el tiempo  $t$ .

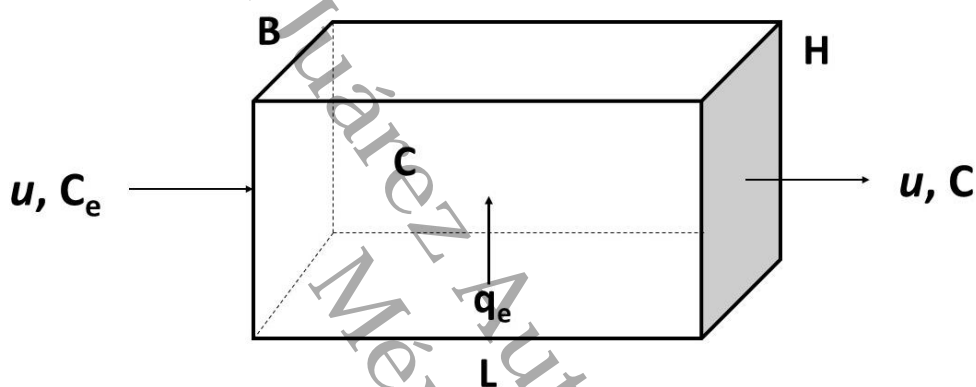


Figura 2. Diagrama del volumen de control para el modelo de caja simple (Ramos et al., 2015).

El principio de balance de masa aplicado a volúmenes de control se describe en la ecuación 1:

$$\text{Acumulación} = \text{entradas} - \text{salidas} + \text{fuentes} - \text{sumideros} \quad (1)$$

En donde se puede observar la influencia que tiene la contaminación del aire exterior (entradas), la ventilación (salidas), así como todas aquellas actividades realizadas en el interior del sitio de estudio (fuentes y/o sumideros).



El comportamiento típico del PM cuando se realiza una actividad que genera una emisión se muestra en la Figura 3.

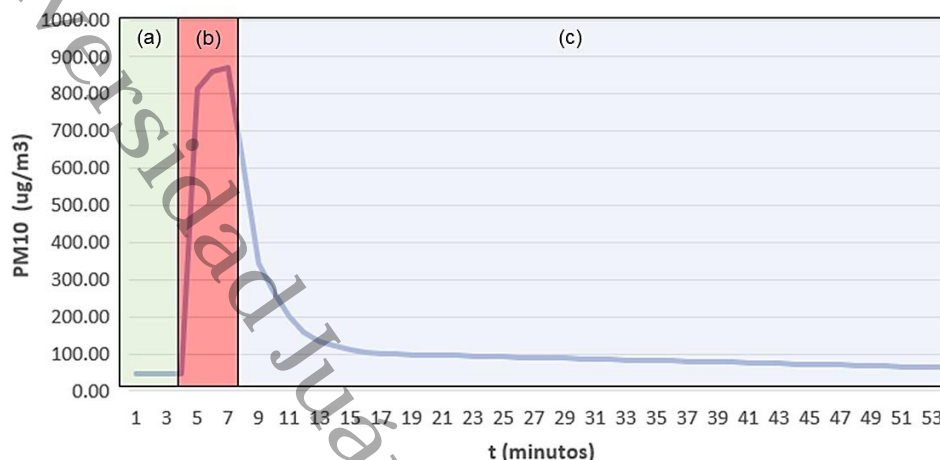


Figura 3. Comportamiento típico del PM cuando se activa una fuente.

La zona (a), conocida como concentración de fondo, representa la concentración inicial de PM que hay en el interior debido principalmente a las concentraciones que ingresan del exterior.

En la zona (b) se muestra el efecto del PM emitido al aire al momento de realizar una actividad (activar la fuente). Este efecto en ocasiones puede tener un retardo y una duración que va en función de la tasa de emisión y del volumen de dilución.

Por último, la zona (c) se conoce como retorno y en esta la fuente ha sido deshabilitada y el PM tiende a bajar hasta sus niveles iniciales, principalmente por procesos de deposición y transporte.

La ecuación 1 considera que las tasas de emisión ( $q_e$ ) y deposición ( $q_d$ ) son continuas y permanentes. Sin embargo, cuando la tasa de emisión es mucho mayor que la tasa de deposición, la ecuación 1 puede describir el comportamiento de la zona b considerando que  $q_d = 0$ . De igual manera, cuando ya se ha suprimido la



fuente, la zona c será descrita bajo la consideración de que  $q_e = 0$  (Ramos *et al.*, 2015).

## 2.4. Ventilación en espacios interiores

La ventilación se puede definir como el proceso de intercambio o reemplazo de aire en cualquier espacio para proporcionar una buena CAI y que implica control de temperatura, reposición de oxígeno y eliminación de humedad, olores, humo, calor, polvo, bacterias en el aire, dióxido de carbono y otros gases. El efecto principal de la ventilación es la dilución de los contaminantes del aire interior y, eventualmente, su eliminación mediante filtración o su liberación al aire libre. Esta se puede lograr de dos formas generales: mecánica o natural (Hasager *et al.*, 2021).

La ventilación mecánica se basa en unidades de tratamiento de aire, como los ventiladores, los cuales suministran aire exterior a un edificio y que también pueden proporcionar filtración, deshumidificación y acondicionamiento del aire suministrado (Hasager *et al.*, 2021).

La ventilación natural está impulsada por las diferencias de presión que se producen naturalmente dentro y alrededor de los edificios. El gradiente de presión de total depende del viento entre zonas (interior y exterior, por ejemplo) y de la diferencia de altura entre entradas y salidas. Este tipo de ventilación aprovecha el comportamiento de los fluidos para canalizar el aire a través de aberturas en los edificios (Hasager *et al.*, 2021).

## 2.5. Velocidad del viento

La velocidad del viento se puede medir a partir de la escala de Beaufort, patrón internacional desarrollado por el almirante británico Sir Francis Beaufort en el siglo XIX, la cual está basada en observaciones visuales de los efectos del viento en la superficie terrestre y en el mar. Esta consta de 13 categorías clasificadas de acuerdo



con estos efectos observados, y que van desde la calma completa hasta el huracán (Pastor, s.f.). En la Tabla 1 se presentan cada una de las categorías representativas de esta escala.

Tabla 1. *Categorías representativas de la escala de Beaufort, y sus efectos en el mar y la superficie terrestre.*

Cifra	Nombre	Velocidad			Efectos en alta mar	Efectos en tierra
		nodos	m/s	km/h		
0	Calma	1	0-0.2	1	Mar como un espejo.	El humo asciende verticalmente.
1	Ventolina	1-3	0.3-1.5	1-5	Pequeñas olas, pero sin espuma.	La dirección del viento se reconoce por el humo, pero no por las banderas.
2	Flojito	4-6	1.6-3.3	6-11	Pequeñas olas con crestas de apariencia vítrea, sin romperse.	Se mueven las hojas de los árboles.
3	Flojo	7-10	3.4-5.4	12-19	Pequeñas olas con crestas rompientes; espuma de aspecto vítreo que surge de forma aislada.	Las hojas de los árboles se agitan constantemente.
4	Bonancible – Moderado	11-16	5.5-7.9	20-28	Pequeñas olas creciendo.	Se mueven las ramas pequeñas de los árboles.
5	Fresquito	17-21	8-10.7	29-38	Olas medianas alargadas.	Se mueven los árboles pequeños.
6	Fresco	22-27	10.8-13.8	39-49	Se forman olas grandes y crestas de espuma blanca.	Se mueven las ramas grandes; los paraguas se usan con dificultad.
7	Frescachón	28-33	13.9-17.1	50-61	Mar gruesa, con espuma blanca procedente de las olas arrastrada por el viento.	Es difícil caminar contra el viento; todos los árboles están en movimiento.
8	Temporal	34-40	17.2-20.7	62-74	Olas de altura media y más alargadas; en el borde superior de las mismas ya se	Es difícil caminar contra el viento; se rompen las ramas delgadas de los árboles.



**Modelo para el comportamiento temporal del material particulado debido a actividades cotidianas en interiores**



					perciben torbellinos de las salpicaduras.	
9	Temporal fuerte	41-47	20.8-24.4	75-88	Grandes olas; las crestas de las olas rompen reduciéndose la visibilidad con las salpicaduras.	Se derriban chimeneas y se levantan las tejas.
10	Temporal duro	48-55	24.5-28.4	89-102	Olas muy grandes con largas crestas empenachadas; a espuma se aglomera en grandes bancos haciendo que la superficie sea blanca; visibilidad reducida.	La fuerza del viento arranca los árboles.
11	Temporal muy duro	56-63	28.5-32.6	103-117	Olas de altura excepcional, (se pueden perder de vista tras ellas barcos de tonelaje pequeño y medio); mar cubierta de espuma y visibilidad reducida.	Daños abundantes en construcciones, tejados y árboles.
12	Temporal huracanado	>64	>32.7	>118	Aire lleno de espuma, salpicaduras, mar cubierto de espuma; visibilidad muy reducida.	Destrucciones abundantes, daños y lluvias.

De "La Escala Beaufort", por Xunta de Galicia, s.f. ([https://www.meteogalicia.gal/web/informacion/glosario/beaufort.action?request\\_locale=es](https://www.meteogalicia.gal/web/informacion/glosario/beaufort.action?request_locale=es))

## 2.6. Clasificación de PM según su proceso de formación y tamaño

El tamaño aerodinámico de las partículas está determinado por los procesos de su formación. Comúnmente, se emplea una clasificación que incorpora tanto los procesos de formación como el tamaño de las partículas, dividiéndolas en diferentes "modas" que se conocen como modas de nucleación, Aitken, de acumulación y gruesa (Figura 4), y que se describen a continuación (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2011).

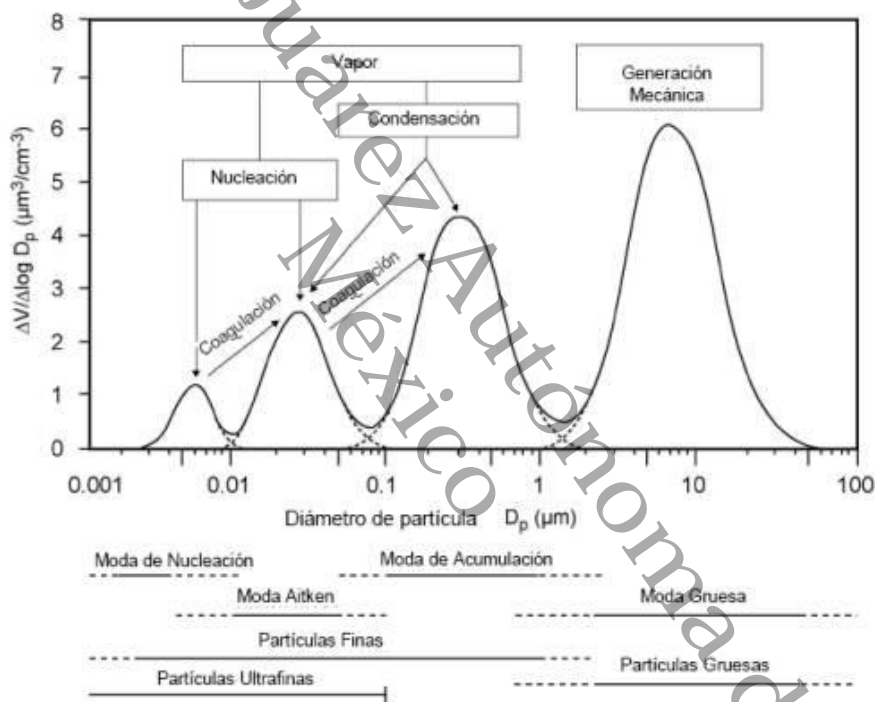


Figura 4. Clasificación de partículas por su proceso de formación y tamaño (Junta de Andalucía, s.f.)

**Moda de nucleación (<0.02  $\mu\text{m}$ ):** se forma principalmente a partir de la condensación de vapores. Su formación está influenciada por factores como la presión, la temperatura, la humedad relativa y la concentración de vapor (nucleación homogénea). Sin embargo, en este proceso también pueden intervenir otras partículas finas presentes, que se adhieren a las gotas de vapor formadas por la



concentración de este (nucleación heterogénea). Estas partículas nucleadas tienen una vida media corta (de solo algunas horas), ya que se coagulan o aumentan de tamaño rápidamente debido a la condensación de otras sustancias sobre ellas (SEMARNAT, 2011).

**Moda Aitken (0.02 – 0.1  $\mu\text{m}$ ):** estas partículas pueden ser de origen primario, es decir, emitidas a la atmósfera por procesos naturales o antrópicos. También pueden ser de origen secundario, formadas como resultado del crecimiento de partículas nucleadas (por ejemplo, por coagulación), por condensación o por reacciones en fase líquida (a través de compuestos inorgánicos). Estas partículas permanecen en la atmósfera por un período más prolongado que las de la moda de nucleación. Su concentración se ve fuertemente influenciada por actividades humanas y es aproximadamente cien veces mayor a nivel de la calle en áreas urbanas en comparación con zonas remotas (SEMARNAT, 2011).

**Moda de acumulación (0.1 – 1  $\mu\text{m}$ ):** surge como resultado del crecimiento de partículas pertenecientes a la moda Aitken, principalmente a través de reacciones en fase líquida que ocurren en las gotas de las nubes. Estas partículas permanecen en la atmósfera durante un largo periodo de tiempo, dado que los procesos de eliminación son menos eficaces en este rango de tamaños. Por lo tanto, se pueden emplear como indicadores o trazadores del transporte de partículas de largo alcance. Además, las partículas de este tamaño tienen efectos ópticos dominantes, ya que tienen una gran eficiencia para dispersar la luz, lo que afecta la visibilidad (SEMARNAT, 2011).

**Moda gruesa (>1  $\mu\text{m}$ ):** se forma principalmente a través de procesos mecánicos, como la erosión de la superficie terrestre (materia mineral u otros materiales) o la ruptura de burbujas en la superficie de mares y océanos (aerosoles marinos). Esta moda gruesa se caracteriza por tener un número reducido de partículas, pero una masa considerablemente elevada (SEMARNAT, 2011).



## 2.7. Normas de referencia

Dado que la contaminación del aire trae consigo efectos adversos para la salud, es importante mantener a la población informada sobre la situación de la calidad del aire, para que de esta manera puedan tomar las medidas necesarias para reducir su exposición a los contaminantes atmosféricos y reducir los posibles riesgos a la salud.

El Índice Aire y Salud, establecido en la norma oficial mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, es una herramienta que permite informar de manera clara y oportuna el estado de la calidad del aire, los posibles daños que ocasionan los contaminantes criterio ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$  y  $CO$ ) y las medidas que la población puede tomar para reducir la exposición.

Para esto, el Índice Aire y Salud está compuesto de cinco bandas asociadas a cinco colores (verde, amarillo, naranja, rojo y morado) que cualifican a la calidad del aire como buena, aceptable, mala, muy mala y extremadamente mala y que, a su vez, tienen un nivel del riesgo a la salud asociado, definidos como bajo, moderado, alto, muy alto y extremadamente alto, respectivamente. En la Tabla 2 se muestran estas categorías con sus riesgos asociados, para los contaminantes  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ .

Tabla 2. *Categorías del índice Aire y Salud (NOM-172-SEMARNAT-2019).*

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de $PM_{2.5}$ ( $\mu g/m^3$ )	Intervalo de $PM_{10}$ ( $\mu g/m^3$ )	Descripción del riesgo (con base en PM)
Buena	Bajo	25	50	Se considera que el riesgo es mínimo o nulo.
Aceptable	Moderado	>25 y 45	>50 y 75	Posible agravamiento de enfermedad pulmonar y cardiaca en personas con enfermedad cardiopulmonar y adultos mayores.
Mala	Alto	>45 y 79	>75 y 155	Probabilidad de disminución en la capacidad pulmonar de personas sanas. Incremento en la probabilidad de aparición de síntomas respiratorios en personas sensibles.



				En personas con enfermedades respiratorias y cardiacas, hay aumento en la probabilidad de agravamiento y disminución en la tolerancia de la actividad física, así como mayor probabilidad de muertes prematuras en personas con enfermedad cardiaca o pulmonar.
Muy Mala	Muy Alto	>79 y 147	>155 y 235	Mayor probabilidad de presencia de síntomas respiratorios en población general. Agravamiento de síntomas respiratorios en poblaciones sensibles. Incremento en síntomas cardiovasculares, como dolor precordial, en personas enfermas del corazón, así como mayor probabilidad de muertes prematuras en personas con enfermedad cardiaca o pulmonar.
Extremadamente Mala	Extremadamente Alto	>147	>235	Incremento en la probabilidad de síntomas severos respiratorios en población general. Serios efectos respiratorios y agravamiento de síntomas en personas sensibles (niños, adultos mayores, persona con deficiencias nutricionales) y en personas con enfermedad pulmonar (asma y EPOC). Agravamiento de síntomas cardiovasculares en enfermos del corazón (como angina de pecho) e incremento en la probabilidad de muerte prematura en personas con enfermedad pulmonar y cardiaca.

Adaptado de "Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud", en NOM-172-SEMARNAT-2019.



La NOM-172-SEMARNAT-2019, para el caso de PM, se basa en la NOM-025-SSA1-2014 que establece los valores límite permisibles para la concentración de partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en el ambiente y los criterios para su evaluación.

La NOM-025-SSA1-2014 ha sido actualizada a NOM-025-SSA1-2021. Sin embargo, las actualizaciones realizadas a la norma no afectan a la NOM-172-SEMARNAT-2019.



### 3. MARCO REFERENCIAL

Debido a que las personas pasamos hasta un 87% de nuestro tiempo en espacios interiores (Hasager *et al.*, 2021), la mala calidad del aire en estos lugares es un tema de interés, siendo el PM uno de los contaminantes más estudiados debido a los efectos a la salud que provoca, tales como enfermedades cardiovasculares, afecciones al sistema inmunológico y sistema respiratorio, pudiendo llegar hasta la muerte en el peor de los escenarios (Manisalidis *et al.*, 2020).

Las actividades que se realizan en interiores pueden alterar significativamente las concentraciones de fondo de un contaminante. De acuerdo con Vardoulakis *et al.* (2020), entre las principales actividades realizadas en interiores que generan grandes concentraciones de PM se encuentran fumar, cocinar, combustión de inciensos y velas y uso de insecticidas para PM<sub>2.5</sub>, así como actividades de limpieza, presencia de mascotas y el desplazamiento de las personas para PM<sub>10</sub>.

Ongwandee & Pipithakul (2013) caracterizaron las emisiones de PM<sub>2.5</sub> provenientes del uso de inciensos, insecticidas en espiral y velas de carácter religioso, encontrando que las tasas de emisión de los inciensos e insecticidas en espiral llegaron a ser de 1 a 2 veces más altos que los obtenidos para las velas, además de que el uso de velas produjo 70-75 veces menos PM<sub>2.5</sub> que la combustión de incienso e insecticidas en espiral. Esto se debió principalmente a que las velas tienen tasas de combustión rápidas y sus factores de emisión son bajos, así como que las partículas generadas por los inciensos e insecticidas en espiral provienen de la combustión incompleta de biomasa, material base de estos.

Numerosas investigaciones mencionan que la ventilación juega un papel muy importante en la CAI, ya que influye en las concentraciones de los contaminantes en estos espacios. Una mala ventilación propicia la acumulación de PM causando un incremento en sus concentraciones, mientras que el aumento en las tasas de ventilación puede mitigar la exposición de las personas a estas altas concentraciones



(Ongwandee & Pipithakul, 2013; Branco *et al.*, 2014; García & Magaña, 2018; Magaña *et al.*, 2021). De esta manera, el principal propósito de la ventilación es diluir los contaminantes presentes en el aire interior para finalmente eliminarlos mediante filtración o liberándolos al exterior (Hasager *et al.*, 2021). Sin embargo, se ha demostrado que a pesar de la influencia que tiene la ventilación en la CAI, el área y la arquitectura pueden favorecer la dilución de los contaminantes, permitiendo que la CAI no se degrade significativamente aun cuando no se cuente con una buena ventilación (Magaña *et al.*, 2021).

Las actividades de limpieza contribuyen significativamente al deterioro de la CAI, principalmente mediante el aporte de PM al ambiente. La realización de actividades como barrer aportan altas cantidades de PM<sub>10</sub>, pudiendo alcanzar concentraciones máximas de hasta 4.2 veces las concentraciones de fondo en condiciones con ventilación (Navarro, 2019).

Armenta (2021) observó que, durante el uso de aromatizantes en aerosol, en los últimos minutos de muestreo se presenta un incremento en la cantidad de partículas, suceso que puede deberse a que las partículas finas sufren aumento de tamaño debido a procesos como la reacción de gases en o sobre las partículas, así como la evaporación de aerosoles.



## 4. OBJETIVOS

### 4.1. Objetivo general

Modelar la calidad del aire debido a actividades de limpieza, combustión de velas e incienso, ahuyentadores de mosquitos y uso de aromatizantes dentro del hogar, para los contaminantes  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ .

### 4.2. Objetivos específicos

- Conformar una base de datos con información de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  debida a actividades de barrer, uso de velas, incienso, ahuyentadores de mosquitos y aromatizantes realizadas en espacios interiores, obtenida en muestreos propios e investigaciones previas.
- Estimar las tasas de emisión y deposición de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  para las actividades de estudio.
- Calibrar y validar modelos específicos para la simulación del comportamiento de la calidad del aire en interiores por cada fuente.
- Diseñar una interfaz en Microsoft Excel para la simulación del comportamiento del PM para diferentes volúmenes, tiempos de activación de fuente y ventilación.



## 5. METODOLOGÍA

El trabajo de investigación se realizó en seis etapas: 1) Muestreo de PM, 2) Conformación de la base de datos, 3) Estimación de tasas de emisión y deposición, 4) Calibración y validación de modelos, 5) Cualificación de la calidad del aire y 6) Diseño de interfaz.

### 5.1. Muestreo de PM

Para la obtención de los parámetros del modelo, tales como tasas de emisión y deposición y duración del pico, se realizaron muestreos de las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> sin ventilación para las actividades de barrer y combustión de velas (religiosas y aromáticas) y con ventilación para combustión de incienso y velas (pirotécnicas, religiosas y aromáticas) y uso de difusor de aceites.

Para la realización de estos monitoreos, se construyó una caja de madera con volumen de 4.68 m<sup>3</sup> (1.23 m de ancho, 1.84 m de largo y 2.07 m de altura) que simula una habitación (Figura 5; Anexo I). El motivo de estas dimensiones es que se procuró construir una caja pequeña en la que se pudiera asegurar la deposición del PM, pero que fuera lo suficientemente grande para que no se comprometiera la seguridad del equipo y se pudieran realizar de forma adecuada las actividades dentro de la unidad, principalmente las actividades de barrer y uso de velas pirotécnicas. De igual manera, durante la construcción de la unidad, se procuró cortar el material lo menos posible para reducir la generación de PM, por lo que se respetaron las dimensiones de las tiras de madera compradas.



Figura 5. *Unidad de muestreo.*

Durante los monitoreos, se midió la concentración de PM antes, durante y después de realizada la actividad con un fotómetro de dispersión de 90° (modelo 3M EVM-07 con flujo de aire de 1.67 L/min y con rango de tamaño de partículas de 2.5  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ ), situado a la altura de la nariz de una persona con estatura promedio en México, que es de aproximadamente 1.63 m (Pérez-Sastré & Ortiz-Hernández, 2021). Antes de iniciada la actividad, se midió la concentración de PM durante varios minutos para establecer la concentración de fondo ( $C_0$ ) dentro de la unidad de muestreo. Para cada fuente se realizaron un mínimo de tres muestreos y la duración de estos fue variable y estuvo determinada principalmente por los tiempos de retorno.

Para la realización de los monitoreos, las fuentes de emisión se situaron a 97 cm del nivel del suelo y a una distancia de 1 m al fotómetro, a excepción de las velas pirotécnicas que, por seguridad, fueron situadas a 60 cm del suelo. Las velas aromáticas y religiosas se mantuvieron encendidas durante 30 minutos mientras que, en el caso del incienso y las velas pirotécnicas, estos se consumieron en su



totalidad, teniendo tiempos de duración de aproximadamente 45 minutos y 45 segundos, respectivamente. Para los monitoreos de la actividad de barrer, esta se realizó alrededor del equipo durante 5, 10 y 15 minutos.

En el caso del difusor de aceites, se utilizó un difusor-humidificador modelo DQ-107 con un volumen de aspersión de 30-45 ml/h, en el que se colocaron 100 ml de agua con 10 gotas de aceite esencial, manteniéndose encendido durante una hora.

Para analizar la influencia del método de apagado en el comportamiento del  $PM_{2.5}$  durante el uso de velas, se analizaron dos métodos diferentes de apagado: soplar y uso de trapo húmedo para las velas aromáticas, y soplar para velas religiosas.

Para la realización de los monitoreos con ingreso de aire, se abrieron por completo la puerta y la ventana de la unidad de muestreo. El viento fue inducido mediante un ventilador, el cual fue colocado en la ventana y alcanzó velocidades de viento de 0.8 m/s a 1.2 m/s. Las velocidades de viento fueron medidas con un anemómetro modelo UT363BT, el cual cuenta con conectividad Bluetooth para realizar el registro de datos a través de una aplicación móvil.

## 5.2. Conformación de la base de datos

Para la simulación de la CAI, se conformó una base de datos con la información obtenida de los experimentos, así como información de investigación conjunta (Martínez *et al.*, 2023). Para esta última, se realizó un análisis de la cantidad y calidad de los datos recopilados con base en el Protocolo de Manejo de Datos de la Calidad del Aire del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, s.f.), determinando así la información que nos fue útil para la modelación. De esta manera, con la información recabada se obtuvieron las tasas de emisión y deposición, así como la duración del pico.



## 5.3. Estimación de tasas de emisión y deposición

### 5.3.1. Tasas de emisión

La estimación de las tasas de emisión se sustentó en el comportamiento típico del PM cuando se activa una fuente (Figura 3).

Al considerarse en la etapa de emisión un modelo de caja simple cerrado sin entradas ni salidas y que la acumulación de PM dentro del volumen se debe únicamente a la fuente activa, la ecuación de balance de masa se simplifica:

$$V \frac{dC}{dt} = q_e \quad (2)$$

Siendo  $V$  el volumen de control y  $q_e$  la tasa de emisión.

Al resolver la ecuación 2 con las condiciones  $C(0) = C_0$  y  $C(t) = C_p$ , donde  $t = 0$  corresponde al inicio de la zona (b) y  $t$  el final, se obtiene  $q_e$ :

$$q_e = \frac{C_p - C_0}{t} V \quad (3)$$

A partir de la ecuación 3 se estimaron las tasas de emisión, considerando que  $C_p$  es la concentración promedio de la zona (b),  $C_0$  es la concentración de fondo,  $t$  es el lapso de permanencia en la zona (b) y  $V$  es el volumen.

Debido a que el modelo de caja simple considera una fuente continua, para el caso de las velas pirotécnicas que liberan PM<sub>2.5</sub> durante 45 segundos aproximadamente pero que se mantienen las concentraciones muy altas durante 6 minutos, se estimó  $q_e$  mediante la ecuación 4:

$$q_e = \frac{\text{masa liberada}}{6} \quad (4)$$

La masa liberada se estimó considerando la concentración de PM<sub>2.5</sub> en el pico ( $C_p$ ) y el volumen de la unidad de muestreo, expresado en la ecuación 5:



$$\text{masa liberada} = C_p V \quad (5)$$

### 5.3.2. Tasas de deposición

Para la obtención de las tasas de deposición, estas fueron estimadas inicialmente a través de la obtención de los tiempos de retorno de cada experimento. El tiempo de retorno ( $t_r$ ) es el tiempo que tarda el PM en regresar a las concentraciones de fondo una vez que la fuente fue deshabilitada y el PM alcanzó un nivel máximo.

Tomando en consideración la integridad del equipo, cada experimento tuvo un tiempo máximo de cuatro horas. Si en este periodo no se obtenían las concentraciones de fondo, el tiempo de retorno se obtuvo mediante regresiones exponenciales y logarítmicas.

Con estos tiempos de retorno, las tasas de deposición se estimaron considerando el modelo de balance de masa cuando la fuente ha sido suprimida mediante la ecuación 6.

$$q_d = \frac{c_{\text{máx}} - c_0}{t_r} V \quad (6)$$

## 5.4. Calibración y validación de modelos

### 5.4.1. Modelo de caja simple en dos etapas

Para describir el comportamiento del PM de las distintas actividades de estudio, se utilizó el modelo de caja simple considerando los siguientes ajustes:

1. Se consideró un modelo en dos etapas (emisión y deposición), en donde se parte del supuesto que cuando la fuente está activa se considera como emisión y que al momento de suprimirla comienza la deposición.
2. Se consideraron fracciones de las paredes de entrada y salida para las simulaciones con ingreso de aire. Es decir, el modelo supone que el aire del



exterior entra/sale por una ventana/puerta que corresponde a una fracción de la pared completa.

3. En la segunda etapa del modelo se considera que la deposición del PM depende de la concentración de este en ese instante.

A pesar de que se estimaron las tasas de deposición, debido a los tiempos prolongados de retorno, estas no se pudieron ajustar a una tasa constante por lo que ya no fueron consideradas para el modelo.

De esta manera, la ecuación de balance de masa para un volumen de control es:

$$V \frac{dC}{dt} = uBHC_e + q_e - uCBH \quad (7)$$

Resolviendo la ecuación 7 y con las tasas de emisión obtenidas y considerando un sistema abierto, se simuló el comportamiento del PM para volúmenes y condiciones de viento diferentes para cada una de las actividades mediante la ecuación 8:

$$C(t) = \delta(t) \left[ C_0 e^{-\frac{\alpha_s ut}{L}} + \left( \frac{\alpha_e}{\alpha_s} C_e + \frac{q_e}{\alpha_s uBH} \right) \left( 1 - e^{-\frac{\alpha_s ut}{L}} \right) \right] + (1 - \delta(t)) \left[ C(t_a) e^{-\frac{\alpha_s ut}{L}} + C_0 \left( 1 - e^{-\frac{\alpha_s ut}{L}} \right) \right] \quad (8)$$

Siendo  $u$  la velocidad del viento,  $L$ ,  $B$  y  $H$  el largo, ancho y alto de la caja, respectivamente,  $q_e$  la tasa de emisión,  $C_0$  la concentración inicial de PM en el interior y  $C_e$  la concentración en el exterior.  $\delta(t)$  hace referencia a cada una de las etapas del modelo, considerando:

$$\delta(t) \begin{cases} 1 & t \leq t_a \text{ (fuente activa)} \\ 0 & t > t_a \text{ (fuente desactivada)} \end{cases}$$

En donde  $t_a$  se refiere al tiempo de fuente activa. La ecuación 8 corresponde a un área (cuarto) con dimensiones  $V = L \times B \times H$  en el que se tienen las ventanas abiertas y se hace la suposición de que ocurre una ventilación cruzada, es decir, el viento ingresa por una ventana o puerta en una pared y sale por otra pared opuesta.



De igual manera, se considera que cuando hay entrada y salida de viento, este no lo hace por toda el área de la pared sino solo por una fracción de esta (ya sea la ventana o puerta), por lo que  $\alpha_e$  representa la fracción de entrada de aire y  $\alpha_s$  la fracción de salida.

Para las simulaciones en las que se considera un sistema cerrado, pero en el que existen infiltraciones de aire debido a que el volumen no es completamente hermético, se utilizó la ecuación 9, en donde se descartan las fracciones de entrada y salida de aire y se utilizan valores de  $u$  muy pequeños (entre 0 m/s y 0.2 m/s) para simular vientos en calma.

$$C(t) = \delta(t) \left[ C_0 e^{-\frac{ut}{L}} + \left( C_e + \frac{q_e}{uBH} \right) \left( 1 - e^{-\frac{ut}{L}} \right) \right] + (1 - \delta(t)) \left[ C(t_a) e^{-\frac{ut}{L}} + C_0 \left( 1 - e^{-\frac{ut}{L}} \right) \right] \quad (9)$$

Sin embargo, se observó que la etapa de deposición en las simulaciones con ventilación no se comportaba de forma similar a la tendencia de las series temporales obtenidas mediante los experimentos. Debido a esto, y para calibrar el modelo se introdujo un factor adimensional empírico ( $\epsilon$ ) en la exponencial en la etapa de deposición que permitió realizar este ajuste (ecuación 10).

$$C(t) = \delta(t) \left[ C_0 e^{-\frac{\alpha_s ut}{L}} + \left( \frac{\alpha_e}{\alpha_s} C_e + \frac{q_e}{\alpha_s uBH} \right) \left( 1 - e^{-\frac{\alpha_s ut}{L}} \right) \right] + (1 - \delta(t)) \left[ C(t_a) e^{-\frac{\alpha_s ut}{\epsilon L}} + C_0 \left( 1 - e^{-\frac{\alpha_s ut}{\epsilon L}} \right) \right] \quad (10)$$

Para el caso del difusor de aceites, debido a que se observó que el proceso de deposición comenzaba unos minutos antes de que se apagara la fuente, este factor adimensional empírico ( $\epsilon$ ) se introdujo tanto en la etapa de emisión como de deposición (ecuación 11).



$$C(t) = \delta(t) \left[ C_0 e^{-\frac{ut}{\varepsilon L}} + \left( C_e + \frac{q_e}{uBH} \right) \left( 1 - e^{-\frac{ut}{\varepsilon L}} \right) \right] + (1 - \delta(t)) \left[ C(t_a) e^{-\frac{ut}{\varepsilon L}} + C_0 \left( 1 - e^{-\frac{ut}{\varepsilon L}} \right) \right] \quad (11)$$

## 5.5. Cualificación de la calidad del aire

Para enfatizar el deterioro de la CAI debido a las actividades estudiadas, esta se evaluó con respecto a las concentraciones de PM obtenidas en las simulaciones, identificando las categorías de calidad del aire en las series temporales.

Debido a que no existe normatividad en México para la regulación de la CAI, se utilizaron como referencia los valores límite permisibles establecidos por el Índice Aire y Salud en la NOM-172-SEMARNAT-2019 y las categorías que los cualifican. De igual manera, se obtuvieron los tiempos en los cuales se alcanzan estas categorías, haciendo énfasis en las categorías de mala, muy mala y extremadamente mala debido a los riesgos a la salud asociados con estas.

## 5.6. Diseño de interfaz

Para simular el comportamiento del PM para las diferentes actividades de estudio, se diseñó una hoja de cálculo interactiva en Microsoft Excel, en donde se puede experimentar con datos como la ventilación, el tipo de actividad realizada, las dimensiones del lugar y el tiempo de duración de la actividad, para mostrar cómo se comportaría la CAI en esos casos.



## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se muestran los resultados de los monitoreos realizados, las tasas de emisión y deposición obtenidos, la modelación del comportamiento de PM para cada una de las actividades estudiadas y la cualificación de la CAI en las series temporales de las simulaciones.

### 6.1. Obtención de tasas de emisión y deposición

Después de la conformación de la base de datos, las tasas de emisión y deposición obtenidas para cada una de las actividades analizadas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. *Tasas de emisión y deposición estimados para cada actividad.*

Fuente	$q_e$ ( $\mu\text{g}/\text{min}$ )	$q_d$ ( $\mu\text{g}/\text{min}$ )
Barrer	306.38	90.00
Incienso	55.50	41.86
Velas pirotécnicas de cumpleaños	3875.30	841.03
Velas de cera de cumpleaños	578.70	51.67
Velas aromáticas - Soplar (etapa 1)	2.25	5.98
Velas aromáticas - Soplar (etapa 2)	38.07	
Velas aromáticas - Trapo húmedo (etapa 1)	2.40	1.54
Velas aromáticas - Trapo húmedo (etapa 2)	4.50	
Velas religiosas - Soplar (etapa 1)	0.65	0.43
Velas religiosas - Soplar (etapa 2)	23.46	
Ahuyentador de mosquitos en espiral	775.50	64.42
Difusor de aceites	120.00	47.67

Es relevante destacar que las tasas de deposición no fueron utilizadas para la modelación, debido a que no se ajustaban a una tasa constante debido a los tiempos prolongados de retorno de los experimentos.



## 6.2. Validación y modelación de la CAI

A continuación, se presentan las simulaciones obtenidas de la modelación de la CAI comparadas con los monitoreos realizados para cada una de las actividades analizadas. Para las actividades en las que no se realizaron monitoreos propios, las simulaciones fueron comparadas con la información de los monitoreos del Ingeniero Ambiental José Antonio Martínez de Dios, los cuales fueron llevados a cabo de igual forma en la unidad de muestreo utilizada para el presente trabajo.

Las simulaciones se realizaron utilizando las mismas condiciones de  $C_0$  y  $u$  (en el caso de las simulaciones con ventilación) obtenidas en los monitoreos, así como las mismas dimensiones de la unidad de muestreo.

Para la comparación entre monitoreos y simulación, solo se tomaron los datos de los monitoreos a partir de cuando la fuente estaba activa, graficando cada experimento con el mismo valor de  $C_0$  en los primeros 5 minutos. En el caso de los monitoreos que tenían condiciones diferentes de  $C_0$ , estos se homologaron a un mismo punto de referencia.

### 6.2.1. Modelo de caja simple

Las simulaciones sin ventilación se realizaron utilizando valores de velocidad de viento de 0.04 m/min (0.0006 m/s) para todas las fuentes, a excepción del incienso y el difusor de aceites, en donde se utilizaron valores de 0.01 m/min (0.0002 m/s) y 0.02 (0.0003 m/s), respectivamente. Estos valores fueron los que mejor se ajustaron al modelo y se encuentran dentro del rango de la escala Beaufort para vientos en calma (0-0.2 m/s).

En la calibración del modelo, se observó que los datos experimentales no se ajustaban a una caja completamente hermética ya que existía filtración de aire en la unidad de muestreo, razón por la cual se tomó un modelo abierto en el cual la



velocidad fue atenuada por un factor. Este factor se obtuvo empíricamente mediante prueba y error en la comparación de los datos experimentales con los obtenidos del modelo.

Este factor adimensional empírico ( $\epsilon$ ) se adicionó en la exponencial de la ecuación 10, lo que permitió que el modelo se ajustara de forma correcta en la etapa de deposición y el cual tuvo un valor de 10 para todas las fuentes. En el caso del difusor de aceites, los valores de  $\epsilon$  utilizados fueron 0.8 en la etapa de emisión y 3 en la etapa de deposición.

Para las simulaciones con ventilación se utilizaron velocidades de viento de 60 m/min (1 m/s), valor obtenido durante la realización de los monitoreos. Los valores utilizados para  $\alpha_e$  y  $\alpha_s$  fueron de 0.01 para ambos términos.

A continuación, se presentan las simulaciones para cada una de las fuentes. En gran parte de las gráficas, se muestra la comparación de la simulación con los monitoreos realizados. De igual manera, se muestra la tendencia de los monitoreos, la cual está representada por una línea negra.

La modelación de la actividad de barrer en condiciones sin ventilación se presenta en la Figura 6. Esta fue comparada individualmente con los monitoreos de diferente duración de fuente activa, que fueron de 5, 10 y 15 minutos (Figura 6a, Figura 6b y Figura 6c, respectivamente). De igual manera, se comparó con un valor representativo de cada uno de los tiempos de emisión, para lo que se obtuvo un valor promedio de las repeticiones (Figura 6d). Los monitoreos realizados mostraron que las concentraciones de  $PM_{10}$  alcanzaron valores máximos promedio de hasta 24.9 veces la  $C_0$ , la cual era de  $45 \mu g/m^3$ .

De igual manera, se observó que el aporte de  $PM_{10}$  durante los monitoreos no varió a pesar de los diferentes tiempos de duración de la actividad. Esto se puede deber principalmente a que el  $q_e$  depende del grado de suciedad del lugar, ya que durante



la actividad de barrer lo que ocurre es un proceso de resuspensión del  $PM_{10}$  ya existente en el área.

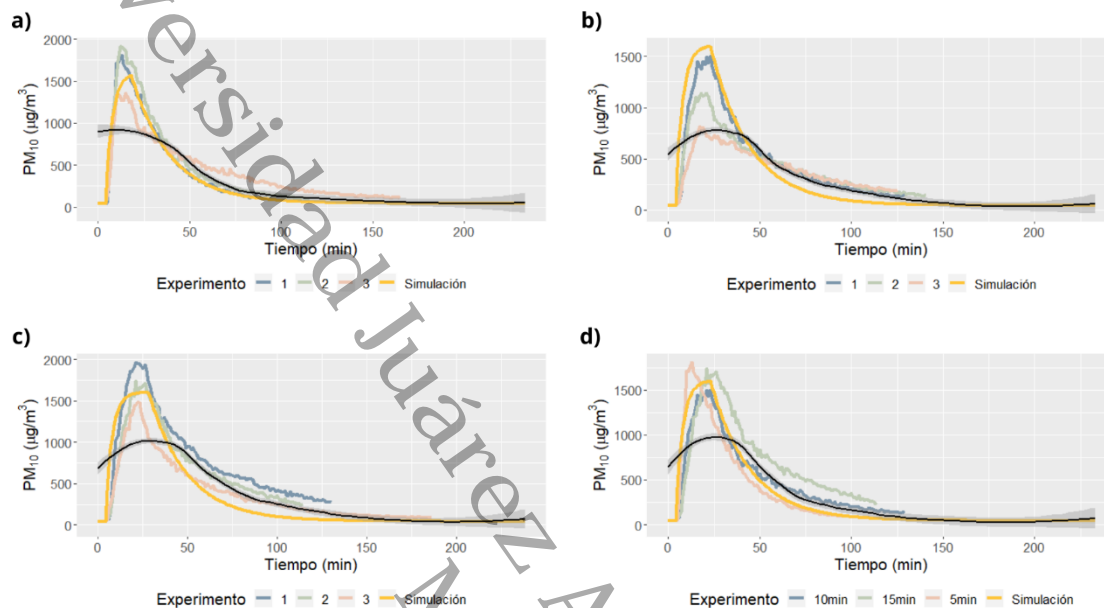


Figura 6. Comparación de simulación con monitoreos: Barrer (sin ventilación). a) Tendencia de los experimentos de 5 minutos, b) Tendencia de los experimentos de 10 minutos, c) Tendencia de los experimentos de 15 minutos, d) Tendencia global de los experimentos.

Para el caso de barrer con ventilación no se realizaron monitoreos, ya que se observó que el modelo sin ventilación se ajustaba de manera adecuada, por lo que en la Figura 7 solo se muestra la simulación de barrer con ventilación. En esta se observa que el aporte de  $PM_{10}$  es significativamente menor que en los casos donde no había ventilación, esto debido al arrastre del  $PM_{10}$  fuera del área debido al viento. Se obtuvieron concentraciones máximas de hasta 5.4 veces la  $C_0$  (valor de  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), valores similares a los encontrados por Navarro (2019), que fueron de 4.2 veces la  $C_0$ .

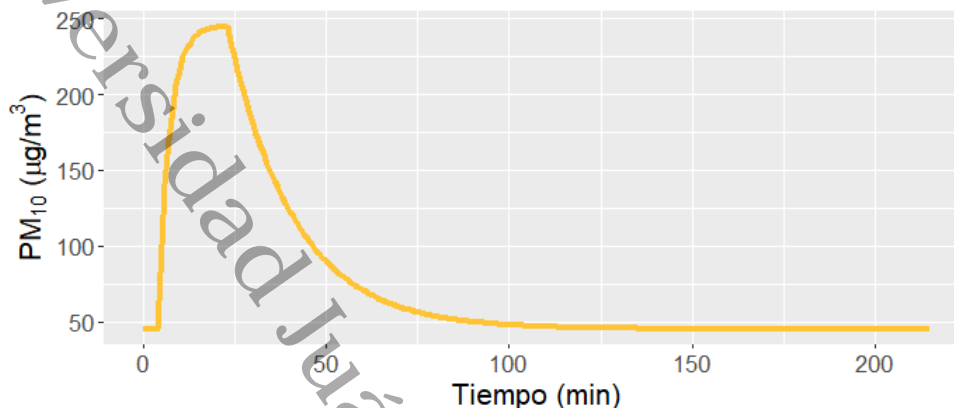


Figura 7. Simulación con ventilación para la actividad de barrer.

En el caso del uso de velas aromáticas y religiosas al ser encendidas con un encendedor, se observó en los monitoreos que se presentan más de un pico que dependen del apagado y la presencia o ausencia de ventilación, teniendo principalmente un primer pico dado cuando la fuente se activa y uno segundo con un mayor aporte de  $PM_{2.5}$  a causa del apagado de las velas. Debido a esto, las simulaciones para el caso de apagado con soplado y sin ventilación se dividieron en tres etapas: un primer aporte de  $PM_{2.5}$  muy pequeño al estar activa la fuente, el segundo aporte de  $PM_{2.5}$  debido al apagado de esta y finalmente la etapa de deposición.

En el caso de las velas apagadas mediante soplado y con ventilación, se pudieron observar tres "picos", por lo que se establecieron cuatro etapas: un primer aporte de  $PM_{2.5}$  muy pequeño al estar activa la fuente, un segundo aporte de  $PM_{2.5}$  debido al apagado de esta y que tuvo una duración muy corta de un minuto, un tercer pico en donde las concentraciones de  $PM_{2.5}$  del apagado se estabilizan y comienzan a decaer y finalmente la etapa de deposición. El segundo pico debido al apagado de



la fuente se obtuvo mediante la sumatoria de la media de la  $C_{m\acute{a}x}$  obtenida en los monitoreos en ese minuto.

De igual manera, se observó que el método de apagado de la vela también influye en las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , mostrándose que al apagarse con un trapo húmedo (Figura 9) el aporte de  $PM_{2.5}$  es mucho menor que cuando se apagan mediante soplado (Figura 8, 10).

Para las velas aromáticas con apagado mediante soplado y sin ventilación (Figura 8a), se obtuvieron concentraciones máximas de hasta 6.9 veces la  $C_0$  (valor de  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en los monitoreos. Se observa que el modelo para este escenario se ajustó a la tendencia de los monitoreos.

En el caso de velas aromáticas con apagado mediante soplado y ventilación (Figura 8b), se observaron dos picos después del apagado de la fuente, uno al momento de apagarse la fuente con una duración de un minuto y que alcanzó concentraciones máximas promedio de hasta 2.73 veces la  $C_0$  ( $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), y uno segundo mucho más bajo en donde se observó que las concentraciones de  $PM_{2.5}$  emitidas por el apagado de la fuente se estabilizaban y comenzaban a decaer, las cuales obtuvieron concentraciones máximas promedio muy bajas, de alrededor 1.23 veces la  $C_0$ .

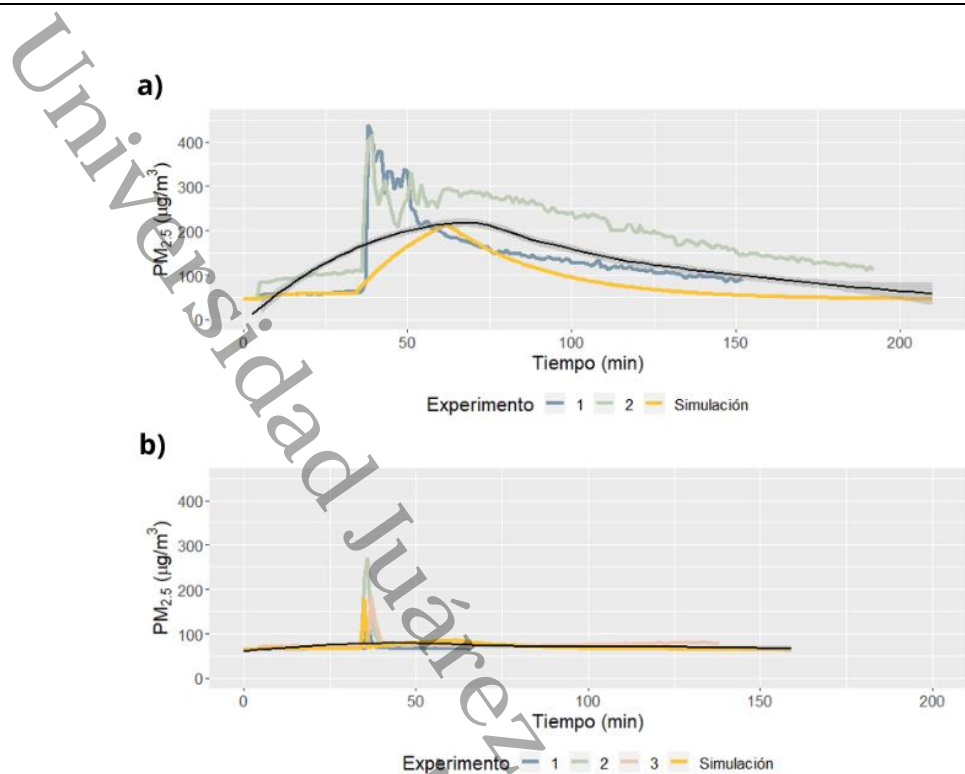


Figura 8. Comparación de simulación con monitores: Velas aromáticas (apagado mediante soplado). a) Tendencia de los experimentos sin ventilación, b) Tendencia de los experimentos con ventilación.

Para las velas aromáticas con apagado mediante trapo húmedo y sin ventilación (Figura 9a) se obtuvo que, a pesar de que se describe el comportamiento del PM<sub>2.5</sub> mostrado durante los experimentos, este no se ajusta a la tendencia de los dos monitoreos que fueron más similares. Esto se debe principalmente a que el cálculo del  $q_e$  global quedó subestimado debido a que uno de los monitoreos difiere considerablemente del resto, ya que los valores que se obtuvieron están muy por debajo de la media de los otros dos experimentos. Para esta simulación, se observó que las concentraciones máximas promedio alcanzadas fueron de 1.56 veces la  $C_0$  (45 µg/m<sup>3</sup>).



En la Figura 9b se muestra la simulación para las velas aromáticas con apagado mediante trapo húmedo y con ventilación, en donde se observó el comportamiento típico del  $PM_{2.5}$  en donde solo se cuenta con un pico, el cual estuvo dado para este caso por el apagado de la vela. Sin embargo, el utilizar el trapo húmedo ocasionó que el humo que se generara al apagarse fuera casi nulo, por lo que el aporte de  $PM_{2.5}$  fue poco significativo, aumentando las concentraciones por 1 a 2  $\mu g/m^3$ .

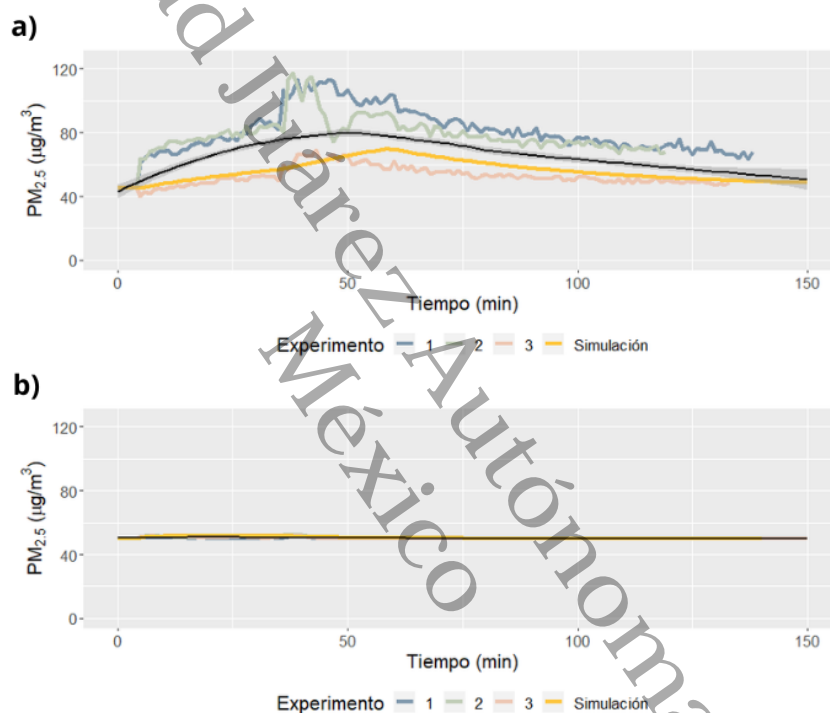


Figura 9. Comparación de simulación con monitoreos: Velas aromáticas (apagado mediante trapo húmedo). a) Tendencia de los experimentos sin ventilación, b) Tendencia de los experimentos con ventilación.

Para las velas religiosas con apagado mediante soplado y sin ventilación (Figura 10a), se obtuvieron concentraciones máximas de hasta 2.05 veces la  $C_0$  ( $45 \mu g/m^3$ ) en los monitoreos. Se observa que el modelo para este escenario se ajustó a la tendencia de los monitoreos.



En el caso de las velas religiosas con apagado mediante soplado y con ventilación (Figura 10b), el comportamiento del  $PM_{2.5}$  fue similar al caso de las velas aromáticas con las mismas condiciones, observándose dos picos después del apagado de la fuente, uno con concentraciones elevadas al momento de apagarse la fuente con una duración de un minuto, el cual alcanzó concentraciones máximas promedio de hasta 3.09 veces la  $C_0$  ( $45 \mu g/m^3$ ) y uno segundo mucho más bajo, en donde se observó que las concentraciones de  $PM_{2.5}$  emitidas por el apagado de la fuente se estabilizaban y comenzaban a decaer, las cuales obtuvieron concentraciones máximas promedio muy bajas, de alrededor 1.17 veces la  $C_0$ .

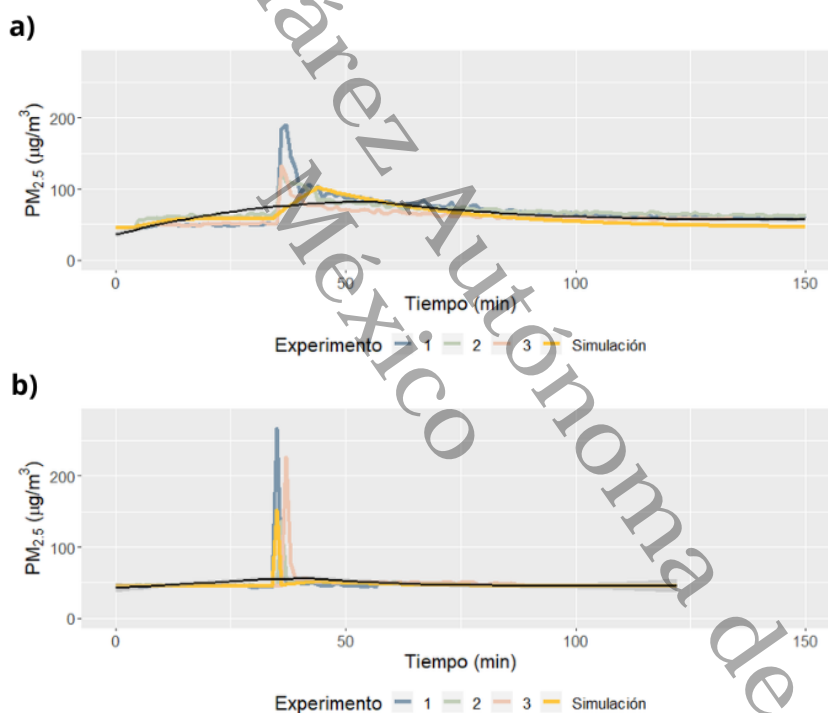


Figura 10. Comparación de simulación con monitoreos: Velas religiosas (apagado mediante soplado). a) Tendencia de los experimentos sin ventilación, b) Tendencia de los experimentos con ventilación.

En la Figura 11 se muestra la simulación sin ventilación para el uso de velas de cera de cumpleaños. Se observa que la simulación se ajustó al comportamiento de los



monitoreos, y que se alcanzaron concentraciones máximas promedio de  $PM_{2.5}$  de hasta 16.44 veces la  $C_0$  ( $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

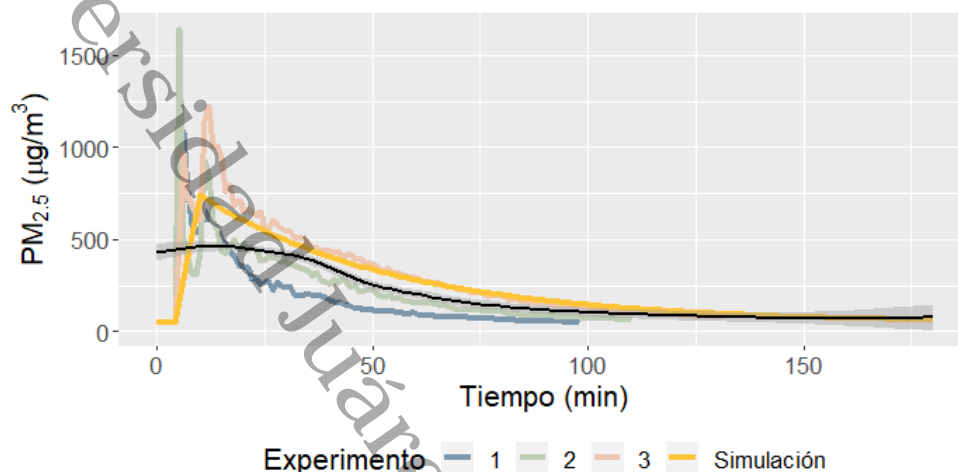


Figura 11. Comparación de simulación con monitoreos: Velas de cera de cumpleaños (sin ventilación).

Por otro lado, en la simulación con ventilación para el uso de velas de cera de cumpleaños (Figura 12) se alcanzaron concentraciones máximas de hasta 8.22 veces la  $C_0$  que, si bien son menores que cuando no se cuenta con ventilación, estas siguen siendo relativamente altas.

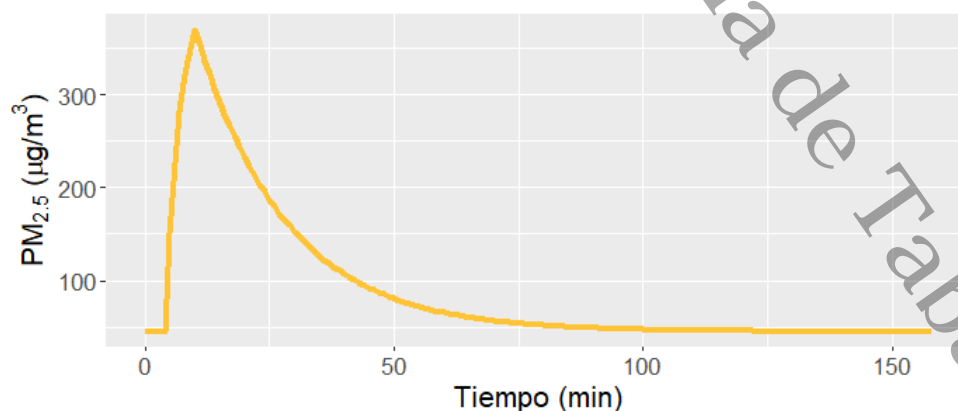


Figura 12. Simulación con ventilación para el uso de velas de cera de cumpleaños.



En la Figura 13 se muestran las simulaciones con y sin ventilación para el uso de velas pirotécnicas de cumpleaños. Se observa que a pesar de que la emisión de estas velas se considera como una emisión instantánea, las altas concentraciones de  $PM_{2.5}$  se sostienen por varios minutos, lo que permitió modelarlo como un modelo de emisión continua como el de caja simple. De igual manera, se pudo observar que pasados estos minutos las concentraciones de  $PM_{2.5}$  decaen relativamente rápido, aunque tienen tiempos largos de retorno.

En la simulación sin ventilación (Figura 13a) se observa que esta se ajusta al comportamiento de los monitoreos, y que se alcanzan concentraciones máximas de  $PM_{2.5}$  de hasta 104.40 veces la  $C_0$  ( $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). De igual manera, se observa que aun cuando se cuenta con ventilación en el área y que las concentraciones de  $PM_{2.5}$  no se elevan tanto en comparación a cuando no se cuenta con ventilación, estas siguen siendo altas, obteniéndose concentraciones máximas promedio de hasta 44.56 veces la  $C_0$  ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (Figura 13b).

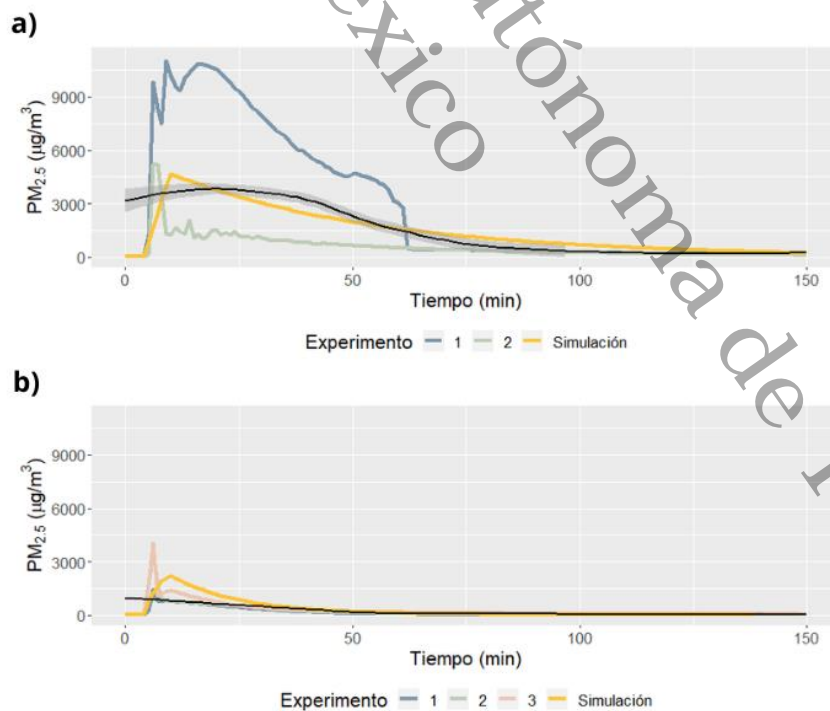


Figura 13. Comparación de simulación con monitoreos: Velas pirotécnicas de cumpleaños. a) Tendencia de los experimentos sin ventilación, b) Tendencia de los experimentos con ventilación.



La simulación sin ventilación para el uso de ahuyentadores de mosquitos en espiral se muestra en la Figura 14, en donde se puede observar que esta se ajusta al comportamiento de los monitoreos. Además, se obtuvieron concentraciones máximas promedio de hasta 134.84 veces la  $C_0$  ( $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

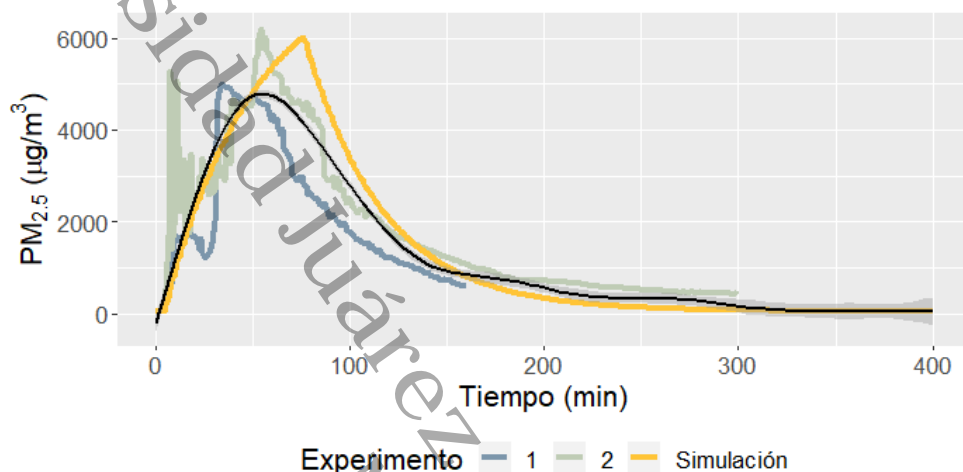


Figura 14. Comparación de simulación con monitoreos: Ahuyentadores de mosquitos en espiral (sin ventilación).

En el caso de la simulación con ventilación para el uso de ahuyentadores de mosquitos en espiral (Figura 15), se observó que se alcanzaron concentraciones máximas de hasta 12.28 veces la  $C_0$ . Si bien las concentraciones de  $\text{PM}_{2.5}$  disminuyen significativamente al haber presencia de viento, estas todavía se mantienen en niveles que pueden considerarse peligrosos para la salud.

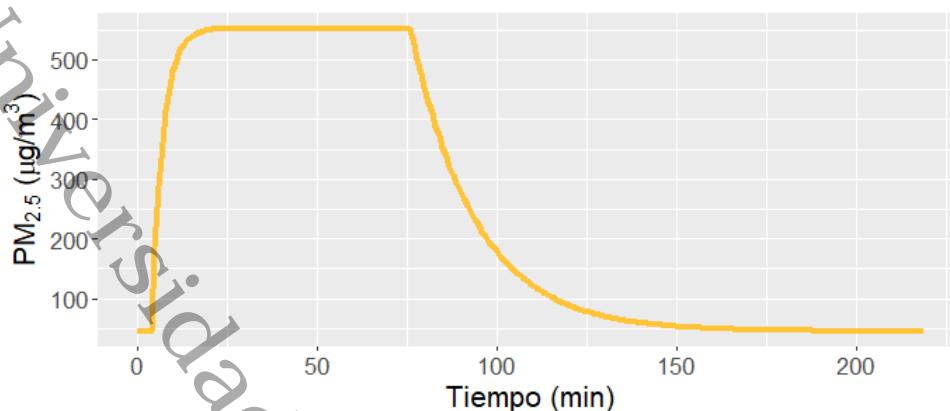


Figura 15. Simulación con ventilación para el uso de ahuyentadores de mosquitos en espiral.

Las simulaciones con y sin ventilación para el uso de incienso se muestran en la Figura 16. Para el uso de incienso sin ventilación (Figura 16a) se observa que la simulación se ajustó al comportamiento de los monitoreos, y que se alcanzan concentraciones máximas promedio de hasta 16.58 veces la  $C_0$ .

En el caso del uso de incienso con ventilación (Figura 16b), debido a que el comportamiento del PM<sub>2.5</sub> en los monitoreos fue errático y el modelo de caja simple considera una emisión continua, la simulación se ajustó a los picos inicial y final de los monitoreos, siguiendo la tendencia de estos en la etapa de deposición. Se observa que las concentraciones máximas promedio obtenidas fueron de hasta 1.6 veces la  $C_0$ .

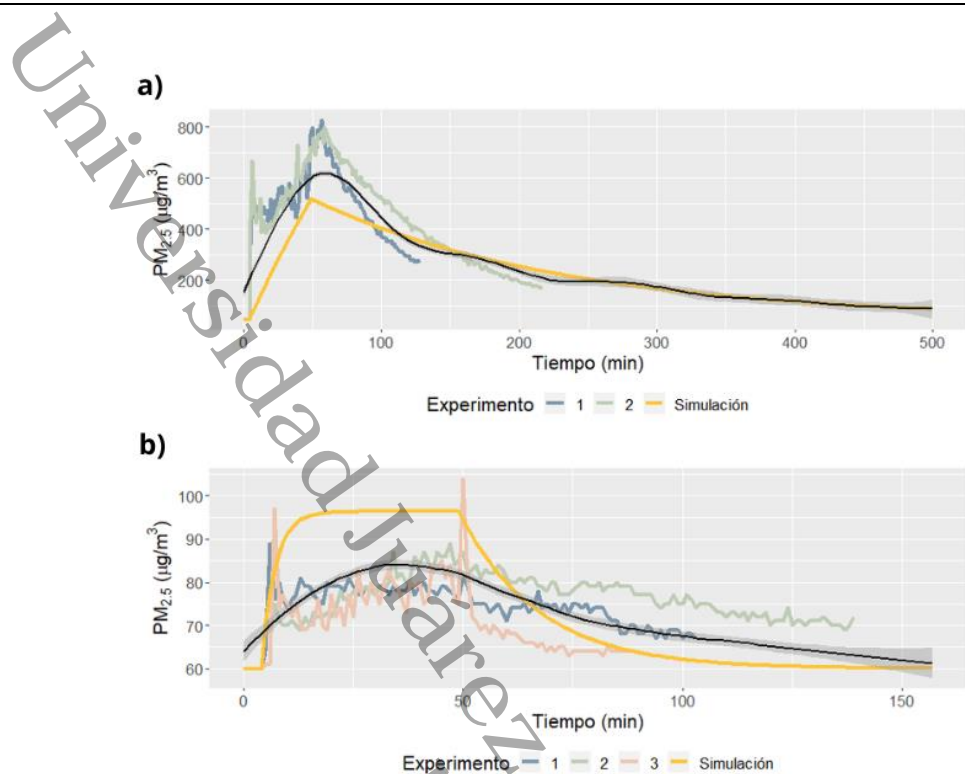


Figura 16. Comparación de simulación con monitoreos: Incienso. a) Tendencia de los experimentos sin ventilación, b) Tendencia de los experimentos con ventilación.

En el caso del uso de difusor de aceites sin ventilación, durante la ejecución de los monitoreos se observó que el proceso de deposición comenzaba unos minutos antes de que se desactivara la fuente (10 minutos antes, aproximadamente), por lo que se utilizó un factor adimensional empírico en ambas etapas, con un valor de 0.8 en la etapa de emisión y 3 en la de deposición para poder modelar correctamente el comportamiento del PM<sub>2.5</sub> durante esta actividad (Figura 17).

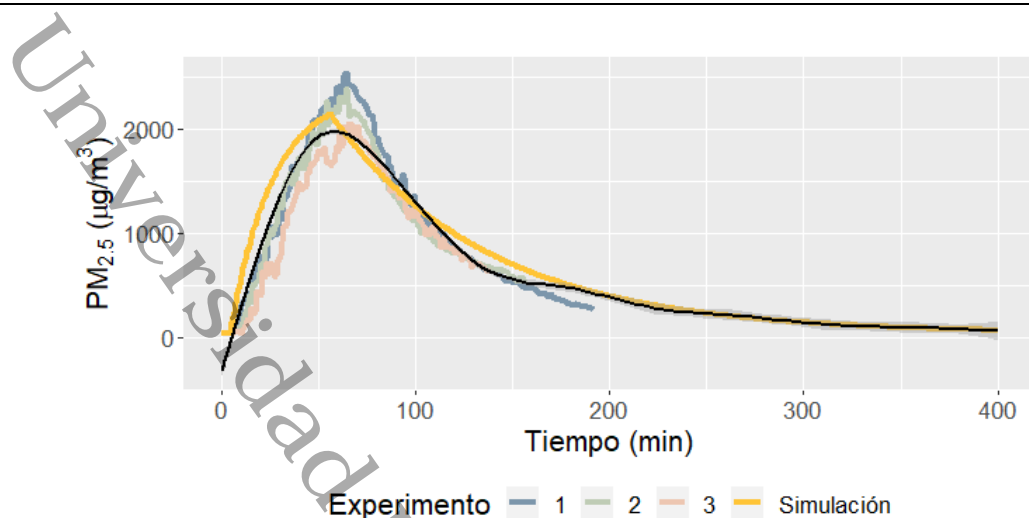


Figura 17. Comparación de monitoreos con simulación: Difusor de aceites (sin ventilación).

El comportamiento del  $PM_{2.5}$  en este caso se puede deber a que el tamaño de partículas que más predominó durante los monitoreos fueron las partículas con tamaño aerodinámico de  $0.3 \mu m$ , las cuales se encuentran dentro de la moda de acumulación. Estas partículas surgen como resultado del crecimiento de partículas de la moda Aitken, principalmente a través de reacciones en fase líquida mediante procesos de coagulación y condensación, lo que podría hacer que las partículas se comenzaran a depositar de forma más rápida debido al cambio de tamaño y peso de estas al pasar el tiempo.

Por otro lado, debido a que los monitoreos de uso de difusor de aceites con ventilación tuvieron comportamientos erráticos diferentes (Figura 18), no se encontró un modelo que pudiera describir el comportamiento del  $PM_{2.5}$  para este caso. Sin embargo, se pudo observar que en los monitoreos en donde se observaba un aumento de  $PM_{2.5}$  al pasar el tiempo, ocurría lo mismo con la humedad relativa, mientras que, en los casos en donde se observaba una deposición de  $PM_{2.5}$ , la humedad relativa también tendía a decaer.

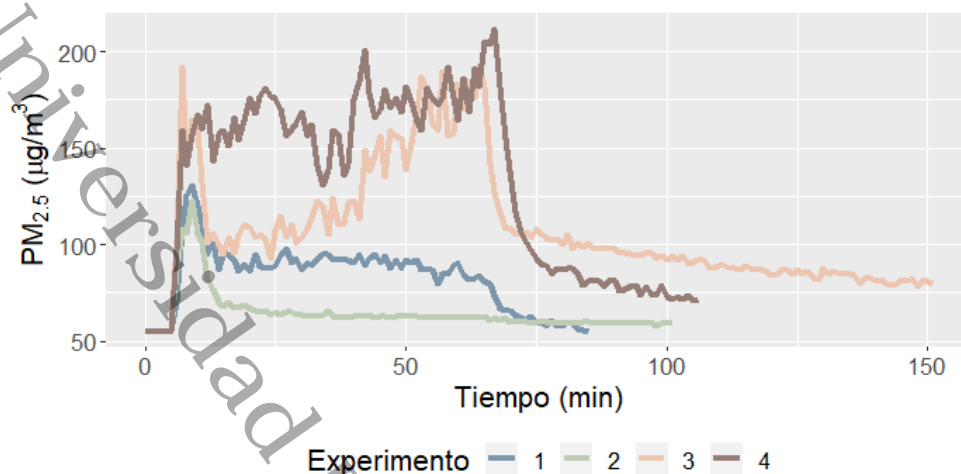


Figura 18. Monitoreos sin ventilación de uso de difusor de aceites.

En los casos en donde se mostró un incremento en las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , principalmente en los últimos minutos antes de desactivar la fuente, se pudo percibir un comportamiento similar a lo observado por Armenta (2021) con el uso de aromatizantes en aerosol, quien supone que las partículas emitidas al ser de fracción fina sufren un aumento de tamaño debido a distintos procesos, como la reacción de gases en o sobre las partículas y la evaporación de los aerosoles.

### 6.3. Simulación de la CAI

Haciendo uso del modelo se consideró un escenario en donde se cuenta con una habitación de  $36 \text{ m}^3$  con las condiciones de  $u = 0.5 \text{ m/s}$  y  $C_0$  con niveles de CAI "Buena" ( $45 \text{ µg/m}^3$  para  $PM_{10}$  y  $20 \text{ µg/m}^3$  para  $PM_{2.5}$ ), obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 5.

Tabla 4. Resultados obtenidos de las simulaciones.

Fuente	$C_{\text{máx}}/C_0$ ( $\text{µg/m}^3$ )	Duración del pico (min)	Tiempo de retorno (min)
Barrer	2.92	19	48
Velas pirotécnicas de cumpleaños	15.12	6	67



Velas aromáticas (soplado)	6.58	1	42
Velas aromáticas (trapo húmedo)	1.04	0	0
Velas religiosas (soplado)	6.34	1	1
Velas de cera de cumpleaños	4.88	6	45
Incienso	1.99	45	22
Ahuyentador de mosquito en espiral	15.30	72	67

Esto muestra que salvo las velas aromáticas que fueron apagadas con un trapo húmedo, todas las fuentes alteran significativamente las concentraciones de PM, siendo las velas pirotécnicas y los ahuyentadores de mosquito las fuentes que más riesgo a la salud presentan.

#### 6.4. Cualificación de la CAI con base en la modelación

Con los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas con el escenario anterior, se cualificó la CAI de cada una de las actividades estudiadas.

En la Figura 19, al realizar la actividad de barrer se mostró que, una vez iniciada la actividad, las concentraciones de  $PM_{10}$  tardan 66 minutos en regresar a concentraciones de fondo. Durante este periodo se registraron niveles de CAI "Mala" y "Aceptable" con una duración de 32 y 34 minutos, respectivamente.



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

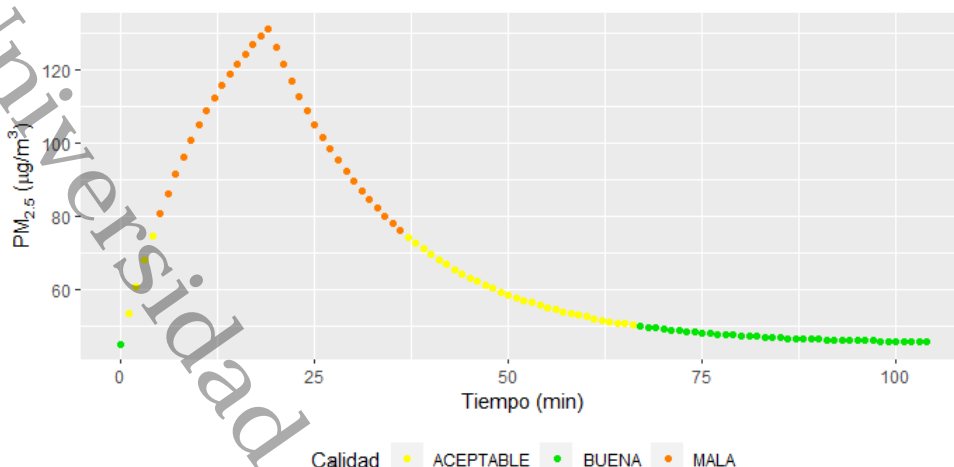


Figura 19. Cualificación de la CAI para la actividad de barrer.

Para el uso de velas aromáticas con apagado mediante soplado (Figura 20), las concentraciones alcanzaron niveles de CAI "Buenas" después de 37 minutos posterior a activada la fuente, presentándose una calidad del aire "Muy mala" durante un minuto que es el momento en donde se apaga la vela y una CAI "Aceptable" durante la mayor parte de este periodo de simulación.

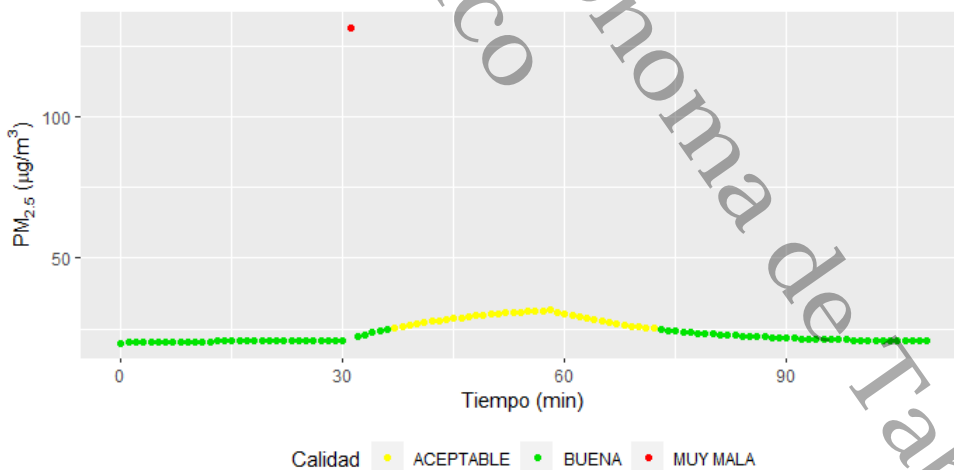


Figura 20. Cualificación de la CAI para el uso de velas aromáticas (apagado mediante soplado).



Para el caso de las velas aromáticas con apagado mediante trapo húmedo (Figura 21), las concentraciones de  $PM_{2.5}$  no se elevaron significativamente, manteniéndose la CAI como "Buena" durante todo el periodo de simulación, demostrándose que este método de apagado es el ideal para mantener una buena CAI.

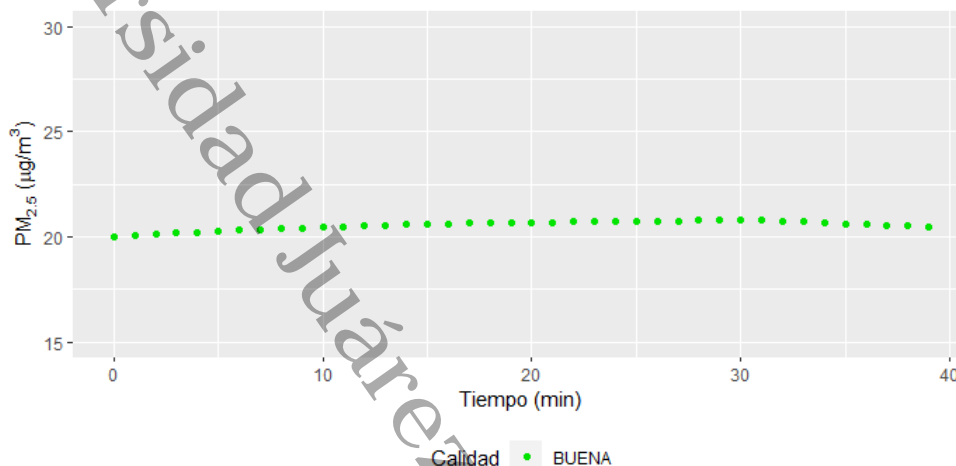


Figura 21. Cualificación de la CAI para el uso de velas aromáticas (apagado mediante trapo húmedo).

Para el uso de velas religiosas con apagado mediante soplado (Figura 22) se obtuvo una CAI similar al del uso de velas aromáticas con las mismas condiciones, en donde se presentaron niveles de CAI "Muy mala" durante un minuto que fue el momento en donde se apagó la vela, predominando una CAI "Buena" durante la mayor parte de este periodo de simulación.

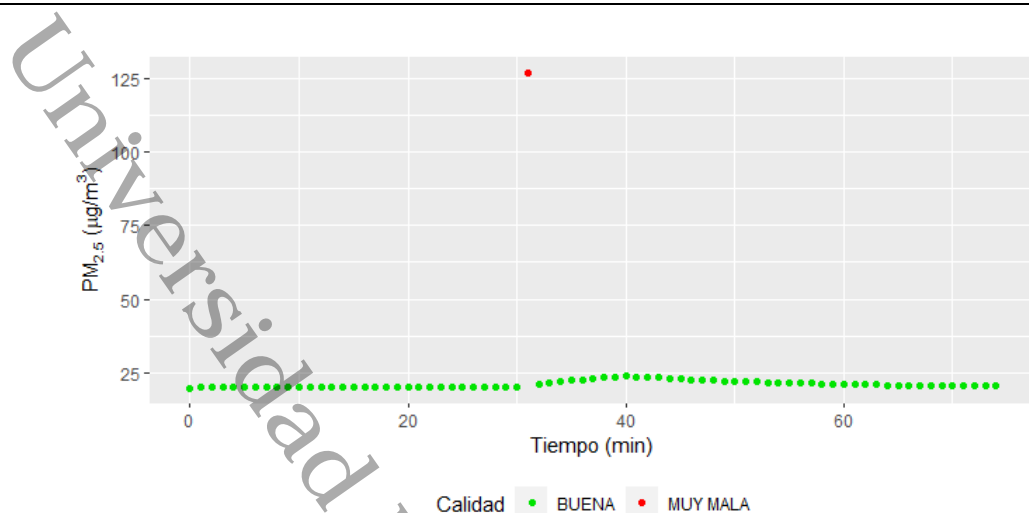


Figura 22. Cualificación de la CAI para el uso de velas religiosas (apagado mediante soplado).

En ambos tipos de velas (aromáticas y religiosas) se obtuvo que el método de apagado es un factor importante que influye significativamente en el comportamiento del PM<sub>2.5</sub>, observándose que el método de soplado es el que más PM<sub>2.5</sub> aporta a comparación con el uso de un trapo húmedo. Además, la ventilación también influye significativamente en las concentraciones de PM<sub>2.5</sub>, observándose que cuando hay presencia de esta el PM en el ambiente es mucho menor que cuando no se tiene ventilación. De esta manera, se obtuvo que el escenario donde hay menor exposición a PM<sub>2.5</sub> es cuando se tiene una buena ventilación en el área y además se utiliza un trapo húmedo para el apagado de las velas.

Por otro lado, en el uso de velas de cera de cumpleaños (Figura 23), después de activada la fuente las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> tardaron 51 minutos en retornar a las concentraciones de fondo. Así mismo, dentro del periodo de simulación se registró una CAI "Muy mala" que se mantuvo durante 6 minutos, además de que se presentaron niveles de CAI "Mala" y "Aceptable" durante 17 y 28, respectivamente.

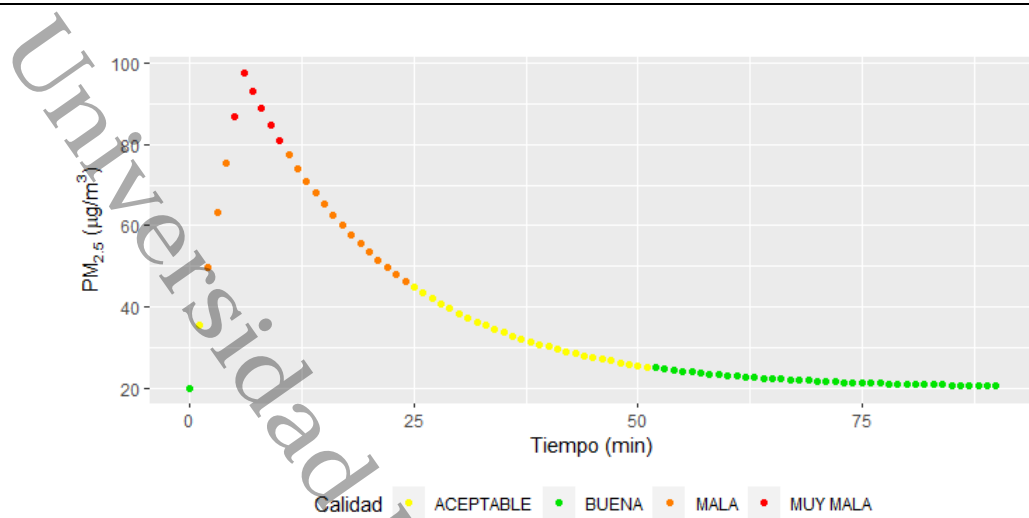


Figura 23. Cualificación de la CAI para el uso de velas de cera de cumpleaños.

Para el uso de velas pirotécnicas de cumpleaños (Figura 24) después de activada la fuente, las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> tardaron 73 minutos en retornar a las condiciones iniciales de PM<sub>2.5</sub> con CAI "Buena". Así mismo, dentro del periodo de simulación se registró una CAI "Extremadamente mala" que se mantuvo durante 17 minutos, además de que se presentaron niveles de CAI "Muy mala" y "Mala" durante 14 y 15 minutos, respectivamente, predominando la CAI "Aceptable" en el periodo de simulación con una duración de 27 minutos.

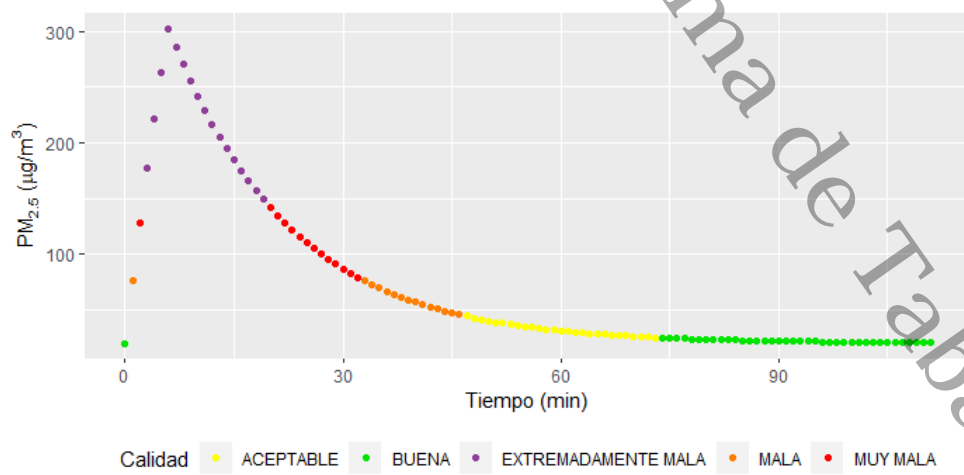


Figura 24. Cualificación de la CAI para el uso de velas pirotécnicas de cumpleaños.



En el caso del uso de ahuyentadores de mosquito en espiral (Figura 25), las concentraciones regresaron a niveles de CAI "Buenas" después de 139 minutos, en donde la CAI "Extremadamente Mala" predominó con una duración de 78 minutos. De igual manera, se presentaron niveles de CAI "Muy Mala", "Mala" y "Aceptable" durante 17, 16 y 28 minutos, respectivamente.

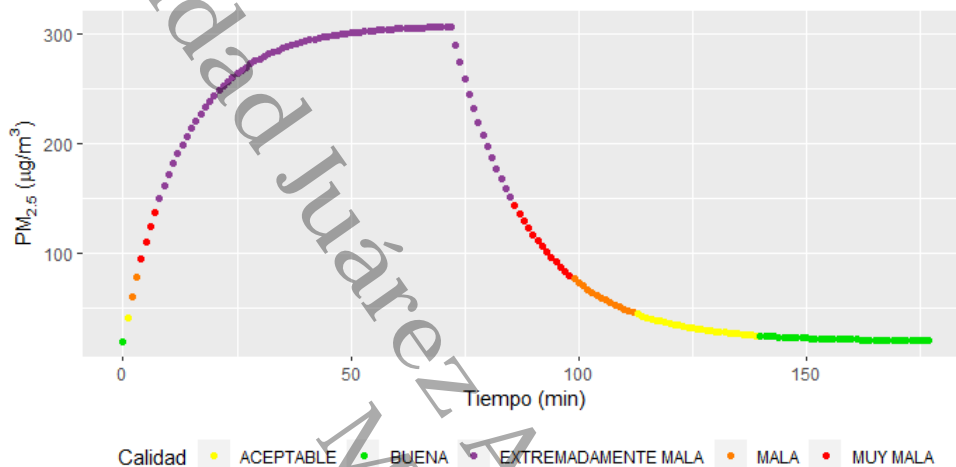


Figura 25. Cualificación de la CAI para el uso de ahuyentadores de mosquito en espiral.

Por otro lado, en el uso de incienso (Figura 26) las concentraciones de  $PM_{2.5}$  tardaron 64 minutos en retornar a las concentraciones de fondo. Durante este periodo, los niveles de CAI que predominaron fueron "Aceptables".

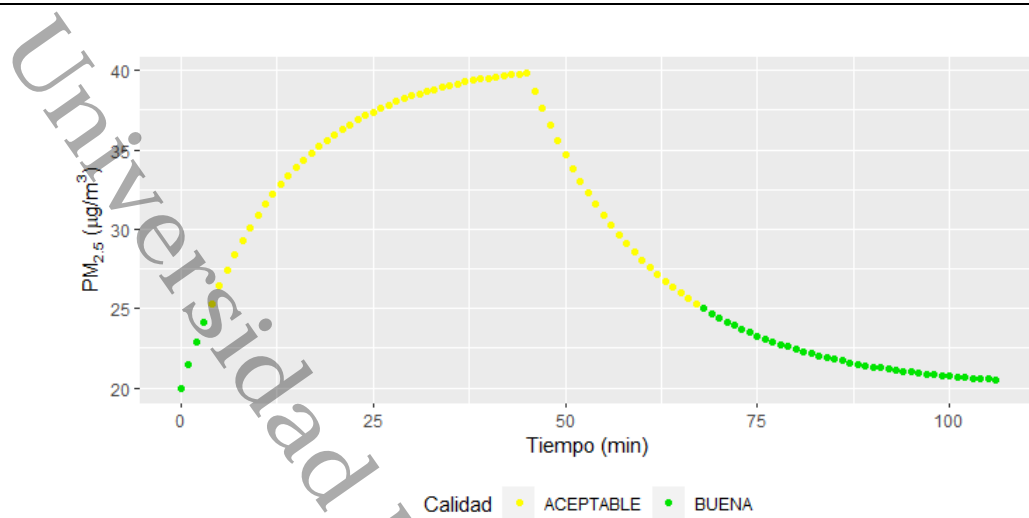


Figura 26. Cualificación de la CAI para el uso de incienso.

En actividades como el uso de incienso, ahuyentadores de mosquitos en espiral, velas pirotécnicas y velas de cera de cumpleaños en los cuales usualmente se llevan a cabo procesos de combustión incompleta se pudo observar que, a pesar de que la ventilación ayuda a que las concentraciones de PM disminuyan significativamente a comparación de cuando no se cuenta con ventilación, se siguen registrando niveles de CAI "Extremadamente mala" y "Muy mala" durante un tiempo considerable, lo que nos indica que el realizar estas actividades ya sea con o sin ventilación conlleva un riesgo muy alto a la salud de las personas.

Para el caso del difusor de aceites, se cualificó la CAI de la simulación obtenida de la modelación de los monitoreos sin ventilación. Como se observa en la Figura 27, después de activada la fuente las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> tardan alrededor de 244 minutos en retornar a concentraciones de fondo. De igual manera, se muestra que el nivel de CAI que predominan es el de "Extremadamente mala" con una duración de 116 minutos. Así mismo, se presentan niveles de CAI "Muy mala", "Mala" y "Aceptable" durante 40, 44 y 44 minutos, respectivamente.

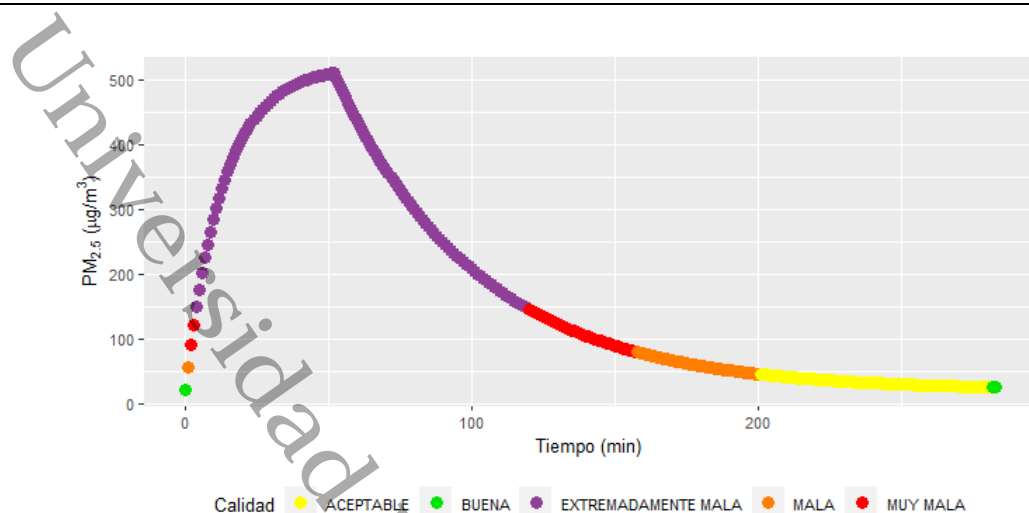



Figura 27. Cualificación de la CAI para el uso de difusor de aceites (sin ventilación).


## 6.5. Interfaz

Se desarrolló una interfaz interactiva en Microsoft Excel para simular la CAI debido a PM. Esta se nombró SIMOCAI, por "Simulación y Modelación de la Calidad del Aire en Interiores" (Figura 28).



### Hablando Al Aire

#### SIMOCAI



$$C(t) = \delta(t) \left[ C_0 e^{-\frac{uH}{L}} + \left( C_0 + \frac{q_0}{uBH} \right) \left( 1 - e^{-\frac{uH}{L}} \right) \right] + (1 - \delta(t)) \left[ C(t_0) e^{-\frac{uH}{L}} + C_0 \left( 1 - e^{-\frac{uH}{L}} \right) \right] \quad (1b)$$

En las simulaciones con ingreso de aire, se hace el supuesto que la ventilación que entra al espacio es poca, por lo que se utilizaron valores de velocidad de viento de 1 m/s.

Para cualificar la calidad del aire en las series temporales, se utilizaron los límites máximos permisibles para los contaminantes PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> establecidos en la NOM-172-SEMARNAT-2019, los cuales cualifican a la calidad del aire en Buena, Regular, Mala, Muy Mala y Extremadamente Mala.

Para que se generen las simulaciones, se necesitarán ingresar datos como las dimensiones del espacio, cómo considera que se encuentra la calidad del aire en ese momento, y si el espacio está abierto o cerrado.

Para iniciar, presione el botón de Inicio.

**Inicio**

Figura 28. Página introductoria de SIMOCAI.

La interfaz permite modificar las dimensiones de la habitación, considerar si se cuenta con un espacio abierto o cerrado y cómo considera el usuario que se encuentra la calidad del aire antes de iniciar alguna actividad (Figura 29).

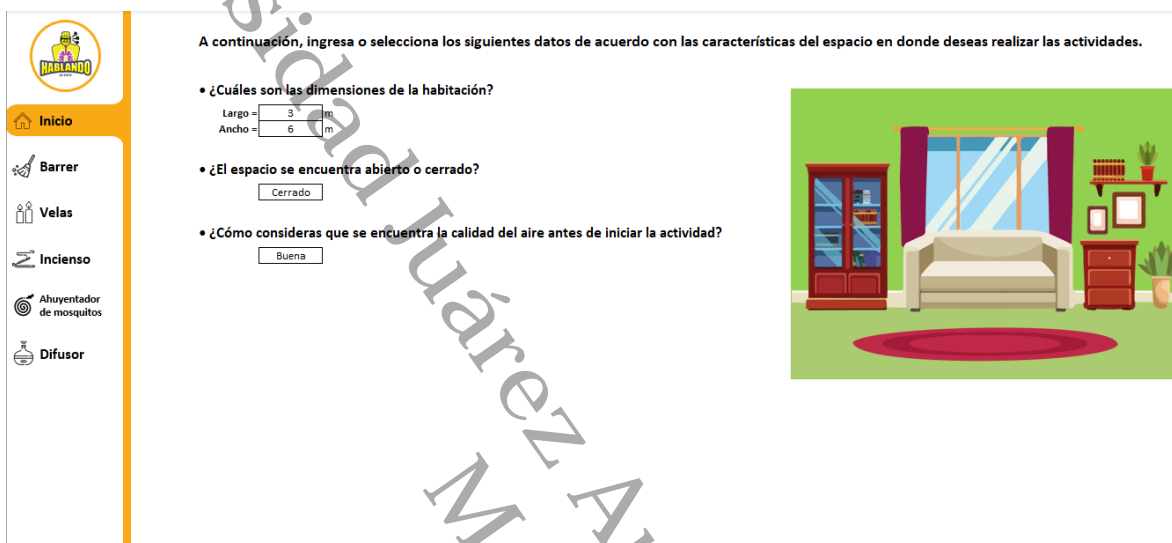


Figura 29. Menú de Inicio de SIMOCAI.

De igual manera, permite moverse a través de las diferentes actividades (barrer, uso de velas, incienso, ahuyentadores de mosquitos y difusor de aceites) y modificar el tiempo en que están activas y para el caso de las velas el número de estas, para así poder mostrar una simulación personalizada de acuerdo con los datos ingresados (Figura 30).

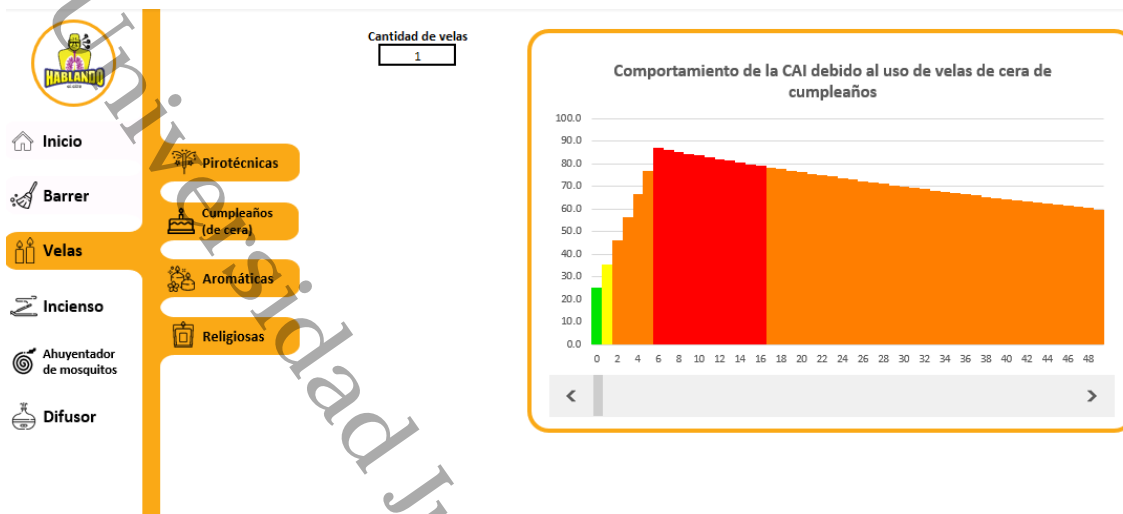


Figura 30. Presentación de simulaciones dentro de SIMOCAI.



## 7. Conclusiones

Los monitoreos analizados y la realización de las simulaciones mostraron que las actividades que elevan significativamente las concentraciones de PM son principalmente las actividades de combustión, como son el uso de incienso, ahuyentadores de mosquito en espiral y velas de cera y pirotécnicas de cumpleaños. Estas actividades no necesarias pueden considerarse como malos hábitos, ya que no son actividades que sean indispensables para nuestra vida y que ponen en riesgo nuestra salud, pero aun así se realizan ya sea por comodidad, costumbres, tradiciones o tendencias.

En el caso de barrer el aporte de  $PM_{10}$  es similar independientemente del tiempo de duración de la actividad, ya que se trata de un proceso de resuspensión de partículas y depende del grado de suciedad del lugar, a diferencia de las otras actividades en las que son procesos de generación de PM.

Para el uso de velas religiosas y aromáticas, el método de apagado juega un papel importante en el comportamiento del PM, siendo el soplado el que más  $PM_{2.5}$  aporta a comparación con el uso de un trapo húmedo. De igual manera, la presencia de ventilación influyó en las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , observándose que, si se tiene una buena ventilación en el área y además se utiliza un trapo húmedo para apagar las velas, el aporte de  $PM_{2.5}$  es casi nulo.

El uso de velas pirotécnicas de cumpleaños es una actividad riesgosa debido a que es una emisión momentánea, pero que eleva de manera significativa las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , las cuales se mantienen altas durante un periodo largo de tiempo. Cuando estas son usadas en fiestas de cumpleaños, las personas que se encuentran en este festejo están expuestas a concentraciones peligrosas de  $PM_{2.5}$  por largos periodos de tiempo, siendo el cumpleañosero que se encuentra más cercano a la vela al momento de partir el pastel, el que inhala la mayor cantidad de PM y, por consiguiente, quien está en mayor riesgo de perjudicar su salud.



Entre las limitaciones y áreas de oportunidad que se encontraron durante la elaboración del trabajo se encuentran el valor adimensional empírico y los valores de  $\alpha_e$  y  $\alpha_s$ . Para estos parámetros haría falta realizar monitoreos en espacios con diferentes volúmenes para verificar si estos varían dependiendo del volumen.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco  
México



## Referencias

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (8 de marzo de 2023). *Acerca del calidad del aire interior*. <https://espanol.epa.gov/cai/acerca-del-calidad-del-aire-interior>
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (1 de agosto de 2023). *Introducción a la calidad del aire interior*. <https://espanol.epa.gov/cai/introduccion-la-calidad-del-aire-interior>
- Albanesi, M. & Lago, N. (2011). *Percepción ambiental de los alumnos de escuelas primarias de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires*. Defensoría del Pueblo de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Recuperado de: <https://ambienteydesarrollosostenible.org.files.wordpress.com/2013/01/informe-percepcion-ambiental.pdf>
- Armenta, G. (2021). *Evaluación de la exposición a formaldehídos y material particulado intramuros debido al uso de aromatizantes en aerosol*. [Tesis de Licenciatura]. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Branco, P.T.B.S.; Alvim-Ferraz, M.C.M.; Martins, F.G. & Sousa, S.I.V. (2014). Indoor air quality in urban nurseries at Porto city: Particulate matter assessment. *Atmospheric Environment*, **84**, 133-143. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.11.035>
- California Air Resource Board (2023). *Inhalable Particulate Matter and Health (PM2.5 and PM10)*. <https://ww2.arb.ca.gov/resources/inhalable-particulate-matter-and-health>
- Carazo, L.; Fernández, R.; González-Barcala, F. & Rodríguez, J. (2012). Contaminación del aire interior y su impacto en la patología respiratoria. *Arch Bronconeumol*, **49**(1), 22-27. <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2012.04.005>



- García, J. & Magaña, E. (2018). CALIDAD DEL AIRE EN LA CAFETERÍA PRINCIPAL DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS-UJAT. *Kuxulkab'*, 24(50): 05-13. <https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a24n50.2416>
- Hasager, F.; Bjerregaard, J.; Bonomaully, J.; Knap, H.; Afshari, A. & Johnson, M. (2021). Indoor Air Quality: Status and Standards. En Goodsite M.E., Johnson M.S., Hertel O. (eds) *Air Pollution Sources, Statistics and Health Effects. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Series*. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0596-7\\_1097](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0596-7_1097)
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (s.f.). *Manual 5. Protocolo de Manejo de Datos de la Calidad del Aire*. Recuperado de <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/5%20-%20Protocolo%20de%20Manejo%20de%20Datos%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>
- Junta de Andalucía (s.f.). *Material particulado atmosférico*. <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/areas-tematicas/atmosfera/emisiones-a-la-atmosfera/principales-contaminantes-atmosfericos/material-particulado>
- Magaña, E.; Reyes, K.; Peña, L. & Carrera, J. (2021). Análisis de la relación calidad del aire intramuros y ventilación en actividades cotidianas en el hogar. Ávila, I.; Carpio, J.; Cordero, N.; Garzón, M.; Hernández, J.; Laines, J.; Miranda, E.; Padilla, A.; Ponce, M.; Sarracino, O.; Solís, R.; Solórzano, G.; Sosa, J. (Revs). *MEMORIAS DEL CONGRESO NACIONAL AMICA. Volumen 5*. Asociación Mexicana de Ingeniería, Ciencia y Gestión Ambiental (AMICA).
- Manisalidis, I.; Stavropoulou, E.; Staveopoulos, A. & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health*, 8(14). <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>



- Mannan, M. & Al-Ghamdi, S. (2021). Indoor Air Quality in Buildings: A Comprehensive Review on the Factors Influencing Air Pollution in Residential and Commercial Structure. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18. <https://doi.org/10.3390/ijerph18063276>
- Marta, I.; Blanco, V. & García, A. (2010). *CALIDAD del AIRE INTERIOR en edificios de uso público*. Dirección General de Ordenación e Inspección & Consejería de Sanidad de la Comunidad de Madrid.
- Martínez, J.; Magaña, E. & Carrera, J. (2023). FACTORES DE EMISIÓN Y COMPORTAMIENTO DE PM<sub>2,5</sub> DEBIDO AL USO DE AROMATIZANTES. Franco J. F.; Montejo A. (Comps). *Calidad de aire, cambio climático y salud pública*. Hill Consulting
- Morawaska, L.; Ayoko, G.; Bae, G.; Buonanno, G.; Chao, C.; Clifford, S.; Fu, S.; Hänninen, O.; He, C.; Isaxon, C.; Mazaheri, M.; Salthammer, T.; Waring, M. & Wierzbicka, A. (2017). Airborne particles in indoor environments of homes, schools, offices and aged care facilities: The main routes of exposure. *Environment International*, 108(2017), 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.07.025>.
- Navarro, J. (2019). *Simulación de la calidad del aire en interiores para diferentes eventos mediante una herramienta digital*. [Tesis de Licenciatura]. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, *Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el aire ambiente y criterios para su evaluación*. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de agosto de 2014.
- Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021, *Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM<sub>10</sub>*



y PM2.5. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 27 de octubre de 2021.

Norma Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, *Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud*. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 20 de noviembre de 2019.

Ongwandee, M., & Pipithakul, W. (2013). Air Pollutant Emissions from the Burning of Incense, Mosquito Coils, and Candles in a Small Experimental Chamber. *Applied Environmental Research*, 32(1), 69–79. Recuperado de <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/aer/article/view/9702>

Organización Mundial de la Salud (2 de mayo de 2018). *Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado*. <https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>

Pastor, N. (s.f.). *Escala Beaufort y Douglas: clasificación del viento y del oleaje*. Academia Náutica Oficial. Recuperado el 10 de octubre de 2023, de <https://www.boatmalaga.com/escala-beaufort-y-escala-douglas-clasificacion-del-viento-y-del-oleaje/>

Pérez-Sastré, M. A., & Ortiz-Hernández, L. (2021). Changes in blood pressure according to stature in Mexican adults. *Revista De Saúde Pública*, 55, 87. <https://doi.org/10.11606/s1518-8787.20210550032531>

Ramos, S.; Magaña, E. & Carrera, J. (2015). *Introducción a la modelación de la calidad del aire, del agua y del transporte de contaminantes en el suelo*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.



Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2011). *Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM<sub>2.5</sub>*. Recuperado de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/225459.pdf>

TMF (s.f.). *¿CUÁLES SON LAS PARTÍCULAS QUE ESTÁ EN EL AIRE Y SU CLASIFICACION?* Recuperado el 6 de julio de 2023, de <https://www.tfm.pe/noticias/la-importancia-del-tamano-de-las-particulas-en-el-aire>

Vardoulakis, S.; Giagloglou, E.; Steinle, S.; Davis, A.; Sleenwenhoek, A.; Galea, K.; Dixon, K. & Crawford, J. (2020). Indoor Exposure to Selected Air Pollutants in the Home Environment: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17. <https://doi.org/10.3390/ijerph17238972>

Vidal, A. (25 de junio de 2020). *CALIDAD DEL AIRE*. Colombia: Corporación Autónoma Regional de Risaralda. <https://www.carder.gov.co/calidad-del-aire/>

Xunta de Galicia (s.f.). *La Escala Beaufort*. [https://www.meteogalicia.gal/web/informacion/glosario/beaufort.action?request\\_locale=es](https://www.meteogalicia.gal/web/informacion/glosario/beaufort.action?request_locale=es)



## Anexos

### Anexo I. Construcción de la unidad de muestreo



Universidad Autónoma de Tabasco México