



**MCIA**  
Maestría en Ciencias  
en Ingeniería Ambiental  
UMSNH

# **UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
FACULTAD DE BIOLOGÍA  
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA  
AMBIENTAL**

**Determinación de las emisiones intra-domiciliarias de los  
contaminantes CO y PM<sub>2.5</sub> por el uso de la estufa Patsari, mediante  
la prueba de ebullición de agua WBT.**

**TESIS para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería  
Ambiental**

**Presenta:**

***Ing. Juan Carlos Vázquez Tinoco***

**Asesor de Tesis:**

***Dr. Marco Antonio Martínez Cinco***

**Co-Asesor de Tesis:**

***M.C. Víctor Manuel Ruiz García***

***Morelia, Michoacán, Octubre del 2017.***

## RESUMEN

Las estufas eficientes de biomasa han sido difundidas por todo el mundo, buscando sustituir el uso de fogones; ya que presentan un desempeño energético mayor, y contribuyen a la disminución de emisiones de gases con efecto invernadero y de contaminantes que afectan a la salud de los usuarios. Los protocolos internacionales de evaluación de este tipo de dispositivos no contemplan a las estufas con plancha y chimenea, y por lo tanto no considera la manera de medir contaminantes intramuros. Existe la suposición de que para estufas con chimenea el  $25 \pm 10\%$  de las emisiones totales son emisiones intramuros. De esta manera los distintos modelos de estufas con chimenea utilizados en México, Centroamérica y Sudamérica; y que han sido evaluados mediante la metodología actual pueden presentar incertidumbre en los resultados.

El objetivo del presente trabajo de investigación, es determinar las emisiones intra-domiciliarias de monóxido de carbono (CO) y material particulado ( $PM_{2.5}$ ) que son contaminantes producidos por el uso de la estufa eficiente de biomasa tipo plancha con chimenea “Patsari”. Utilizando el protocolo internacional de ebullición de agua (WBT, por sus siglas en inglés) esta determinación contempla el diseño y construcción de una doble campana para la separación, extracción, captura y medición de las emisiones de la chimenea e intra-domiciliarias.

Los resultados de la prueba WBT mostraron que la estufa Patsari presenta una fracción de emisiones intra-domiciliarias de  $0.12 \pm 0.07\%$  para CO y  $2.7 \pm 1.97\%$  para el  $PM_{2.5}$ . Lo que sugiere que los protocolos internacionales sobrestiman el porcentaje de emisiones intra-domiciliarias por el uso de estufas tipo plancha con chimenea; esta fracción tiene como consecuencia menores tasas de emisión de contaminantes en las cocinas, lo que contribuye a la reducción en los impactos a la salud por el uso de este tipo de dispositivos.

Dirigida por: Dr. Marco Antonio Martínez Cinco y M. en C. Víctor Manuel Ruiz García.

**Palabras clave:** emisiones intra-domiciliarias, tasas de emisión, estufas tipo plancha, doble campana de extracción y trenes de muestreo.

## ABSTRACT

Efficient biomass stoves have been disseminated throughout the world, seeking to replace the use of stoves; since they present a higher energy performance, and contribute to the reduction of emissions of greenhouse gases and pollutants that affect the health of users. The international protocols for evaluation of this type of devices do not include plants with iron and chimney, and therefore do not consider how to measure contaminants intramural. There is the assumption that for stoves with chimney  $25 \pm 10\%$  of the total emissions are emissions intramural. In this way the different models of stoves with chimney used in Mexico, Central America and South America; and they have been evaluated by the current methodology can present uncertainty in the results.

The objective of this research is to determine the intra-household emissions of carbon monoxide (CO) and particulate matter (PM<sub>2.5</sub>), which are pollutants produced by the use of the "Patsari" . Using the International Water Boiling Protocol (WBT), this determination contemplates the design and construction of a double bell for the separation, extraction, capture and measurement of chimney and in-home emissions.

The results of the WBT test showed that the Patsari stove has an intra-household emission fraction of  $0.12 \pm 0.07\%$  for CO and  $2.7 \pm 1.97\%$  for PM<sub>2.5</sub>. This suggests that the international protocols overestimate the percentage of intra-household emissions by the use of stoves with chimney; this fraction results in lower rates of emission of contaminants in kitchens, which contributes to the reduction in health impacts due to the use of this type of devices.

Directed by: Dr. Marco Antonio Martínez Cinco y M. in C. Víctor Manuel Ruiz García.

## DEDICATORIA

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y proveer de salud a mis seres queridos y a mí para lograr este objetivo; además de su infinita bondad y amor.

A mi hija, Victoria Elizabeth quien es mi orgullo y motivación para esforzarme cada día. Gracias por llegar a mi vida, y espero estar contigo el mayor tiempo que Dios me lo permita.

A mi esposa, María Fernanda Islas Hernández quien me acompaña en todo momento y a quien agradezco toda la paciencia, apoyo y el amor que me ha tenido durante el desarrollo de este proyecto.

A mi mamá, Raquel Tinoco Vázquez quien será mi ejemplo a seguir toda la vida pues fomento en mí valores invaluable que espero transmitir a su nieta. Gracias por todo lo que nos has dado a Beto y a mí; no tenemos con que pagar todo tu esfuerzo.

A mi papá, Juan Vázquez Balderas quien me ha brindado su apoyo incondicional a lo largo de mi vida, y quien siempre ha fomentado en mí la importancia de seguir superándose y conseguir las metas que nos proponemos.

A mi hermano, Alberto Florentino quien me ha acompañado durante toda mi vida en momentos de tristeza y felicidad; espero que podamos seguir cerca y cuidar siempre uno del otro como nos enseñaron nuestros padres.

A mi tío, Salvador Tinoco Vázquez quien siempre me ha dado consejos fundamentales en los diversos aspectos de mi vida. Además de enseñarme la importancia del trabajo y el apoyo en familia.

A mis amigos. Lalo, Ulises, Chava y Gustavo; con quienes he vivido experiencias únicas, y agradezco a la vida la oportunidad de conocerlos.

A mis compañeros y amigos de ECOTEC, Alfredo, Víctor, Quique, Paulo, Omar, Iván, Vane, Dante, Luis, Luz, Minerva, Saraí y Adrián; de quienes me llevo recuerdos inolvidables.

# ÍNDICE

RESUMEN .....	i
ABSTRACT.....	ii
DEDICATORIA .....	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
AGRADECIMIENTOS .....	ix
GLOSARIO .....	x
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Antecedentes .....	9
1.3 Justificación .....	13
1.4 Hipótesis .....	13
1.5 Objetivos.....	14
2. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1 Proceso de combustión de biomasa .....	15
2.2 Parámetros que afectan las concentraciones de contaminantes dentro de las cocinas .....	17
2.3 Diseño de la captura de gases y trenes de muestreo .....	19
2.4 Método de decaimiento del gas trazador .....	23
2.5 Modelos para calidad del aire interior .....	25
2.5.1 Modelo de caja simple.....	26
2.5.2 Modelo de Caja Simple con Simulación Monte Carlo.....	27
2.6 Guías de Calidad del Aire (AQG) .....	28
2.7 Distribución normal .....	29
3. METODOLOGÍA .....	32
3.1 Protocolos y métodos .....	32
3.1.1 Prueba de ebullición de agua (WBT).....	32
3.1.2 Método de decaimiento del gas trazador .....	33
3.1.3 Método para la evaluación de las emisiones .....	35

3.1.4 Modelo de Caja Simple con Simulación Monte Carlo.....	41
3.2 Captura de gases y trenes de muestreo .....	42
3.3 Estufa Patsari.....	45
3.4 Equipos de medición .....	46
3.5 Parámetros de entrada para el MCBM.....	54
4. RESULTADOS.....	55
4.1 Captura de gases y trenes de muestreo .....	55
4.1.1 Evaluación de Emisiones.....	59
4.2 Porcentaje de emisiones intra-domiciliarias .....	67
4.2.1 Prueba de exactitud de las balanzas analíticas .....	68
4.3 Parametrización de las variables de entrada al MCBM .....	69
4.3.1 Comparación de los rangos de velocidad para los ensayos de TIA.....	69
4.3.2 Datos de entrada al MCBM .....	71
4.3.3 Evaluación del supuesto de normalidad en las variables .....	73
4.3.4 Resultados del uso del MCBM.....	81
4.4 Discusión de resultados.....	85
4.4.1 Porcentaje de emisiones intra-domiciliarias .....	85
4.4.2 Parametrización del MCBM.....	85
CONCLUSIONES .....	87
RECOMENDACIONES .....	88
BIBLIOGRAFIA .....	89
ANEXOS.....	97

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de desempeño evaluados en un dispositivo de cocción en una prueba WBT. ....	9
Tabla 2. Guías de Calidad del Aire interior de la Organización Mundial de la Salud. ....	28
Tabla 3. Niveles de confianza para los coeficientes de correlación del gráfico Cuantil-Cuantil en la prueba de normalidad. ....	31
Tabla 4. Porcentaje de vientos dominantes del periodo 2003-2011 en la zona metropolitana de la ciudad de Morelia Michoacán. ....	34
Tabla 5. Resultados de Eficiencia de combustión modificada, tasas de emisión totales y porcentaje de emisiones intra-domiciliarias de cada contaminante utilizando el WBT. ....	67
Tabla 6. Resultados de las pruebas de exactitud de las balanzas analíticas. ....	68
Tabla 7. Rangos de velocidad registrados en las instalaciones de GIRA. ....	70
Tabla 8. Variables de entrada al MCBM y su distribución asumida. ....	71
Tabla 9. Coeficientes de correlación del supuesto de normalidad de cada variable y su nivel de significancia. ....	79
Tabla 10. Resultados de la simulación del MCBM para la estufa Patsari y el TSF. ....	81
Tabla 11. Resultados de la evaluación de las emisiones de los 10 WBT. ....	97
Tabla 12. Concentración ambiente de PM <sub>2,5</sub> del Observatorio Atmosférico de Morelia, para el año 2016. ....	99

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de estufas. ....	6
Figura 2. Proceso de combustión de biomasa y temperaturas de formación de cada una de sus 4 etapas. ....	16
Figura 3. Esquema de los factores que afectan la calidad del aire interior. ....	17
Figura 4. Método gravimétrico para la medición de material particulado. ....	20
Figura 5. Método para la medición de especies gaseosas. ....	20
Figura 6. Modelo de caja con mezclado homogéneo. ....	24
Figura 7. Temperatura durante las tres fases de la prueba de ebullición de agua. ....	32
Figura 8. Cocina Simulada 1 en GIRA. ....	33
Figura 9. Cocina Simulada 2 en GIRA. ....	34
Figura 10. Vista frontal de la doble campana de extracción. ....	42
Figura 11. a) Vista vertical y b) vista lateral de la doble campana de extracción. ....	43
Figura 12. Estructura tridimensional de la doble campana de extracción. ....	44
Figura 13. Estufa Patsari. ....	45
Figura 14. Sistema Portátil de Medición de Emisiones. ....	46
Figura 15. Monitor de las concentraciones de CO y CO <sub>2</sub> . ....	47
Figura 16. Monitor de velocidad y temperatura. ....	47
Figura 17. Sistema gravimétrico del PEMS. ....	48
Figura 18. Ciclón para PM <sub>2.5</sub> . ....	48
Figura 19. Bombas de succión para la extracción de la muestra. ....	49
Figura 20. Medidor de flujo. ....	49
Figura 21. Cuarto de pesado. ....	50
Figura 22. Báscula semi micro-analítica. ....	50
Figura 23. Báscula micro-analítica. ....	51
Figura 24. Kit de masas estándar para básculas analíticas. ....	51
Figura 25. Filtros de fibra de vidrio. ....	52
Figura 26. Desionizador. ....	52
Figura 27. Gabinetes desecadores para filtros. ....	53
Figura 28. Campana para la captura de las emisiones de la chimenea. ....	55
Figura 29. Campana para la captura de las emisiones intra-domiciliarias. ....	55
Figura 30. Doble campana para extracción y captura de las emisiones de la chimenea e intra-domiciliarias. ....	56
Figura 31. Tren de muestreo de las emisiones de la chimenea. ....	57
Figura 32. Tren de muestreo de las emisiones intra-domiciliarias. ....	58
Figura 33. Comparación de las velocidades del viento entre la ciudad de Morelia y GIRA en Pátzcuaro. ....	69
Figura 34. Gráfico Cuantil-Cuantil Tasa de Intercambio de Aire Cocina Simulada 1. ....	73
Figura 35. Gráfico Cuantil-Cuantil Tasa de Intercambio de Aire Cocina Simulada 2. ....	73



Figura 36. Gráfico Cuantil-Cuantil Volumen de cocinas.....	74
Figura 37. Gráfico Cuantil-Cuantil Tiempo de cocinado.....	74
Figura 38. Gráfico Cuantil-Cuantil Tasa de emisión CO de la estufa Patsari utilizando el WBT. ....	75
Figura 39. Gráfico Cuantil-Cuantil Tasa de emisión CO de la estufa Patsari utilizando el WBT. ....	75
Figura 40. Gráfico Cuantil-Cuantil Tasa de emisión PM <sub>2.5</sub> de la estufa Patsari utilizando el WBT. .	76
Figura 41. Gráfico Cuantil-Cuantil Porcentaje de emisiones intra-domiciliarias PM <sub>2.5</sub> de la estufa Patsari utilizando el WBT. ....	76
Figura 42. Gráfico Cuantil-Cuantil Tasa de emisión CO del TSF utilizando el WBT. ....	77
Figura 43. Gráfico Cuantil-Cuantil Tasa de emisión PM <sub>2.5</sub> del TSF utilizando el WBT. ....	77
Figura 44. Gráfico Cuantil-Cuantil Tasa de emisión CO de la estufa Patsari utilizando el CBC. ....	78
Figura 45. Gráfico Cuantil-Cuantil Tasa de emisión PM <sub>2.5</sub> de la estufa Patsari utilizando el CBC. .	78
Figura 46. Histograma de frecuencias de la concentración calculada a 24 horas por el MCBM para PM <sub>2.5</sub> de la estufa Patsari. ....	82
Figura 47. Histograma de frecuencias de la concentración calculada a 24 horas por el MCBM para PM <sub>2.5</sub> del TSF. ....	83
Figura 48. Histograma de frecuencias de la concentración calculada a 24 horas por el MCBM para CO de la estufa Patsari. ....	83
Figura 49. Histograma de frecuencias de la concentración calculada a 24 horas por el MCBM para CO del TSF. ....	84
Figura 50. Gráfico de la concentración ambiente de PM <sub>2.5</sub> del Observatorio Atmosférico de Morelia, para el año 2016. ....	100

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), así como a la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental y su planta docente, por darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría. También a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES) por otorgarme un espacio de trabajo para el desarrollo de este trabajo de investigación. Al mismo tiempo al Laboratorio de Innovación y Evaluación en Estufas de Biomasa (LINEB) y al Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropriada, A.C. (GIRA) por haber suministrado los equipos de medición, los recursos humanos y de infraestructura necesarios para el desarrollo de las pruebas experimentales de este trabajo de investigación.

Asimismo, quiero expresar mi sincero agradecimiento a mi asesor de tesis el Dr. Marco Antonio Martínez Cinco por brindarme todo su apoyo y tiempo para concretar este trabajo. A mi Co-asesor M.C. Víctor Manuel Ruiz García quien fue el artífice en la concepción de este estudio. Al Dr. Omar Masera Cerutti por asesorar y enfocar las piezas medulares de este proyecto de investigación. Así como a los miembros del comité tutorial, el Dr. Rafael Huirache Acuña y el Dr. Roberto Guerra González por sus valiosos comentarios y aportaciones para la mejora continua de este trabajo durante los tutoriales de avance de tesis.

Agradezco al personal del Laboratorio de Bioenergía y de la Unidad de Ecotecnologías, especialmente a los técnicos académicos M.C. René D. Martínez Bravo y M.I. Alfredo Fuente Gutiérrez por el soporte técnico y su valiosa aportación en los insumos necesarios para llevar a cabo este trabajo. También agradezco al Clúster de Biocombustibles Sólidos para la Generación de Térmica y Eléctrica, Secretaría de Energía (SENER)-CONACyT-2014 No. 246911 por los recursos económicos brindados para la culminación de este trabajo de tesis.

Agradezco al personal del IIES especialmente al equipo de la unidad de Tecnologías de la Información y Comunicaciones integrado por la Ing. Atzimba López Maldonado, el M.I. Alberto Valencia García y el Dr. Heberto Ferreira Medina por todo el apoyo técnico y la infraestructura otorgada.

Finalmente, agradezco a mis compañeros de la Unidad de Ecotecnologías de la UNAM (Campus Morelia): al Dr. Paulo Cesar Medina Mendoza por su ayuda en los ensayos realizados en laboratorio y su aporte de datos utilizados en este trabajo; a Enrique Tapia Rodríguez por su gran apoyo en la construcción de la doble campana de extracción, la cual fue fundamental para los ensayos en laboratorio; y al Ing. Omar Caballero Magaña e Ing. Dante Samuel Villanueva Peralta por su apoyo durante los ensayos realizados en campo.

## GLOSARIO

**AQG:** Guías para la Calidad del Aire Interior de la OMS.

**Biomasa:** Cualquier materia orgánica que puede ser renovable. Incluye combustibles sólidos como: la leña, cultivos agrícolas, residuos de cultivos, residuos orgánicos municipales, el estiércol, etc.

**CBC:** Ciclo de Cocinado Controlado.

**CO:** Monóxido de Carbono.

**CO<sub>2</sub>:** Bióxido de Carbono.

**Concentración intramuros:** es la cantidad de un contaminante en un determinado volumen dentro del cuarto de cocinado, o limitado por el volumen entre los muros.

**Determinar:** establecer un tipo de dato o información, así como fijar los términos que lo describirán y lo delimitarán. Para el caso de este trabajo establecer los rangos y límites de las emisiones intra-domiciliarias.

**Emisiones intra-domiciliarias:** emisiones que regresan de la cámara de combustión, fugas que existen entre la plancha y la superficie de la estufa, o por deficiencias del tiro (natural o forzado) producido entre la chimenea y la cámara de combustión.

**EPA:** Agencia de Protección Ambiental.

**GACC:** Alianza Global para el Cocinado Limpio.

**GIRA:** Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada.

**IAH:** Intercambios de Aire por Hora.

**IAP:** Contaminación del Aire Interior.

**IAQ:** Calidad del Aire Interior.

**IEA:** Agencia Internacional de Energía.

**INECC:** Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

**INSP:** Instituto Nacional de Salud Pública.

**LINEB:** Laboratorio de Innovación y Evaluación de Estufas de Biomasa.

**Medir:** Determinar la longitud, extensión, volumen, cantidad o capacidad de una cosa por comparación con una unidad establecida que se toma como referencia, generalmente mediante algún instrumento graduado con dicha unidad

**MCBM:** Modelo de Caja Simple con Simulación Monte Carlo.

**MCE:** Eficiencia de Combustión Modificada.

**OMS:** Organización Mundial de la Salud.

**PEMS:** Sistema Portátil de Medición de Emisiones

**PM<sub>2.5</sub>:** Material particulado de 2.5 micrómetros de diámetro aerodinámico.

**Q-TRAK:** Monitor de la concentración de CO y CO<sub>2</sub>.

**REMBIO:** Red Mexicana de Bioenergía.

**RUOA:** Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos.

**TIA:** Tasa de Intercambio de Aire por Hora.

**TSF:** Fogón de Tres Piedras.

**UNAM:** Universidad Nacional Autónoma de México.

**Velocicalc:** Monitor de velocidad y temperatura.

**WBT:** Prueba de Ebullición de Agua.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Generalidades

### Uso de biomasa como combustible

De acuerdo con datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), alrededor de 3,000 millones de personas en el mundo, cocinan y calientan sus hogares utilizando combustibles sólidos (WHO, 2014). Estos combustibles son: la leña, carbón vegetal y mineral, residuos de cosecha, estiércol de animales y diversos residuos (Jetter y col. 2009). La Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en Inglés) considera que el uso de biomasa es hoy la mayor fuente de energía renovable, con un 10% del suministro mundial de energía primaria. Desempeñando un papel crucial en muchos países en desarrollo, donde proporciona energía básica para la cocción de alimentos y la calefacción de espacios (IEA, 2017).

Aproximadamente el 80% de la población rural de México que representa 22.5 millones de personas, dependen de la leña para cocinar, para calefacción de interiores y otras tareas domésticas (Serrano-Medrano, 2016). La leña representa aproximadamente el 80% de la energía utilizada en los hogares y el 50% del uso total de energía en las comunidades rurales (Díaz, 2000). Desafortunadamente, la mayoría de los habitantes de estas zonas siguen utilizando algún tipo de fogón (fogón tipo “U” y fogón tres piedras) para llevar a cabo estas tareas; debido principalmente a la situación económica y a las costumbres regionales (Maserá y col. 2005), y teniendo como resultado impactos a la salud de los usuarios por los contaminantes del humo provenientes de la combustión de leña (Riojas-Rodríguez y col. 2006). En México, hacer tortillas representa más de la mitad del consumo de leña, y las mujeres gastan entre 2 y 4 hr/día en esta tarea, respirando el humo de la combustión (Berrueta y col. 2008). Las mujeres que tienen negocios para hacer y vender tortillas, que pueden llegar a ser hasta el 20 % en algunas comunidades y pasan hasta 8 hr/día en estas condiciones (Maserá, 1995).

Además, el uso tradicional de biomasa tiende a tener eficiencias térmicas y de combustión muy bajas, y puede causar graves impactos a la salud. También representa

otros problemas debido al tiempo, esfuerzo y costos requeridos para recoger y/o comprar leña; en las comunidades rurales de México la gente gasta en promedio entre 15 y 20% de sus ingresos en la compra de este combustible (Masera y col. 1997). El uso de la leña como combustible primario, probablemente continúe en las comunidades rurales mexicanas por lo menos en las próximas décadas; por lo que existe una necesidad imperiosa de adoptar medidas eficaces, que reduzcan las cargas de efectos a la salud como consecuencia de la exposición a los subproductos de la combustión de la leña (Berrueta y col. 2008).

## **Efectos por el uso de biomasa en los hogares**

Cowlin (2005), sugiere que en los hogares donde se utilizan combustibles sólidos en interiores como fuente para la cocción de alimentos y la calefacción de espacios; la contaminación puede llegar a niveles que exceden los estándares establecidos para proteger la salud humana. Además, se sabe que el humo de la combustión de biomasa, contiene un gran número de contaminantes como: material particulado, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, óxidos de azufre (principalmente del carbón), formaldehídos y materiales orgánicos policíclicos, incluyendo carcinógenos como el benzopireno (Ezzati et al., 2000 y Smith y col. 2000). Aunado a la presencia de estos contaminantes, los efectos del humo de combustión de biomasa sobre la salud humana, han sido revisados exhaustivamente por Naeher y col. (2007), quienes encontraron evidencia consistente de que el humo de biomasa aumenta el riesgo de morbilidad (tasa en que las personas padecen cierta enfermedad) y mortalidad (tasa en que las personas mueren a causa de una enfermedad) humana por enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Albalak y col. 2001; Smith, 2004; Von Schirnding y col. 2002).

Existe una fuerte evidencia sobre los efectos de la contaminación del aire interior en los cuartos de cocinado, principalmente en las infecciones respiratorias agudas bajas, la causa más importante de mortalidad en niños menores de 5 años, la enfermedad pulmonar obstructiva crónica, bronquitis y cáncer de pulmón (Bruce y col. 2013). Por lo que, la contaminación del aire en los hogares por la quema de combustibles sólidos en fogones tradicionales afecta la salud pública; impactando principalmente en los hogares de países en vías de desarrollo (Bruce y col. 2015).

Un estudio sobre la carga mundial de las enfermedades, causadas por cocinar con combustibles sólidos en dispositivos ineficientes, estimó que causó 3.5 millones de muertes prematuras en 2010; con otras 0.5 millones de muertes causadas por la contaminación atmosférica, que se atribuyen a las emisiones por el cocinado con combustibles sólidos. (Lim y col. 2013; Smith y col. 2014). Recientes estimaciones de la Organización Mundial de la Salud para 2012, utilizando métodos similares pero datos actualizados sobre el uso de combustibles sólidos y mortalidad, reportaron 4.3 millones de muertes prematuras (WHO, 2014).

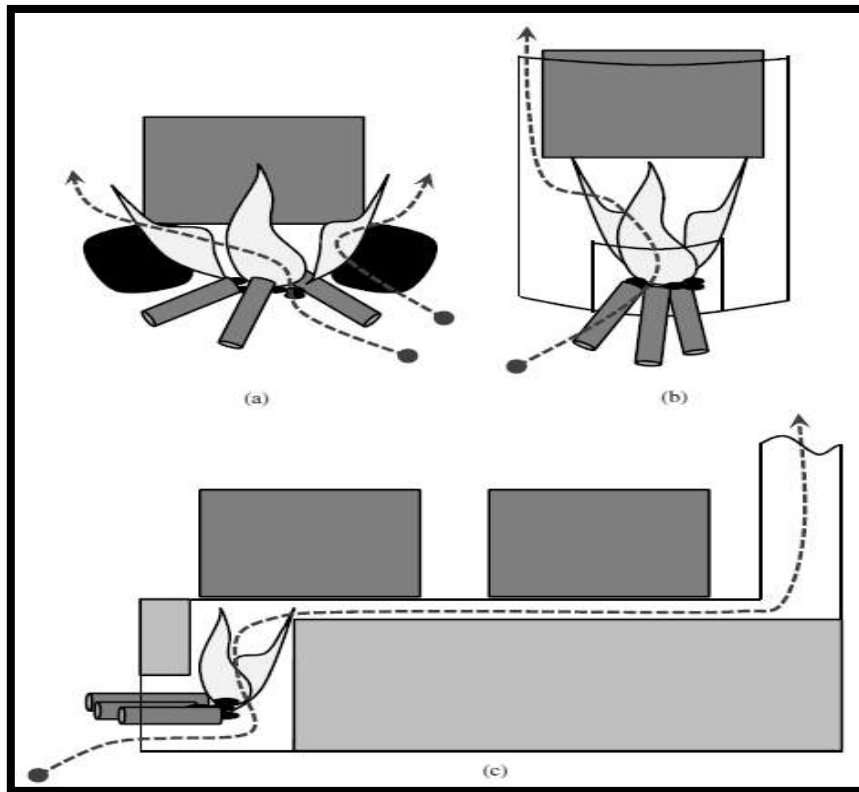
Además la contaminación del aire en los hogares es un importante contribuyente a la contaminación atmosférica por material particulado; pues se calcula que para el 2010 represento el 16% de la carga mundial de contaminación atmosférica por este contaminante (Lim y col. 2013). De acuerdo con Smith y colaboradores en el 2004, los patrones actuales del uso de la biomasa provocan impactos negativos de varios tipos: incluyendo la morbilidad y mortalidad humana, la contaminación del aire, emisiones de gases con efecto invernadero, y la deforestación.



## **Estufas Eficientes de Biomasa**

Con el fin de reducir los impactos a la salud, el medio ambiente y el consumo de combustible; surgen las estufas eficientes de biomasa que se han difundido por todo el mundo buscando sustituir el uso de los fogones tradicionales. Debido principalmente a que estos dispositivos eficientes producen menores emisiones de CO, menores emisiones de material particulado de 2.5  $\mu\text{m}$  de diámetro aerodinámico (PM<sub>2.5</sub>), además de que presentan un desempeño energético mayor. Estos dispositivos de cocción tienen la capacidad de reducir la contaminación del aire en interiores (Armendáriz y col. 2008), las emisiones de gases de efecto invernadero y carbono negro (Johnson y col. 2008), la cantidad de tiempo y/o dinero gastado en la compra de leña; y la demanda en los recursos de leña locales (Barnes y col. 1993).

Existen distintos modelos alrededor del mundo; ya que varían desde el diseño, el tamaño y materiales de los que están hechas, así como el tipo de combustible que utilizan. En la Figura 1 se muestran los tres tipos principales de estufas de biomasa tradicionalmente basados en el diseño de la cámara de combustión: a) cocinado a fuego abierto, b) cocinado con fuego blindado, c) cocinado a fuego cerrado con chimenea. (MacCarty, 2013).



**Figura 1.** Tipos de estufas: (a) Cocinado a fuego abierto, (b) cocinado con fuego blindado, (c) cocinado a fuego cerrado con chimenea. (Crédito de la figura: *MacCarty 2013*).

Durante mucho tiempo las estufas eficientes de biomasa, han sido identificadas como una opción prometedora para reducir los impactos negativos del cocinado con fogones y estufas tradicionales (Ruiz-Mercado y col. 2011). Las primeras intervenciones para la difusión de las estufas eficientes se remontan a la década de 1970 y es hasta el nuevo milenio que fueron diseñadas principalmente para aumentar la eficiencia en el uso del combustible, a menudo debido a un vínculo que se percibe entre la deforestación y la energía en el hogar (Arnold y col. 2003). Más recientemente, los esfuerzos para reducir los impactos a la salud, mediante la reducción de la contaminación del aire interior por el uso de combustibles sólidos tradicionales; han llegado a ser incluidos en los programas, así como las posibilidades de mitigar impactos al cambio climático, debidos al uso de estos dispositivos de cocción eficientes (Smith y Haigler, 2008; Johnson y col. 2009). Actualmente más de 160 programas de estufas eficientes se están ejecutando en el mundo, los cuales varían en tamaño, alcance, tipo de estufa diseminada, enfoque del diseño, difusión de tecnología y mecanismos financieros (Gifford, 2010).

Al mismo tiempo, las estufas eficientes de biomasa tipo plancha han sido ampliamente difundidas en México, ya que se adaptan bien a las costumbres locales de cocción y son ampliamente aceptadas en las comunidades locales (REMBIO, 2011). Sin embargo, aunque este tipo de dispositivos de cocción han sido promovidos en México durante 15 años, principalmente para la reducción en el consumo de combustible y la deforestación asociada (Masera y col. 2000); se ha llevado a cabo poca evaluación sistemática de la reducción de las concentraciones interiores de CO y material particulado que resultan de la instalación de una estufa eficiente (Berrueta y col. 2008).

Los beneficios del programa de estufas eficientes de biomasa en México se han estimado en algunos estudios, tales como una reducción en las exposiciones a material particulado y monóxido de carbono (Armendáriz y col. 2008). Así como el impacto de la estufa Patsari en la calidad del aire interior (Masera y col. 2007). También se realizó un estudio sobre el impacto de las estufas eficientes en las concentraciones de material particulado en microambientes, como lo es el contorno de la estufa, la cocina y el patio del hogar, por Zuk y colaboradores en el 2007. Además se realizó un estudio del impacto sobre la salud respiratoria de la mujer (Romieu y col. 2009), donde se llevaron a cabo encuestas sistemáticas para determinar los síntomas por el uso de una estufa eficiente, muestras de sangre y pruebas de espirometría, que son pruebas para conocer la capacidad pulmonar de los usuarios.

## **Guías de calidad del aire interior de la OMS**

Las nuevas Guías para la Calidad del Aire Interior de la OMS (AQG, por sus siglas en Inglés) han sido desarrolladas para establecer límites de la concentración de contaminantes dentro de los hogares; y orientar a los países a reducir eficazmente la carga de salud pública por el uso de fogones y estufas tradicionales (Bruce y col. 2013). Estas guías se basan en las AQG de la OMS existentes para la contaminación del aire interior (WHO, 2006), y el apartado de AQG del 2010 para contaminantes selectos (WHO, 2010). La OMS asume que el uso de estufas tipo plancha con chimenea, tiene como resultado que: respecto a la emisión total de la estufa, el  $25 \pm 10 \%$  (Johnson y col. 2014) son emisiones intra-domiciliarias; las cuales en conjunto con variables de las cocinas tiene como consecuencia concentraciones de contaminantes altas, que pueden causar impactos adversos a la salud de los usuarios.

Con el desarrollo de la presente investigación, se determinaron las tasas de emisión intra-domiciliaria de los contaminantes CO y PM<sub>2.5</sub>, así como el porcentaje que representa respecto a la emisión total de la estufa Patsari. Mediante el uso del protocolo internacional WBT, bajo condiciones controladas en laboratorio.

## 1.2 Antecedentes

### Protocolos de evaluación

La Alianza Global para el Cocinado Limpio (GACC, por sus siglas en inglés), ha desarrollado diferentes protocolos de evaluación, con el fin de ayudar a los gobiernos a determinar las mejores opciones para reducir los impactos a la salud y propiciar el ahorro en el consumo de combustible; por la sustitución de fogones y estufas tradicionales con estufas eficientes de biomasa. El protocolo más utilizado y mayormente reportado en los artículos de investigación es la prueba de ebullición de agua (WBT por sus siglas en inglés); la cual es una simulación simplificada del proceso de cocción realizado en condiciones controladas en laboratorio. Los resultados principales del WBT son los Tiers, que son criterios de valor que sirven para clasificar una maquina por su nivel de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y de otros contaminantes a la atmosfera, se desarrollaron en EUA en 1991 para clasificar automóviles (WBT 4.2.4). La Tabla 1 muestra los nueve conceptos de Tiers para calificar el desempeño energético, de emisiones, y de seguridad de una estufa eficiente de biomasa.

**Tabla 1.** Parámetros de desempeño evaluados en un dispositivo de cocción en una prueba WBT. Referencia WBT 4.2.4

ISO VITA WBT Tiers	Unidades	Tier 0	Tier 1	Tier 2	Tier 3	Tier 4
Eficiencia Térmica en alto poder	%	<15	≥15	≥25	≥35	≥45
Consumo específico	MJ/min/L	>0.05	≤0.05	≤0.039	≤0.028	≤0.017
CO en alto poder	g/MJ	>16	≤16	≤11	≤9	≤8
CO en bajo poder	g/min/L	>0.2	≤0.2	≤0.13	≤0.1	≤0.09
PM en alto poder	Mg/MJd	>979	≤979	≤386	≤168	≤41
PM en bajo poder	Mg/min/L	>8	≤8	≤4	≤2	≤1
Emisiones intramuros de CO	g/min	>0.97	≤0.97	≤0.62	≤0.49	≤0.42
Emisiones intramuros de PM	mg/min	>40	≤40	≤17	≤8	≤2
Seguridad		<45	≥45	≥75	≥88	≥95

Nota: Los indicadores Tiers se califican en un rango de 0-4, donde 4 es lo mejor y 0 lo peor.

De los parámetros de la Tabla 1, los Tiers de emisiones intramuros de CO y PM<sub>2.5</sub> son estimados como una fracción del total de las emisiones del dispositivo de cocción. El WBT realiza este cálculo para las estufas con chimenea, asumiendo que el  $25 \pm 10\%$  de las emisiones de la chimenea se encuentran dentro del cuarto de cocinado, también conocidas como emisiones intra-domiciliarias.

## Estado del Arte

Se han realizado estudios en campo, para determinar las concentraciones de contaminantes, en los hogares de los usuarios de estufas eficientes de biomasa tipo “plancha” en México. Masera y colaboradores en el 2007, determinaron el impacto de la instalación de la estufa Patsari en la zona Purepecha del estado de Michoacán. Armendáriz y colaboradores en el 2008, estudiaron la reducción en la exposición personal de los contaminantes  $PM_{2.5}$  y CO por el uso de la estufa Patsari en la zona Purepecha del estado de Michoacan. En 2009 el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) realizó un estudio comparativo de estufas mejoradas para sustentar un programa de intervención masiva en México; para lo cual se utilizaron equipos de monitoreo para determinar las concentraciones promedio de CO y  $PM_{2.5}$  dentro de la cocina, utilizando la estufa Patsari y el protocolo WBT; donde se reportaron resultados promedios de concentraciones durante la prueba WBT (Blanco y col. 2009).

### Uso del MCBM y parametrización de variables ambientales

Para la evaluación del desempeño de las estufas eficientes de biomasa, se utilizó el modelo de caja simple para modelar la concentración de contaminantes dentro de los hogares en la India. El trabajo fue realizado por Johnson y colaboradores en el 2011, y presenta el uso del Modelo de Caja Simple con Simulación Monte Carlo (MCBM, por sus siglas en inglés), el cual predice las concentraciones de contaminantes en el ambiente interior de la cocina, dado el rendimiento de una estufa así como las características de la cocina. Se expone también la utilidad del modelo, mediante la presentación de las distribuciones simuladas de la contaminación del aire interior (IAP por sus siglas en inglés) en las cocinas, basadas en una serie de escenarios de cocina/combustible, comparándolos con las Guías de Calidad del Aire (AQGs por sus siglas en inglés) de la OMS para  $PM_{2.5}$  y CO. El MCBM también fue utilizado por Johnson y Chiang en el 2015, para evaluar diferentes escenarios del desplazamiento de estufas tradicionales por el uso de estufas eficientes de biomasa; donde los impactos a la

calidad del aire interior y el consumo de combustible se estimaron usando dicho modelo.

Dentro de las características o variables de la cocina, que considera el MCBM se encuentran: el volumen de la cocina; el tiempo de cocinado; y la ventilación o tasa de intercambio de aire, mediante la cual los contaminantes intra-domiciliarios son expulsados hacia el exterior de la habitación. La exposición de contaminantes en construcciones ventiladas de forma natural; dependerá de las características de la construcción, ubicación geográfica, condiciones meteorológicas tales como: diferencias de temperatura interior/exterior, velocidad del viento, y comportamiento del ocupante o usuario (Yamamoto y col. 2010; Wallace y col. 2002; Murray y Burmaster, 1995). En 2013 se realizó un estudio de rosa de los vientos en la zona metropolitana de la ciudad de Morelia, Michoacán (Alemán, 2013), con datos meteorológicos de las estaciones del año, del año 2003 al 2011. Donde se reportó que para todas las estaciones del año más del 84% de los porcentajes de velocidades estaban dentro de los rangos de velocidad de 0.3-1.6m/s y 1.6-3.4m/s.

El método de decaimiento del gas trazador, de una zona o zona simple, permite determinar la tasa de ventilación de una habitación; requiere equipo relativamente sencillo y puede realizarse con un nivel mínimo de análisis de datos (Okuyama y Onishi, 2012). En la investigación realizada por Cowlin (2005) en San Lorenzo, Guatemala; se utilizó el CO como gas trazador y mediante el uso de una ecuación se determinó la tasa de ventilación de los hogares.

El aporte del presente trabajo de investigación es: la determinación del porcentaje de emisiones intra-domiciliarias de la estufa de tipo “plancha” Patsari. Así como la parametrización de las variables de entrada al MCBM, con variables propias de la zona Purepecha del estado de Michoacán. Así mismo, pretende demostrar que el protocolo WBT puede estar sobrestimando el porcentaje real de emisiones intra-domiciliarias por el uso de estufas tipo plancha con chimenea; las cuales tienen como consecuencia concentraciones de contaminantes en las cocinas que causan efectos adversos a la salud de los usuarios. Este trabajo forma parte de una investigación mayor, la cual contempla más dispositivos de cocción y métodos para determinar el desempeño energético; así como emisiones de gases con efecto invernadero de estufas que utilizan biomasa como combustible.



### **1.3 Justificación**

Actualmente es necesario conocer las tasas de emisión intra-domiciliarias de estufas con chimenea, ya que internacionalmente los protocolos de evaluación no contemplan este tipo de dispositivos; asumiendo que el porcentaje de emisiones intra-domiciliarias es en promedio 25% con una desviación estándar de 10%, respecto del total de las emisiones de la estufa. La medición de estas tasas de emisión intra-domiciliarias son un parámetro necesario para calcular la concentración de contaminantes CO y PM<sub>2.5</sub> que causan impactos a la salud de los usuarios de este tipo de dispositivos de cocción.

En México no se conocen las tasas de emisión intra-domiciliaria de CO y PM<sub>2.5</sub>, por lo cual se desconoce el beneficio que está produciendo el reemplazo de fogones por estufas con chimenea, en las concentraciones de contaminantes en los hogares.

### **1.4 Hipótesis**

Las emisiones intra-domiciliarias de CO y PM<sub>2.5</sub> producidas por la estufa Patsari tipo plancha con chimenea son menores a lo que asume la OMS ( $25 \pm 10\%$ ); y por consecuencia la contribución de estas emisiones se encuentran dentro de los rangos establecidos por la OMS, objetivo interno 1 para PM<sub>2.5</sub> y las AQG para CO.

## **1.5 Objetivos**

### **Objetivo general.**

Determinar las emisiones intra-domiciliarias de los contaminantes CO y PM<sub>2.5</sub> por el uso de la estufa Patsari; utilizando el protocolo internacional WBT.

### **Objetivos específicos.**

- Diseño del método de captura de emisiones en la chimenea y emisiones intra-domiciliarias por el uso de la estufa Patsari.
- Arreglo de trenes de muestreo para la medición en paralelo de las emisiones de la chimenea e intra-domiciliarias.
- Determinación de las tasas de emisión intra-domiciliarias de CO y PM<sub>2.5</sub> mediante el protocolo WBT.
- Parametrizar el MCBM para calcular concentraciones intramuros mediante variables representativas de la zona Purépecha del estado de Michoacán.

## 2. MARCO TEÓRICO

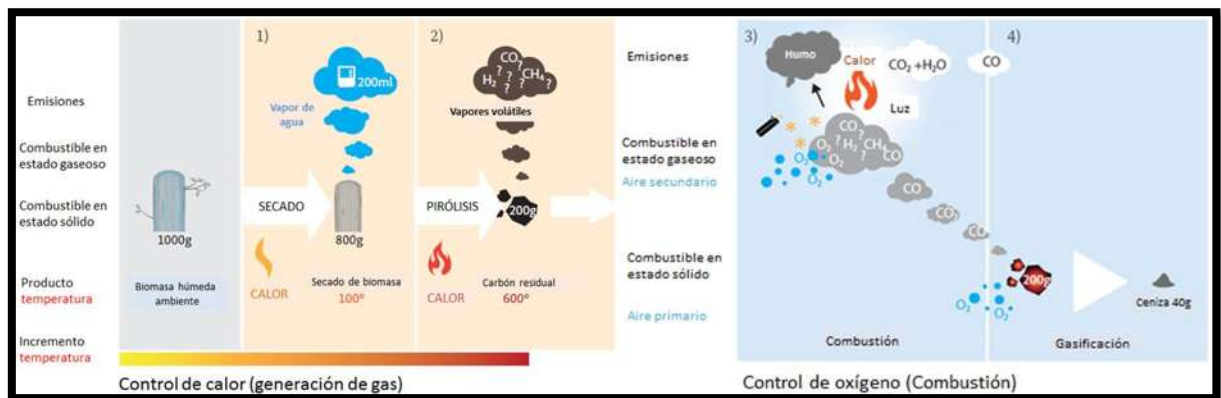
### 2.1 Proceso de combustión de biomasa

El proceso de combustión de biomasa es un fenómeno físico-químico, el cual se lleva a cabo para la generación de energía térmica y/o eléctrica en dispositivos de pequeña, mediana o gran escala. Sin embargo, la quema de biomasa en dispositivos ineficientes tales como los fogones tradicionales, produce una emisión considerable de los productos de la combustión incompleta los cuales tienen un mayor impacto climático que el CO<sub>2</sub> mismo (MacCarty y col. 2008). Estos productos de la combustión incompleta también representan una problemática a la salud de los usuarios, especialmente las emisiones de CO y PM<sub>2.5</sub>. La gran diferencia entre las estufas eficientes de biomasa con los fogones y estufas tradicionales, es la presencia de una cámara de combustión (propia de las estufas eficientes) donde se presentan las condiciones necesarias para optimizar la eficiencia energética y de combustión en los dispositivos eficientes (Medina, 2017).

Existen 4 etapas que describen el proceso de combustión de biomasa las cuales se describen a detalle en el estudio reportado por Roth y colaboradores en el 2014. Las etapas son la que a continuación se presentan:

- 1) SECADO: Se lleva a cabo cuando la biomasa se calienta y se aproxima a 100°C, el exceso de humedad contenido en la biomasa cambia de estado líquido a vapor de agua. El exceso de humedad se evapora en la atmósfera y la biomasa sólida queda seca.
- 2) PIRÓLISIS: A una temperatura superior a 300°C, la pirolisis de la biomasa comienza (ruptura mediante altas temperaturas). El incremento de temperaturas eventualmente ocasiona una conversión completa de la biomasa en vapores volátiles y un residuo sólido llamado carbón residual (el cual se compone principalmente de carbono puro). Los vapores contienen varios compuestos derivados del carbono conocidos como gases volátiles.

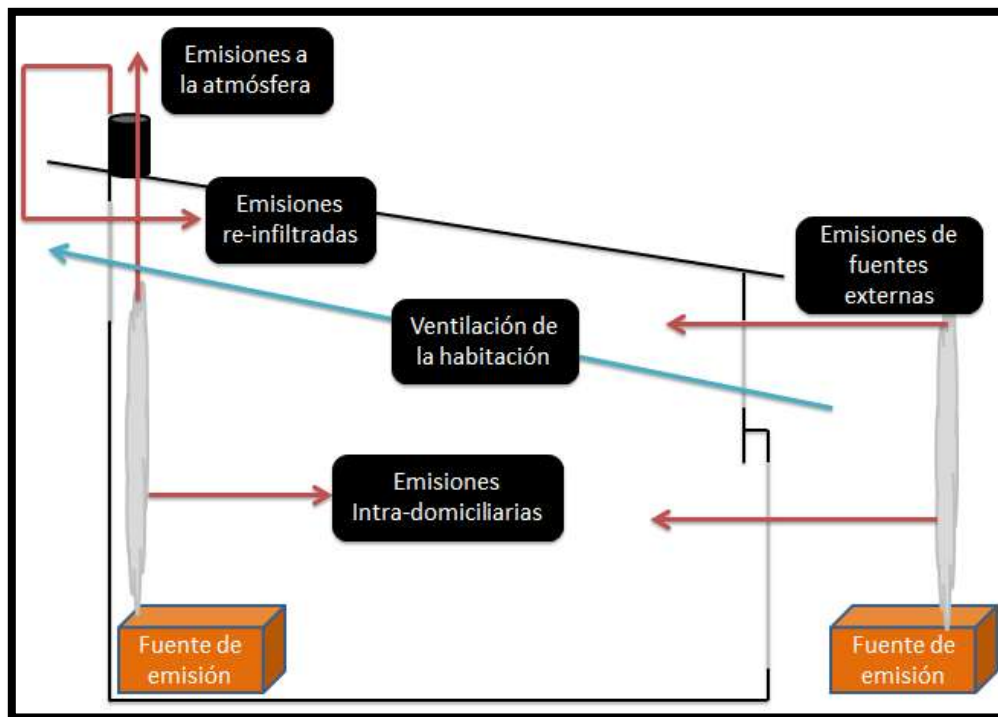
- 3) GASIFICACIÓN: Esta etapa se lleva a cabo en la fase sólida del combustible. Es el paso durante el cual el carbón residual sólido generado por la fase de pirólisis se convierte a ceniza. Aproximadamente a los 600°C los gases volátiles se queman en presencia de un agente de oxidación (oxígeno vía de aire primario).
- 4) COMBUSTIÓN: Esta fase se lleva a cabo cuando todo el combustible se encuentra en estado gaseoso a una temperatura de 800°C o mayor (reacción gas-gas). Los gases combustibles creados en la etapa de gasificación reaccionan con el oxígeno, incrementando el flujo de aire (oxígeno disponible) en la superficie del sólido durante la combustión del carbón residual, aumentará la velocidad de reacción de combustión lo cual también optimiza la eficiencia de combustión. La Figura 2 resume el proceso de combustión de biomasa donde se muestra la formación de cada una de las etapas con sus respectivas temperaturas.



**Figura 2.** Proceso de combustión de biomasa y temperaturas de formación de cada una de sus 4 etapas. (Crédito de la figura: Roth et al., 2014).

## 2.2 Parámetros que afectan las concentraciones de contaminantes dentro de las cocinas

La relación entre las emisiones de las estufas eficientes de biomasa y la calidad del aire interior implica varios factores (véase Figura 3). Sin embargo, las emisiones de las estufas son el principal factor que afecta la calidad del aire interior. La tasa de ventilación (grado en que los contaminantes son sustraídos de la habitación) y el tamaño de la habitación tienen roles de gran importancia; es decir, estufas que emiten bajas cantidades de contaminantes en el ambiente interior por día, es probable que resulte en niveles promedios más bajos de contaminación del aire interior, que las que emiten grandes cantidades (Johnson y col. 2011).



**Figura 3.** Esquema de los factores que afectan la calidad del aire interior. (Fuente: *creación propia*).

Sin embargo, las emisiones y la contaminación del aire interior pueden estar influidas por el uso de varias estufas durante el día, comúnmente para satisfacer la variedad en la cocción de alimentos y las necesidades de calefacción en un hogar (Ruiz-Mercado y col. 2011; y Lewis y col. 2012).

Además, la frecuencia y duración del uso de la estufa tienen cambios en el tiempo debido a factores tales como demandas estacionales para calentar o cocinar, la disponibilidad de combustible y el costo, así como la condición de la estufa u otro dispositivo. La Calidad del Aire Interior (IAQ por sus siglas en inglés) también se ve afectada por la contaminación general del aire exterior, así como factores locales al aire libre; tales como re-infiltración de las emisiones de la estufa (especialmente importante para las estufas con chimenea), quema cercana de basura o residuos de cultivos, el cocinado al aire libre, la contaminación que surge de tráfico cercano, la industria y los hogares (Johnson y col. 2011).

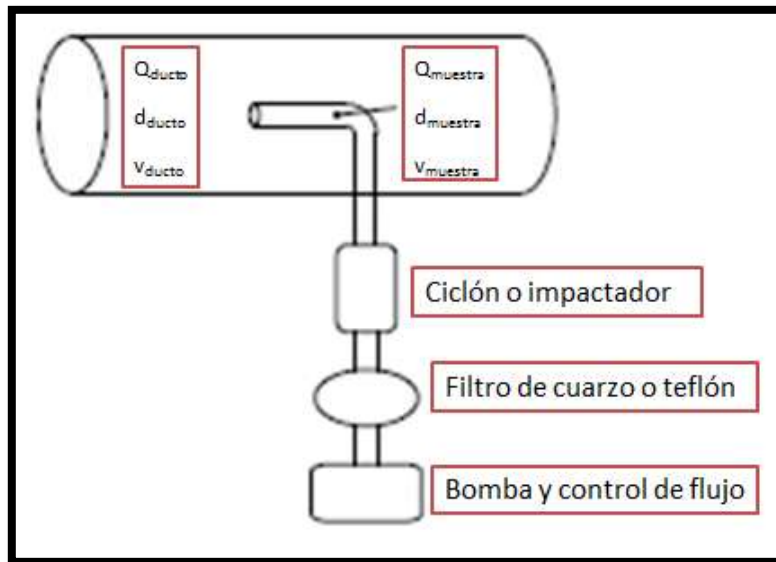
### 2.3 Diseño de la captura de gases y trenes de muestreo

La doble campana de extracción y los trenes de muestreo, que fueron diseñados y construidos como parte de este trabajo de investigación, están basados en los parámetros de diseño del estándar ISO 19867-1 del 2015; que si bien, aún se encuentra bajo revisión es el documento que se pretende sirva como guía para los laboratorios encargados de evaluar dispositivos de cocción a base de biomasa. El objetivo del estándar ISO es el de servir como herramienta y parámetro internacional, en los procedimientos de medición en laboratorio para determinar el funcionamiento de las estufas de biomasa, utilizadas principalmente para la cocción de alimentos en los países en vías de desarrollo.

La metodología propuesta por el estándar para el muestreo de emisiones, se desarrolló a partir de las mejores prácticas de los protocolos de pruebas de estufas existentes, la experiencia de los centros de pruebas de dispositivos de cocción en muchos países; y las normas y métodos de evaluación en los sectores relacionados. Los procedimientos para determinar las emisiones requieren un complejo conjunto de mediciones individuales. Por lo tanto, los resultados obtenidos dependen del proceso de realización de las mediciones, del dispositivo y el método de ensayo utilizado.

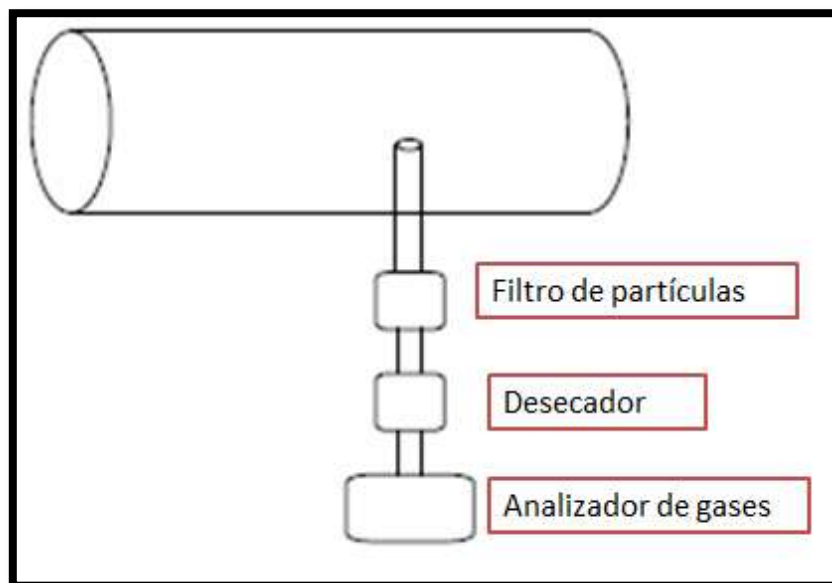
Para el diseño de la campana de extracción de las emisiones de la chimenea y las emisiones intradomiciliarias, se recomienda no utilizar ángulos menores a 45° en las paredes de la campana; utilizar tubos para la extracción de diámetro igual a 6 pulgadas ( $\approx 15$  centímetros); utilizar 2 baffles de mezclado; tomar la muestra en posición vertical; y las distancias apropiadas para la captura de la muestra y medición de la velocidad del flujo.

Para tomar la muestra o capturar adecuadamente el  $PM_{2.5}$ , debe ser medido por el método gravimétrico con filtros de teflón, fibra de vidrio o cuarzo, tal y como lo describe la norma ISO 9096: 2003. El acomodo del puerto de muestreo para material particulado puede observarse en la Figura 4; donde  $d_{muestra}$ =diámetro interno del tubo de muestreo;  $d_{ducto}$ =diámetro interno del ducto del gas exhausto;  $Q_{ducto}$ =tasa del flujo volumétrico del gas exhausto;  $Q_{muestra}$ =flujo volumétrico del puerto de muestreo;  $v_{ducto}$ =velocidad del gas en el ducto;  $v_{muestra}$ =velocidad del gas en el puerto de muestreo.



**Figura 4.** Método gravimétrico para la medición de material particulado.

Para la medición de las especies gaseosas, para el caso de este estudio el monóxido de carbono (CO), el muestreo debe de realizarse de la manera en que lo recomienda el estándar ISO 19867-1, véase Figura 5.



**Figura 5.** Método para la medición de especies gaseosas.



## 2.4 Prueba de ebullición de agua (WBT)

La prueba de ebullición de agua (WBT) es una simulación simplificada del proceso de cocinado. Sirve para comparar el desempeño de estufas en condiciones controladas en laboratorio y en óptimo funcionamiento. En esta prueba se mide el tiempo y la cantidad de combustible consumido al realizar una tarea muy simple: llevar a punto de ebullición una o varias ollas con agua. En el Laboratorio de Innovación y Evaluación en Estufas de Biomasa (LINEB) se utiliza la versión 4.2.4, elaborada por ETHOS & Partnership for Clean Indoor Air en el 2009. La prueba consta de tres fases: inicio frío, inicio caliente (alto poder) y fuego lento (bajo poder). La fase inicio frío tiene como objetivo llevar un determinado volumen de agua de temperatura ambiente a punto de ebullición. En la fase inicio caliente, una vez que se termina el inicio frío, se debe cambiar por agua fresca y llevar a punto de ebullición el mismo volumen de agua que en el inicio frío. Para la fase fuego lento, se mantiene el agua con la que se terminó el inicio caliente; y el objetivo es mantener la temperatura del agua en un rango entre el punto de ebullición local y 6 grados centígrados debajo del punto de ebullición local.

Durante la prueba WBT, se debe contar con la captura de las emisiones provenientes de la estufa; y tener sensores en tiempo real de las concentraciones de CO<sub>2</sub>, CO, PM<sub>2.5</sub>, temperatura, velocidad del flujo; y el sistema gravimétrico para la captura y cuantificación del PM<sub>2.5</sub>. Los principales resultados del consumo energético que se obtienen de la prueba WBT, son: tiempo de ebullición, eficiencia térmica, combustible consumido, tasa de combustión y la potencia de la estufa.

Para evaluar las mediciones de las emisiones de la estufa, se utiliza la Eficiencia Modificada de Combustión (MCE); que es un parámetro para determinar la calidad de la combustión por el uso de las estufas eficientes de biomasa, el cual se basa solo en las emisiones de CO y CO<sub>2</sub> para poder conocer la eficiencia de un proceso de combustión. El fundamento teórico de la MCE es que en una combustión ideal o completa el 100 % del producto es CO<sub>2</sub>; pero como es bien sabido en una combustión real o incompleta el 95% de los productos es CO<sub>2</sub> y CO (90% y 5% respectivamente). La MCE se encuentra reportada en otros estudios (Jetter y col. 2012; y Medina y col. 2017), se define como la fracción de carbono en el combustible emitida como CO<sub>2</sub> (Johnson y col. 2009). La

MCE se determina mediante la relación molar (moles) de CO<sub>2</sub> dividida entre la sumatoria de la cantidad de CO<sub>2</sub> y CO, siguiendo la siguiente ecuación:

$$MCE = \frac{\text{moles de } CO_2}{\text{moles de } (CO_2 + CO)^g}$$

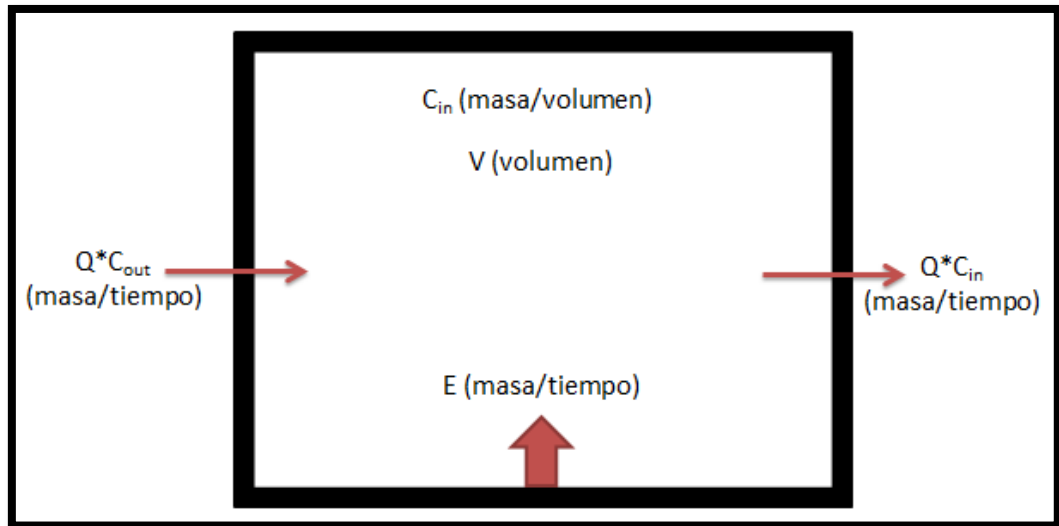
## 2.4 Método de decaimiento del gas trazador

Las mediciones o ensayos de la tasa de ventilación en un cuarto, se llevan a cabo principalmente utilizando técnicas del decaimiento de un gas trazador. En estas técnicas, se inyecta un gas en la zona estudiada y se mide su respuesta de concentración. La técnica más común es el decaimiento de la concentración, en la cual se inyecta una dosis de gas trazador y se mezcla con el aire en la habitación (Cui y col. 2015). La inyección del gas se detiene y la concentración de gas trazador es homogénea, cuando la disminución de la concentración del gas trazador comienza, se registra el período de tiempo en el cual la concentración decae hasta concentración ambiente.

El gas trazador ideal debe ser seguro (no alergénico, no inflamable), no reactivo (no debe reaccionar químicamente o físicamente con el medio ambiente) y fácilmente medible (preferiblemente medir con instrumentación de bajo costo, y que sean capaces de medir concentraciones bajas). Además, el gas trazador debe mezclarse perfectamente con el aire (densidad similar) y distinguirse de los componentes del mismo (Cui y col. 2015).

En el estudio realizado por Cowlin (2005), el gas trazador utilizado fue monóxido de carbono (CO), el cual cumple con los siguientes criterios: el contaminante no reacciona para formar contaminantes secundarios; no se deposita sobre superficies; solamente puede ser removido mediante ventilación; es fácil y barato producirlo mediante la quema de madera u otros combustibles sólidos simples. Con base en este estudio y siguiendo la misma metodología se llevaron a cabo ensayos para determinar la tasa de intercambio de aire en las cabañas simuladas del Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada (GIRA) en Pátzcuaro, Michoacán.

La Figura 6 presenta un modelo de caja simple, donde el aire interior se encuentra mezclado homogéneamente con las emisiones de una fuente de contaminante interior. Por definición, las concentraciones de contaminantes son iguales en todas las zonas de aire dentro de esta caja bien mezclada. Donde la extracción de los contaminantes se debe a la ventilación natural o mecánica de la caja o habitación.



**Figura 6.** Modelo de caja con mezclado homogéneo (Crédito de la figura: Cowlin, 2005).

La tasa de intercambio de aire, a menudo reportada como Intercambios de Aire por Hora (IAH), es el resultado de dividir la tasa de ventilación entre el volumen ( $Q/V$ ) y tiene unidades de  $t^{-1}$ . Si el tiempo en el que la concentración decae a concentración inicial ( $t^*$ ) y las concentraciones del gas trazador inicial y final son conocidas, la tasa de ventilación, en términos de IAH, puede ser calculada de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$IAH = \frac{V}{Q} = \frac{\ln[C_0] - \ln[C(t^*)]}{t^*}$$

## 2.5 Modelos para calidad del aire interior

El uso de modelos matemáticos para relacionar los factores de emisión de las estufas eficientes de biomasa con las concentraciones de contaminantes en los hogares, posee los siguientes beneficios: 1) Estimar los impactos potenciales causados por las concentraciones de contaminantes en el aire interior de los hogares, antes de llevar a cabo estudios de campo caros, con resultados a largo plazo y costosos; 2) Evaluar la importancia relativa y los impactos de los parámetros críticos de rendimiento de las estufas y las variables ambientales de los cuartos de cocinado; y 3) Proporcionar un medio para establecer estándares de desempeño de las estufas eficientes de biomasa o estándares que estén explícitamente vinculados con la calidad del aire en los hogares.

De acuerdo a las AQG de la OMS (WHO, 2014) puede hacerse uso de 3 modelos de dispersión de contaminantes. Cada uno de estos combina la tasa de emisión del contaminante (en términos de masa) dentro de una habitación (una cocina) con modelos matemáticos del transporte del contaminante, con el objetivo de estimar las concentraciones de la contaminación del aire interior. Estos modelos van desde construcciones sencillas, a las simulaciones complejas mediante un ordenador, y todos tienen la capacidad de proporcionar estimaciones de la concentración de los contaminantes en el interior de los hogares, debido al uso de un dispositivo de cocción en específico, o bien el uso de múltiples dispositivos.

Los modelos también pueden proporcionar un medio para evaluar la contribución directa de una estufa o cualquier otro dispositivo, de forma independiente de la contaminación del vecindario y de otras fuentes de emisión; que es de vital importancia para la vinculación de directrices, guías o estándares del desempeño de las estufas eficientes de biomasa (Johnson y col. 2011). Estos modelos son: a) modelo de zona simple; b) modelo de tres zonas; y c) modelo computacional de dinámica de fluidos. Para los fines de esta investigación se utilizó el MCBM.

### **2.5.1 Modelo de caja simple**

Este modelo asume que el contaminante emitido dentro de la habitación se encuentra mezclado uniformemente con el aire de ese espacio. La concentración es determinada por la tasa de emisión y la consideración de otros factores que pueden ser incorporados dentro del modelo; entre los cuales se puede incluir: la duración de la combustión, y el volumen y tasa de intercambio de la habitación (WHO, 2014). El modelo considera que la habitación recibe aire fresco a una velocidad dada por medio de la infiltración natural y/o medios mecánicos, y este suministro se corresponde con una salida de aire de la habitación por exfiltración y/o medios mecánicos a la misma velocidad (Johnson y col. 2011).

Se puede considerar diferentes tasas de emisión de contaminantes, pero lo más sencillo es considerar una tasa constante (por ejemplo, las emisiones durante el uso del dispositivo de cocción). La duración de la tasa de emisión se puede configurar para reflejar el tiempo en que la fuente emite contaminantes en la zona de estudio. El efecto de una campana o chimenea, que elimina los contaminantes emitidos antes de que se mezclen con el aire general de la cocina, también puede explicarse mediante la aplicación de términos fraccionarios a la tasa de emisión total del dispositivo de cocción. Con base a estos parámetros, las concentraciones en la habitación se pueden estimar durante el tiempo deseado (Johnson y col. 2011).

### **2.5.2 Modelo de Caja Simple con Simulación Monte Carlo**

El MCBM, empleado por Johnson y colaboradores (2011), predice concentraciones de contaminantes basadas en las emisiones de la estufa y las características de la cocina. Las concentraciones de contaminantes en el aire interior son modeladas asumiendo una habitación con mezclado homogéneo con una fuente de emisión única y constante. El modelo asume una mezcla instantánea con cero flujo de retorno a la habitación, la eliminación del contaminante está dominada por la ventilación, y los mecanismos de pérdida del contaminante son (por ejemplo: reacciones en superficies, sedimentación de partículas) insignificantes.

La simulación Monte Carlo se utilizó para incorporar la variabilidad en los parámetros del modelo, lo que resulta en una distribución predicha de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  y CO. Es decir que conociendo la variabilidad o el comportamiento de cada variable de entrada al modelo y sus valores promedio, máximo y mínimo; la simulación Monte Carlo aleatoriamente calcula el resultado final de la concentración del contaminante, realizando el número de iteraciones que sean deseadas. Lo cual resulta en una distribución de los resultados predicha por la variabilidad de los datos de entrada.

## 2.6 Guías de Calidad del Aire (AQG)

La OMS brinda apoyo técnico a los países en sus propias evaluaciones y ampliación del uso de los combustibles y tecnologías en el hogar que promueven la salud de los usuarios. Con el fin de garantizar un ambiente limpio en y alrededor del hogar; las nuevas guías o directrices de la OMS para determinar la calidad del aire interior por la combustión de combustibles sólidos en los hogares, proporcionan recomendaciones sanitarias sobre los tipos de combustibles y tecnologías para proteger la salud de sus usuarios, así como estrategias para la difusión eficaz de estas tecnologías. Estas guías se basan en las AQG de la OMS existentes para la contaminación del aire interior (WHO, 2006), y el volumen de AQG del 2010 para contaminantes selectos (WHO, 2010).

Las guías utilizadas en esta investigación fueron las de CO y PM<sub>2.5</sub>; para el caso del monóxido de carbono el promedio de concentración permitida se encuentra para periodos de: 15 min, 1 h, 8h y 24 h. Las concentraciones permitidas para PM<sub>2.5</sub> son concentraciones promedio a 24h y anual, en 3 objetivos internos y finalmente la AQG para PM<sub>2.5</sub>.

**Tabla 2.** Guías de Calidad del Aire interior de la Organización Mundial de la Salud.

<b>Material particulado 2.5 micras (PM 2.5)</b>		
	<b>Concentración promedio anual (µg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Concentración promedio 24 h (µg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Objetivo Intermedio/parcial 1</b>	35	75
<b>Objetivo Intermedio/parcial 2</b>	25	50
<b>Objetivo Intermedio/parcial 3</b>	15	37.5
<b>Guía de calidad del Aire (AQG)</b>	10	25
<b>Monóxido de carbono (CO)</b>		
<b>Tiempo promedio</b>	<b>Concentración promedio (mg/m<sup>3</sup>)</b>	
<b>15 (min)</b>	100	
<b>1 (h)</b>	35	
<b>8 (h)</b>	10	
<b>24 (h)</b>	7	

**Fuente:** Guías de calidad del aire (WHO, 2006 y 2010).



## 2.7 Distribución normal

La importancia de determinar el comportamiento o distribución de un conjunto de datos, radica en poder prever y conocer los límites de su comportamiento; para lo cual resulta útil hacer uso de herramientas estadísticas como lo es la distribución normal multivariada. Mientras que los datos reales nunca son exactamente multivariados normales, la distribución normal suele ser una aproximación útil a la "verdadera" distribución de la población. Una ventaja de la distribución normal multivariada proviene del hecho de que es matemáticamente manejable y se pueden obtener resultados "agradables". Las distribuciones normales son útiles en la práctica por dos razones: en primer lugar, la distribución normal sirve como un modelo de población de buena fe en algunos casos; en segundo lugar, las distribuciones de las muestras de muchas estadísticas multivariadas son aproximadamente normales, independientemente de la forma de la población madre, debido a un efecto límite central. Muchos problemas del mundo real caen naturalmente dentro del marco de la teoría normal. La importancia de la distribución normal descansa en su papel dual como modelo de población para ciertos fenómenos naturales y distribución aproximada del muestreo para muchas estadísticas.

Para lo cual los gráficos son siempre herramientas útiles en cualquier análisis de datos. Se pueden utilizar gráficas especiales denominadas gráficos Cuantil-Cuantil para evaluar el supuesto de normalidad en la distribución de una variable. Estas gráficas se pueden hacer para las distribuciones marginales de las observaciones de la muestra en cada variable. Son, en efecto, gráficos del cuantil de muestra frente al cuantil que se esperaría observar si las observaciones realmente se distribuyeran siguiendo un comportamiento normal. Cuando los puntos se encuentran casi a lo largo de una línea recta, la suposición de normalidad sigue siendo sostenible. La normalidad es sospechosa si los puntos se desvían de una línea recta. Además, el patrón de las desviaciones puede proporcionar pistas sobre la naturaleza de la normalidad. Una vez que las razones de la no normalidad se identifican, la acción correctiva es a menudo posible.

Para simplificar la notación,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  representan  $n$  observaciones sobre cualquier característica única  $x_i$ . Sea  $x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(n)}$  representa estas observaciones después de ordenadas según su magnitud. Por ejemplo,  $x_{(2)}$  es la segunda observación más pequeña

y  $x_{(n)}$  es la observación más grande. Las  $x_{(j)}$  son las muestras cuantiles. Cuando las  $x_{(j)}$  son distintas, exactamente  $j$  observaciones son menores o iguales a  $x_{(j)}$ . La proporción  $j/n$  es a menudo aproximada por  $(j-1/2)/n$  para su conveniencia analítica.

Para una distribución normal estándar, los cuantiles  $q_{(j)}$  se definen por la relación:

$$P[Z \leq q_{(j)}] = p(j) = \frac{1 - \frac{1}{2n}}{2}$$

Aquí  $q_{(j)}$  es la probabilidad de obtener un valor menor o igual que  $q_{(j)}$  en un solo dibujo de una población normal estándar. La idea es buscar en los pares de cuantiles  $(q_{(j)}, x_{(j)})$  con la misma probabilidad acumulativa asociada  $(j-1/2)/n$ . Si los datos surgen de una población normal, los pares  $(q_{(j)}, x_{(j)})$  estarán relacionados aproximadamente linealmente, ya que  $\sigma q_{(j)} + \mu$  es casi el cuantil esperado de la muestra.

Los gráficos Q-Q no son particularmente informativas a menos que el tamaño de la muestra sea de moderado a grande, por ejemplo,  $n \geq 20$ . Puede haber un poco de variabilidad en la rectitud del gráfico Q-Q para muestras pequeñas, incluso cuando se sabe que las observaciones provienen de una población normal.

La rectitud de la gráfica Q-Q puede evaluarse calculando el coeficiente de correlación de los puntos en la gráfica. El coeficiente de correlación para la gráfica Q-Q se define por

$$r_Q = \frac{\sum_{j=1}^n (x_{(j)} - \bar{x})(q_j - \bar{q})}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{(j)} - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2}}$$

Y una confiable prueba de la normalidad puede basarse en ella. Formalmente, rechazamos la hipótesis de normalidad en el nivel de significación  $\alpha$  si  $r_Q$  cae por debajo del valor apropiado en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Niveles de confianza para los coeficientes de correlación del gráfico Cuantil-Cuantil en la prueba de normalidad.

<b>Tamaño de la muestra</b>	<b>Niveles de significancia (<math>\alpha</math>)</b>		
	<b>0.01</b>	<b>0.05</b>	<b>0.10</b>
<b>(n)</b>			
<b>5</b>	0.8299	0.8788	0.9032
<b>10</b>	0.8801	0.9198	0.9351
<b>15</b>	0.9126	0.9389	0.9503
<b>20</b>	0.9269	0.9508	0.9604
<b>25</b>	0.9410	0.9591	0.9665
<b>30</b>	0.9479	0.9652	0.9715
<b>35</b>	0.9538	0.9682	0.9740
<b>40</b>	0.9599	0.9726	0.9771
<b>45</b>	0.9632	0.9749	0.9792
<b>50</b>	0.9671	0.9768	0.9809
<b>55</b>	0.9695	0.9787	0.9822
<b>60</b>	0.9720	0.9801	0.9836
<b>75</b>	0.9771	0.9838	0.9866
<b>100</b>	0.9822	0.9873	0.9895
<b>150</b>	0.9879	0.9913	0.9928
<b>200</b>	0.9905	0.9931	0.9942
<b>300</b>	0.9935	0.9953	0.9960

**Fuente:** Johnson y Wichern, (2002).

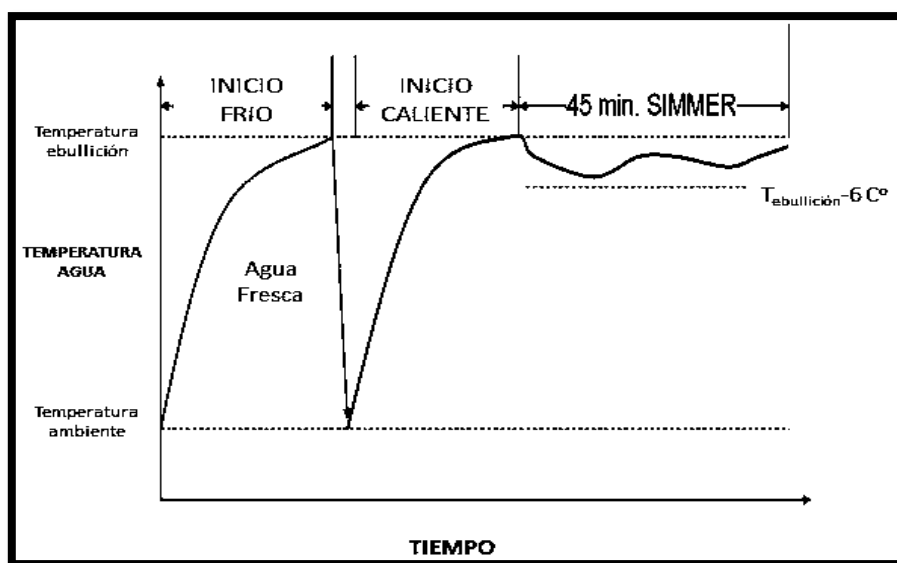
### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Protocolos y métodos

Los protocolos y métodos utilizados en esta investigación para determinar el porcentaje real de las emisiones intra-domiciliarias de CO y PM<sub>2.5</sub>, los cuales fueron la base que en conjunto con el MCBM, permitieron estimar las concentraciones de estos contaminantes en los hogares de los usuarios de la estufa Patsari, se describen a continuación.

##### 3.1.1 Prueba de ebullición de agua (WBT)

Con el fin de determinar los factores de emisión intra-domiciliarios de los contaminantes CO y PM<sub>2.5</sub> por el uso de la estufa Patsari, se realizaron 10 pruebas WBT utilizando como combustible leña de encino blanco sin corteza. La prueba tiene como objetivo evaluar el desempeño energético y las emisiones de una estufa al calentar un determinado volumen de agua en tres fases: inicio frío, inicio caliente y fuego lento. La secuencia de la prueba WBT se puede observar en la Figura 7.



**Figura 7.** Temperatura durante las tres fases de la prueba de ebullición de agua. (Crédito de la figura: MacCarty, 2013).

### 3.1.2 Método de decaimiento del gas trazador

Esta prueba está diseñada para determinar el intercambio de aire de una habitación con su entorno. Se realizó de acuerdo a la metodología propuesta por Cowlin (2005); y fue utilizada para determinar la Tasa de Intercambio de Aire (TIA) en las cocinas simuladas de GIRA, en Pátzcuaro, Michoacán. Este método consiste en saturar el ambiente del cuarto con un gas traza (CO para este caso) a una concentración conocida 30 ppm, y medir el tiempo hasta que esta concentración llega a 0 ppm o concentración ambiente.

Los ensayos se realizaron para la estación de primavera de 2016 en la Cocina Simulada 1 (véase Figura 8); la cual cuenta con un volumen de  $41 \text{ m}^3$  y las condiciones de ventilación características de las cocinas de la zona Purepecha del estado de Michoacán. La validación preliminar del uso del Modelo de Caja Simple con Simulación Monte Carlo, se llevó a cabo en la Cocina Simulada 2 (véase Figura 9), para la cual fue determinada la TIA. Esta Cocina Simulada 2 tiene un volumen de  $41 \text{ m}^3$ , sin embargo sus condiciones de ventilación son inferiores respecto a la Cocina Simulada 1.



**Figura 8.** Cocina Simulada 1 en GIRA.



**Figura 9.** Cocina Simulada 2 en GIRA.

Con el objetivo de establecer si la estación del año u hora del día representan una variabilidad considerable en la TIA de los hogares, se compararon los rangos de velocidades durante los ensayos realizados en GIRA, con un estudio de los vientos predominantes en la zona metropolitana de la ciudad de Morelia, Michoacan (véase Tabla 4). La comparación de los rangos de velocidades pueden observarse en los resultados de este trabajo. Además de que se decidió utilizar estos datos de la ciudad de Morelia, porque es el único estudio realizado, cercano o parecido a las condiciones de vientos en Pátzcuaro, Michoacán.

**Tabla 4.** Porcentaje de vientos dominantes del periodo 2003-2011 en la zona metropolitana de la ciudad de Morelia Michoacán.

Rango de velocidad (m/s)	Estación del año			
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Calma	3.3%	7.0%	8.7%	5.8%
0.3-1.6	51.1%	49.5%	54.4%	62.1%
1.6-3.4	33.7%	36.2%	30.0%	26.2%
3.4-5.5	9.7%	6.6%	5.8%	4.9%
5.5-8.0	1.8%	0.6%	0.8%	0.7%
8.0-10.8	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
> 10.8	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%
<b>Total</b>	100%	100%	100%	100%

**Fuente:** Alemán, (2013).

Los valores obtenidos de TIA serán variables de entrada para la estimación de concentración de contaminantes con el uso del modelo de caja simple con simulación Monte Carlo.

### 3.1.3 Método para la evaluación de las emisiones.

Con el objetivo de medir en tiempo real y evaluar las emisiones de la chimenea e intra-domiciliarias por el uso de la estufa Patsari; se utilizó el método integrado del protocolo WBT. El cual se describe a continuación, para calcular la tasa de emisión del CO se realizaron los siguientes cálculos:

#### 1.- Cálculo de flujo en la tubería (m<sup>3</sup>/s).

*Velocidad en la tubería \* Área transversal de tubería = Flujo en la tubería*

$$(m/s) * m^2 = m^3/s$$

#### 2.- Densidad del Flujo (g/m<sup>3</sup>).

$$\left( \frac{\text{Peso molecular del aire} * \text{presión atmosférica}}{\text{constante universal de los gases}} \right) / \text{Temperatura} = \text{densidad}$$

$$\left( \frac{(g/mol) * Pa}{Pa * m^3/mol * K} \right) / K = g/m^3$$

### 3.- Flujo másico (g/s).

*Flujo en tubería \* densidad del flujo = Flujo másico*

$$\left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) * \left( \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right) = \text{g/s}$$

### 4.- Flujo molar (mol/s).

*(Flujo másico) / (peso molecular del aire) = Flujo molar*

$$\frac{(\text{g/s})}{(\text{g/mol})} = \text{mol/s}$$

### 5.- Flujo molar de CO (mol/s).

*Fracción de CO en la mezcla \* Flujo molar = Flujo molar de CO*

$$\left( \frac{\text{CO ppm}}{1000000} \right) * (\text{mol/s}) = \text{mol/s}$$

### 6.- CO integrado o acumulado (g).

*Flujo molar de CO \* Peso molecular CO \* tiempo de medición = CO en masa*

$$(\text{mol/s}) * (\text{g/mol}) * s = g$$



Para el cálculo de la masa total de CO en la prueba, se realiza una sumatoria de los gramos de contaminante de cada intervalo de tiempo en el que fue medida la concentración en partes por millón (ppm) del CO.

### 7.- Tasa de emisión de CO (g/min).

$$\text{Masa total emitida} / \text{Tiempo total de medición} = \text{Tasa de emisión}$$

$$g \text{ totales} / \text{tiempo total} = g / \text{min}$$

Para el caso del PM<sub>2.5</sub> fue utilizado el método de gravimetría, el cual consta del uso de filtros de fibra de vidrio para la captura del PM<sub>2.5</sub>; así como un ciclón o impactador para la separación del material particulado de interés; y el uso de una bomba para la extracción y control del flujo de la muestra. Además se combinó con el método integrado que utiliza el WBT. Los cálculos utilizados se muestran a continuación:

### 1.- Concentración durante la prueba por gravimetría (µg/m<sup>3</sup>).

$$\frac{\text{Diferencia de masa en el filtro}}{\text{Flujo de la bomba} * \text{tiempo de muestreo}} = \text{Concentración durante la prueba}$$

$$\frac{\mu g}{\left( \left( m^3 / \text{min} \right) * \text{min} \right)} = \mu g / m^3$$

## 2.- Masa total de PM<sub>2.5</sub>.

$$\text{Flujo en tubería} * \text{Concentración durante la prueba} * \text{tiempo de la prueba} \\ = \text{Masa total PM}_{2.5}$$

$$\left( \text{m}^3 / \text{min} \right) * \left( \text{mg} / \text{m}^3 \right) * \text{min} = \text{mg}$$

## 3.- Tasa de emisión de PM<sub>2.5</sub>.

$$\text{Masa total de PM}_{2.5} / \text{Tiempo total de la fase} = \text{Tasa de emisión de PM}_{2.5}$$

$$\text{mg totales} / \text{tiempo total} = \text{mg} / \text{min}$$

Para evaluar las emisiones durante cada fase del WBT se realizó el balance de carbono. Se calculó el carbono de entrada, el cual es el contenido en la leña, restando el contenido de humedad y el carbono presente en el carbono residual. Para calcular el carbono de salida, se consideró el carbono presente en los productos de la combustión incompleta: CO<sub>2</sub>, CO y PM<sub>2.5</sub>. Finalmente se realiza la división del carbono de salida entre el carbono de entrada, y se obtiene el porcentaje del balance de carbono; para aceptar que la medición de las emisiones se realizó correctamente se tomó como referencia un valor del balance de carbono de 100 ± 20%, de la forma en que lo considera el WBT. A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas:

**1.- Carbono de entrada (g).**

$$\begin{aligned} & [(Fracción\ de\ carbono\ en\ leña * leña\ consumida) \\ & * (1 - Fracción\ de\ humedad\ en\ leña)] \\ & - (Fracción\ de\ carbon\ en\ carbon\ residual \\ & * masa\ de\ carbon\ residual) = Carbono\ de\ entrada \end{aligned}$$

$$[(0.5 * g) * (1 - Fracción\ humedad)] - (0.81 * g) = g$$

**2.- Carbono en PM<sub>2.5</sub> (g).**

$$Masa\ total * Fracción\ de\ carbono = Carbono\ en\ PM_{2.5}$$

$$g * 0.91 = g$$

**3.- Carbono en CO (g).**

$$Masa\ total * Fracción\ de\ carbono = Carbono\ en\ el\ CO$$

$$g * \left(\frac{12}{28}\right) = g$$

**4.- Carbono en CO<sub>2</sub> (g).**

$$Masa\ total * Fracción\ de\ carbono = Carbono\ en\ el\ CO_2$$

$$g * \left(\frac{12}{44}\right) = g$$

### 5.- Carbono de salida (g).

*Carbono en PM<sub>2.5</sub> + Carbono en CO + Carbono en CO<sub>2</sub> = Carbono de salida*

$$g + g + g = g$$

### 6.- Balance de Carbono (%).

$$\frac{\text{Carbono de salida}}{\text{Carbono de entrada}} * 100 = \text{Porcentaje de Balance de Carbono}$$

$$\frac{g}{g} * 100 = \%$$

Las constantes o fracciones, utilizadas para determinar el contenido de carbono en la leña, el carbón residual, y el PM<sub>2.5</sub>, fueron obtenidas de las hojas de cálculo del protocolo WBT. Para el cálculo del contenido de carbono en el CO y CO<sub>2</sub>, se consideró los pesos moleculares del Carbono y Oxígeno.

### 3.1.4 Modelo de Caja Simple con Simulación Monte Carlo

El MCBM, empleado por Johnson y colaboradores en el 2011, predice concentraciones en los cuartos de cocinado, basadas en las emisiones de la estufa y las características de la cocina. El modelo se describe como:

$$C_t = \frac{Gf}{\alpha V} (1 - e^{-\alpha t}) + C_{t-1}(e^{-\alpha t}),$$

Donde,  $C_t$  es la concentración del contaminante en el tiempo  $t$  ( $\text{mg}/\text{m}^3$ );  $G$  es la tasa de emisión ( $\text{mg}/\text{min}$ );  $\alpha$  es tasa de intercambio de aire con unidades de ( $\text{min}^{-1}$ );  $V$  es el volumen de la cocina ( $\text{m}^3$ );  $t$  = tiempo ( $\text{min}$ );  $C_{t-1}$  es la concentración de la unidad de tiempo anterior o la predecesora ( $\text{mg}/\text{m}^3$ );  $f$  es la fracción que representan las emisiones intra-domiciliarias respecto a la tasa de emisión total de cada contaminante.

$$G = g_{chimenea} + g_{intra-domiciliarias}$$

$$g_{intra-domiciliarias} = G * f$$

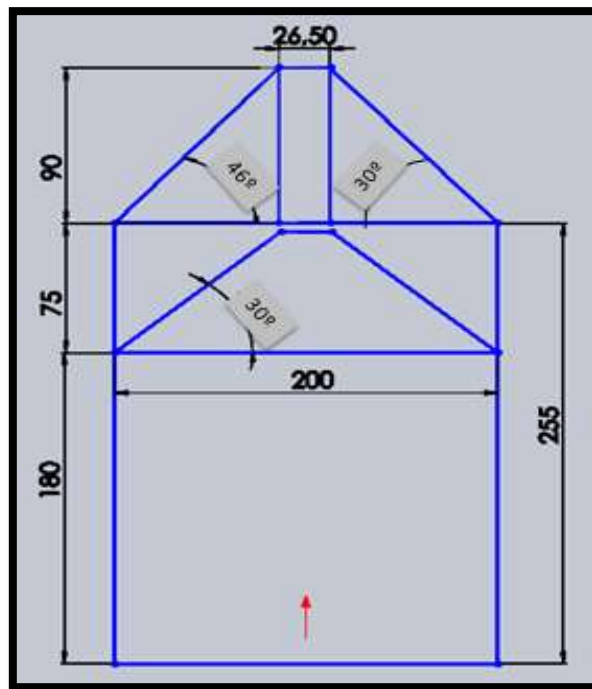
Por lo que  $G$  es la suma de la tasa de emisión de la chimenea y la tasa de emisión intra-domiciliaria. Y la multiplicación de  $G$  por la fracción ( $f$ ) tiene como resultado la tasa de emisión intra-domiciliaria. Para los fines de esta investigación se realizaron un total de iteraciones de 5000 para la simulación Monte Carlo.

### 3.2 Captura de gases y trenes de muestreo

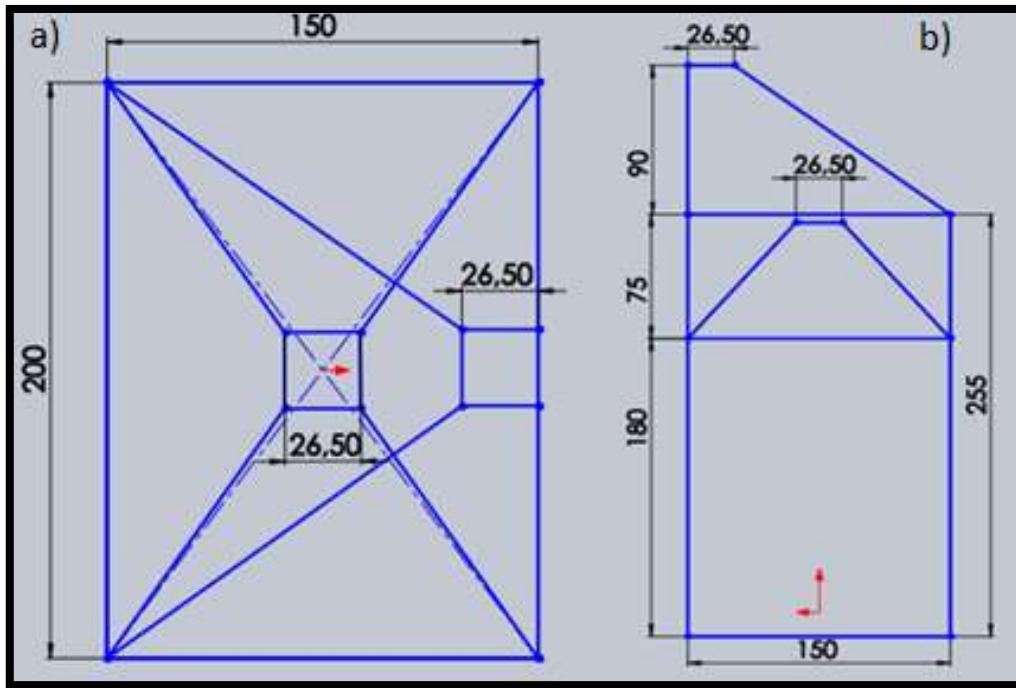
Con la intención de capturar las emisiones intra-domiciliarias que escapan de la cámara de combustión, se realizó el diseño y construcción de una doble campana, la cual permite tener dos trenes de muestreo, uno para las emisiones de la chimenea y el otro para las emisiones intra-domiciliarias.

Para el diseño de la doble campana y las líneas de muestreo se tomaron en cuenta especificaciones del estándar ISO 19867-1 del 2015, que si bien a un no es un documento oficial, es el parámetro que se pretende sigan todos los laboratorio encargados de la evaluación de estufas de biomasa. Los parámetros son los siguientes: utilizar ángulos no menores a  $45^\circ$ ; dilución en las tuberías; el diámetro de la tubería; la distancia entre los puertos de muestreo; el uso de mezcladores, etc.

Las dimensiones de largo y ancho de la doble campana fueron de 1.5 y 2 metros respectivamente, debido a las dimensiones de la estufa Patsari y las estufas de tipo plancha utilizadas en el país. Para el diseño de la campana de captura de emisiones de la chimenea, los ángulos posteriores fueron de  $46^\circ$  y los de anteriores de  $30^\circ$ , debido a que las dimensiones del laboratorio (véase Figura 10).

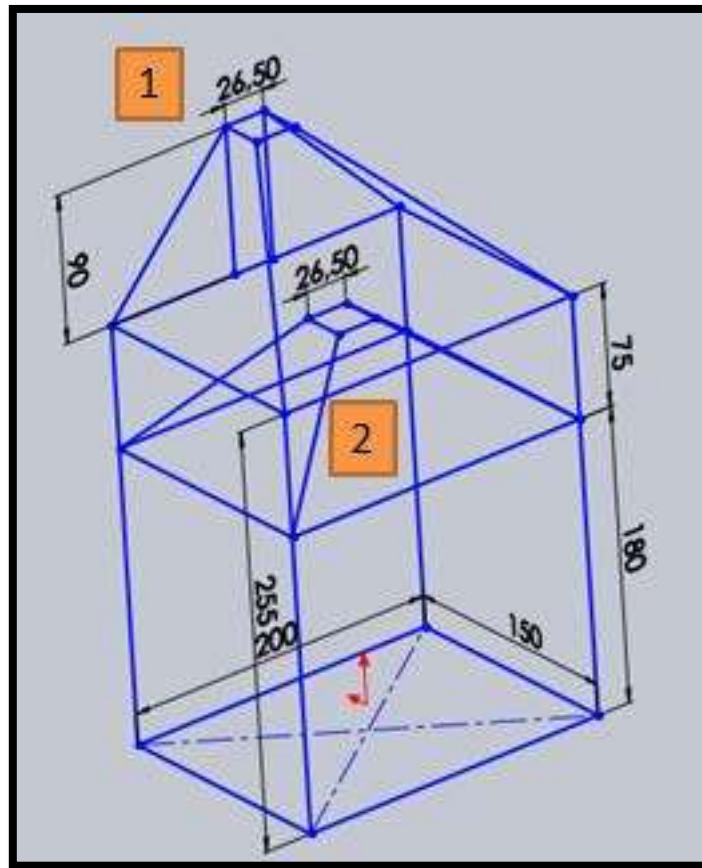


**Figura 10.** Vista frontal de la doble campana de extracción. Nota: las dimensiones se encuentran en centímetros.



**Figura 11.** a) Vista vertical y b) vista lateral de la doble campana de extracción. Nota: las dimensiones se encuentran en centímetros.

Finalmente para poder observar el acomodo de la doble campana, la campana de emisiones de la chimenea (1) y la campana de emisiones intra-domiciliarias (2); se puede observar la estructura en tres dimensiones en la Figura 12.



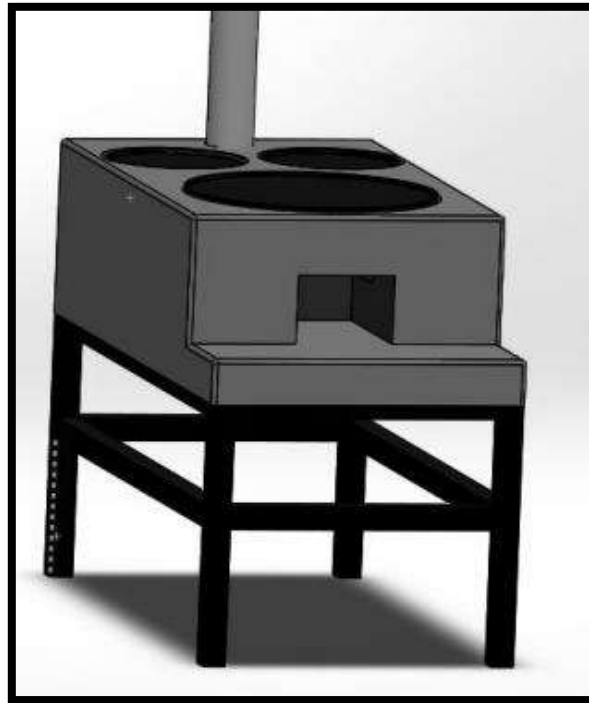
**Figura 12.** Estructura tridimensional de la doble campana de extracción. (1) Campana de emisiones a la atmósfera. (2) Campana de emisiones fugitivas. (Dimensiones en centímetros).

El acomodo de los trenes de muestreo para cada campana se puede ver en los resultados de este trabajo. Con la construcción de la doble campana fue posible obtener los valores de las variables: tasa de emisión total de CO y PM<sub>2.5</sub>, así como la fracción que representan las emisiones intra-domiciliarias respecto a la emisión total por el uso de la estufa Patsari. Los cuales son variables de entrada al Modelo de Caja Simple con Simulación Monte Carlo.



### 3.3 Estufa Patsari

La estufa Patsari (Figura 13) cuenta con una entrada para leña, una cámara de combustión, dos túneles de conducción del flujo, dos hornillas secundarias y una chimenea. La cámara de combustión, tiene un comal metálico de 52 cm de diámetro el cual es idóneo para la preparación de tortillas y comales de 27 cm de diámetro en las hornillas secundarias.



**Figura 13.** Estufa Patsari.

### 3.4 Equipos de medición

El Laboratorio en Innovación y Evaluación en Estufas de Biomasa (LINEB) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) Campus Morelia, cuenta con un Sistema Portátil de Medición de Emisiones (PEMS) y un monitor de calidad del aire interior (Q-TRAK), que proporcionan información rápida y precisa de las concentraciones de los contaminantes provenientes de la combustión de biomasa; los sensores del Q-TRAK y PEMS permiten estimar en tiempo real: temperatura, humedad relativa, concentraciones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$ . Así como equipos e instalaciones para la medición y captura de  $\text{PM}_{2.5}$ , los cuales se describen a continuación:

- *Sistema Portátil de Medición de Emisiones (PEMS)*: cuenta con sensores para la medición de  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$ . El PEMS fue utilizado en la cocina simulada de GIRA, con el fin de medir la tasa de decaimiento de la concentración de  $\text{CO}$  y conocer la tasa de intercambio de aire (TIA). También fue utilizado en la línea de muestreo de las emisiones de la chimenea para conocer y registrar en tiempo real las concentraciones de  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  y  $\text{PM}_{2.5}$ ; además de la velocidad y temperatura del flujo.



**Figura 14.** Sistema Portátil de Medición de Emisiones.

- *Monitor de la concentración de  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$  (Q-TRAK)*: este equipo permite registrar las concentraciones en tiempo real de  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  y la temperatura del flujo. El equipo fue utilizado en el tren de muestreo de las emisiones intra-domiciliarias o emisiones intra-muros; así como también se utilizó en las mediciones realizadas en

los Ciclos de Cocinado Controlados para la validación del Modelo de Caja Simple con Simulación Monte Carlo.



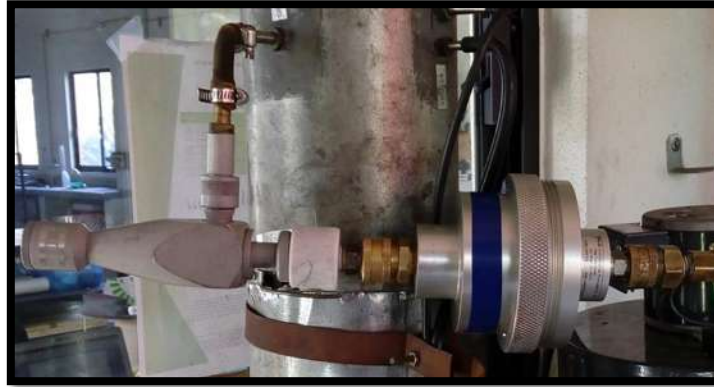
**Figura 15.** Monitor de las concentraciones de CO y CO<sub>2</sub>.

- *Monitor de velocidad y temperatura (VelociCalc):* este equipo registra en tiempo real la velocidad y temperatura del flujo, fue utilizado en la tubería de las emisiones fugitivas o intradomiciliarias. También se utilizó para determinar la velocidad del viento en diferentes estaciones del año en las cocinas simuladas de GIRA.



**Figura 16.** Monitor de velocidad y temperatura.

- *Sistema gravimétrico del PEMS:* consta de una bomba que succiona 16.7 L/min del tren de muestreo de las emisiones de la chimenea, un ciclón o impactador de partículas para separar  $PM_{2.5}$ ; y un filtro de fibra de vidrio de 4 pulgadas de diámetro para la captura del material particulado.



**Figura 17.** Sistema gravimétrico del PEMS.

- *Sistema gravimétrico para las emisiones intra-domiciliarias:* para el registro de  $PM_{2.5}$ , por el método gravimétrico se utilizó un ciclón para separar partículas menores a 2.5 micrómetros; y capturar estas partículas en un filtro de fibra de vidrio de 37 mm. El flujo de operación del ciclón debe ser de 4 L/min.



**Figura 18.** Ciclón para  $PM_{2.5}$ .

- *Bombas de succión:* para la succión de la toma de muestra en el tren de muestreo de las emisiones intra-domiciliarias; se utilizaron 2 bombas SKC, para obtener las muestras del ciclón de 2.5  $\mu\text{m}$  y del Q-Trak. Para el primero el flujo debe ser de 4 litros/minuto, y para el segundo de 2 L/min.



**Figura 19.** Bombas de succión para la extracción de la muestra.

- *Medidor del flujo:* para poder conocer, asegurar y calibrar el flujo de succión de las bombas SKC, se debe llevar a cabo la revisión y ajuste del flujo con el equipo Defender 510.



**Figura 20.** Medidor de flujo.

- *Cuarto de pesado:* Con el fin de aislar las balanzas y los filtros de factores como polvo, humedad, ruido. Existe un cuarto de pesado en el LINEB que cumple con las especificaciones necesarias para el pesado de filtros. El método utilizado para el manejo de las balanzas y filtro se presenta en el Anexo C de este trabajo.



**Figura 21.** Cuarto de pesado.

- *Báscula semi micro-analítica:* es una báscula analítica Citizen CX 265 con capacidad máxima de 10 gramos, capacidad mínima de 0.00001 g y exactitud de 0.00001 g. La cual fue utilizada para conocer la masa de los filtros de 4 pulgadas antes y después de su uso en la captura de  $PM_{2.5}$ , y por diferencia de peso conocer la masa total del material particulado del tren de muestreo de las emisiones de la chimenea.



**Figura 22.** Báscula semi micro-analítica.

- **Báscula micro-analítica:** es una báscula Mettler Toledo MT5 con capacidad máxima de 5.1 gramos, capacidad mínima de 0.000001 g y exactitud de 0.000001 g. La cual fue utilizada para conocer la masa de los filtros de fibra de vidrio de 37 mm de diámetro, antes y después de su uso en la captura de PM<sub>2.5</sub>, y por diferencia de peso conocer la masa total del material particulado del tren de muestreo de las emisiones intra-domiciliarias.



**Figura 23.** Báscula micro-analítica.

- **Kit de masas estándar:** la utilidad del kit de masas, es el de corroborar la exactitud de las básculas utilizadas, mediante masas estándar con los siguientes pesos: 0.001g, 0.002g, 0.005g, 0,01g, 0.02g, 0.05g, 0.1g, 0.2g, 0.5g, 1g, 2g y 5g. Además cuenta con pinza y brocha para el manejo de las masas estándar, lo cual es de vital importancia porque hay que asegurarse de que no sean contaminadas, al ser manipuladas sin guantes y asegurar su limpieza con la brocha.



**Figura 24.** Kit de masas estándar para básculas analíticas.

- *Filtros de fibra de vidrio:* por diferencia de peso, se puede conocer la cantidad de  $PM_{2.5}$  contenido en los filtros. Fueron utilizados los siguientes filtros: diámetro de 4 pulgadas y diámetro de 37 milímetros.



**Figura 25.** Filtros de fibra de vidrio: a) 37mm. b) 4pulgadas.

- *Desionizador:* el desionizador Sartorius tiene la capacidad de eliminar cargas electroestáticas por medio de un choque eléctrico, fue utilizado antes y después de cada serie de pesado en los filtros; para evitar sesgo en los pesajes por cargas electroestáticas en las muestras.



**Figura 26.** Desionizador.



- Gabinetes de secado para filtros: las urnas o cámara de secado para filtros, cuentan con esferas de Silica gel en la parte inferior de cada una, para asegurar la captura de humedad presente en los filtros. Además cuentan con charolas o niveles para facilitar el manejo de los filtros, y un cerrado hermético que evita la entrada de humedad del ambiente.



**Figura 27.** Gabinetes desecadores para filtros.

### **3.5 Parámetros de entrada para el MCBM**

Los parámetros que alimentan el modelo contemplan las siguientes variables: tasa de emisión de CO y fracción que representan las emisiones intra-domiciliarias para CO, tasa de emisión de PM<sub>2.5</sub> y fracción que representan las emisiones intra-domiciliarias para PM<sub>2.5</sub>; utilizando tasas de emisión obtenidas a partir del WBT. Tasas de emisión totales de la estufa Patsari, utilizando el protocolo de Ciclo de Cocinado Controlado (CBC) propuesto por Medina en 2017; el cual incluye la cocción de alimentos y secuencias típicas de la región de la zona de estudio. La tasa de intercambio de aire, volumen del cuarto de cocinado y tiempo de cocinado. Todas estas variables son necesarias para que se corran las simulaciones del MCBM.

El volumen de la cocina y los tiempos de cocinado, son dos variables de entrada que son requeridos por el MCBM. Los datos de volúmenes de cocina fueron proporcionados por el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP); quienes realizaron mediciones de las cocinas de 6 localidades de 3 municipios de la zona Purepecha del estado de Michoacán. Los tiempos de cocinado, fueron obtenidos de bases de datos con las que cuenta el laboratorio LINEB, de los usuarios de la estufa Patsari en la zona Purepecha del estado de Michoacán. También se determinó la distribución de cada variable, así como los valores promedio, valor máximo, valor mínimo. Los cuáles son necesarios como datos de entrada al MCBM.

## 4. RESULTADOS

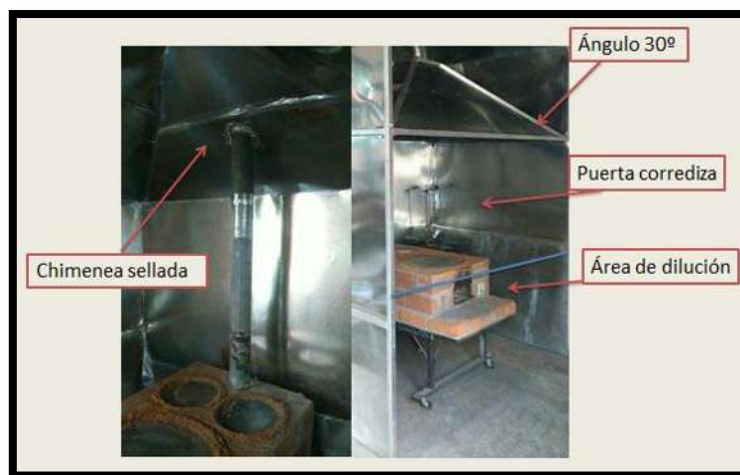
### 4.1 Captura de gases y trenes de muestreo

El diseño de la doble campana permite capturar las emisiones de la chimenea y las emisiones intra-domiciliarias, y cuenta con dos áreas de dilución para evitar la saturación de los sensores de los equipos de muestreo.



**Figura 28.** Campana para la captura de las emisiones de la chimenea.

La campana para capturar emisiones intra-domiciliarias, no permite la mezcla entre las emisiones de la chimenea y las emisiones intra-domiciliarias.



**Figura 29.** Campana para la captura de las emisiones intra-domiciliarias.

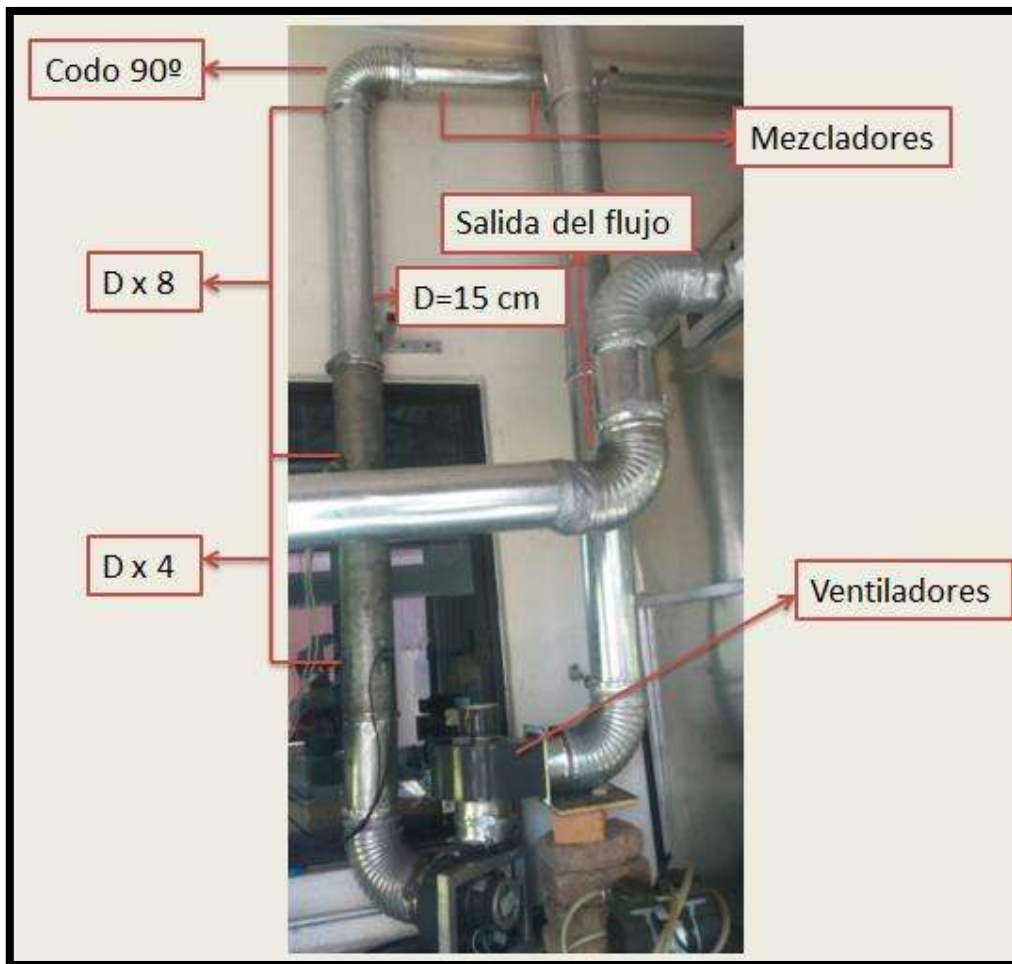
En la Figura 30 puede observarse la doble campana, que asegura la captura de las emisiones de la chimenea e intra-domiciliarias; así como también la separación de las emisiones en dos trenes de muestreo.



**Figura 30.** Doble campana para extracción y captura de las emisiones de la chimenea e intra-domiciliarias.

El tren de muestreo de las emisiones de la chimenea, fue diseñado con las especificaciones del borrador estándar ISO 19867-1 del 2015. Su importancia radica en que con la captura de las emisiones de la chimenea en conjunto con las emisiones intra-domiciliarias; es posible conocer el porcentaje que representan las emisiones intra-domiciliarias del total de emisiones provenientes de la estufa Patsari. A continuación pueden observarse los trenes de muestreo y la separación entre los puntos de muestreo.

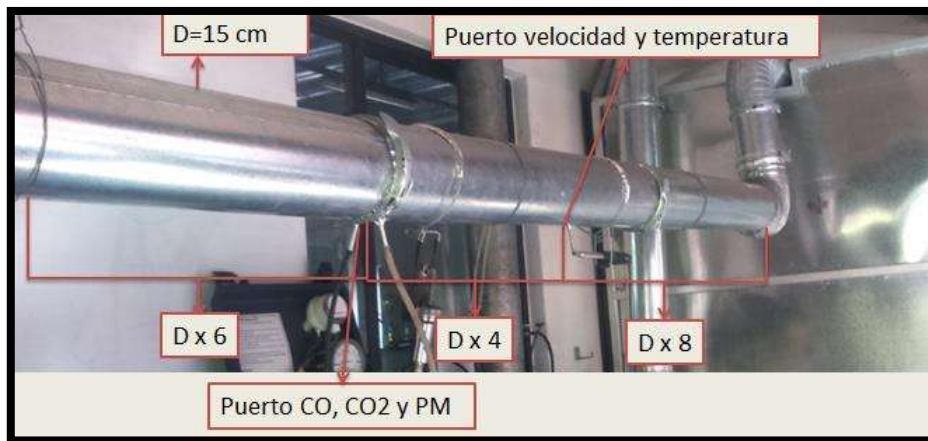
Para el tren de muestreo de las emisiones de la chimenea, la distancia entre los mezcladores es de 0.6 metros, para asegurar la mezcla del flujo; la toma de muestra para medir la velocidad del flujo se encuentra 1.2 metros después del codo de 90° para tener un flujo laminar; la toma de muestra de  $PM_{2.5}$ , CO y  $CO_2$  se encuentra 0.6 metros después; y todo es succionado por dos ventiladores que mandan el flujo a la atmósfera.



**Figura 31.** Tren de muestreo de las emisiones de la chimenea.

Para el caso del tren de muestreo de las emisiones intra-domiciliarias, no se puede cumplir con la condición de que se tome la muestra cuando el flujo va en sentido vertical, debido a las dimensiones del laboratorio que son insuficientes. Por lo cual se determinó que la muestra se tome con el flujo en sentido horizontal, tal y como se ha estado trabajando en el laboratorio LINEB. El tren de muestreo empieza con la toma de muestra del VelociCalc para registrar temperatura y velocidad del flujo en la tubería; seguido por la toma de muestra para el Q-Trak y registrar la concentración en tiempo real de CO y CO<sub>2</sub> en la succión de las bombas SKC; y también la toma de muestra de PM<sub>2.5</sub> con el ciclón por el método gravimétrico.

En este tren de muestreo se cumple con las distancias entre puertos de muestreo, la toma de muestra para velocidad y temperatura se encuentra a 1.2 metros después del codo de 90°; la toma de muestra de CO, CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> está a 0.6 metros después de la toma de velocidad y antes de 0.9 metros del ventilador.



**Figura 32.** Tren de muestreo de las emisiones intra-domiciliarias.

#### 4.1.1 Evaluación de Emisiones

A continuación, se presentan los cálculos utilizados para obtener las tasas de emisión intra-domiciliarias y de la chimenea para CO y PM<sub>2.5</sub>; el valor de la fracción de las emisiones intra-domiciliarias; así como el valor del balance de carbono. El cálculo presentado, incluye solo una fase (inicio frío) de uno de los 10 WBT realizados; para ver los resultados de las 30 fases véase el Anexo A. La metodología seguida se expone en el apartado 3.1.3 de la Metodología de este trabajo.

#### TASAS DE EMISIÓN INTRA-DOMICILIARIAS

##### 1.- Flujo en la tubería

$$(4 \text{ m/s}) * (0.01824 \text{ m}^2) = 0.0729 \text{ m}^3/\text{s}$$

##### 2.- Densidad del Flujo

Para el cálculo de la densidad del flujo, se tomó como referencia la temperatura del flujo de 25 °C; presión atmosférica ambiente; y el peso molecular del aire, tomando como referencia 21% Oxígeno y 79% Nitrógeno.

$$\left( \frac{29 \text{ g/mol} * 82126 \text{ Pa}}{8.314 \text{ Pa} * \text{m}^3/\text{mol} * \text{K}} \right) // 298.15 \text{ K} = 961 \text{ g/m}^3$$

### 3.- Flujo másico

$$0.0729 \text{ m}^3/\text{s} * 961 \text{ g}/\text{m}^3 = 70.0569 \text{ g}/\text{s}$$

### 4.- Flujo molar

$$\frac{70.0569 \text{ g}/\text{s}}{29 \text{ g}/\text{mol}} = 2.4157 \text{ mol}/\text{s}$$

### 5.- Flujo molar de CO

Con el objetivo de hacer ilustrativo este cálculo, se realizó utilizando el promedio de la concentración de CO durante la fase (inicio frío) del WBT; 1.98 ppm para este caso.

$$\left(\frac{1.98 \text{ ppm}}{1000000}\right) * 2.4157 \text{ mol}/\text{s} = 4.78 \times 10^{-6} \text{ mol}/\text{s}$$

### 6.- CO integrado

Utilizando el peso molecular del CO (28 g/mol), se calculó la masa durante un intervalo de muestreo de 2 segundos, a partir del flujo molar del CO.

$$\left(4.78 \times 10^{-6} \text{ mol}/\text{s}\right) * \left(28 \text{ g}/\text{mol}\right) * (2 \text{ s}) = 2.67 \times 10^{-4} \text{ g}$$

### 7.- Emisión total de CO

A continuación, se presenta el resultado de la sumatoria de la masa de CO, medida durante cada intervalo de 2 segundos en la fase del WBT.

$$0.09 \text{ g}$$



## 8.- Tasa de emisión intra-domiciliaria de CO

Al dividir la masa total de CO emitida durante la fase del WBT, entre el tiempo de duración de la fase; se obtiene la tasa de emisión.

$$\frac{0.09g}{58 \text{ min}} = 1.55 \times 10^{-3} g/\text{min}$$

## PM<sub>2.5</sub>

### 1.- Concentración mediante gravimetría

$$\frac{67.5132 \text{ mg} - 67.391 \text{ mg}}{0.004 \text{ m}^3/\text{min} * 58 \text{ min}} = 0.5267 \text{ mg}/\text{m}^3$$

### 2.- Masa total de PM<sub>2.5</sub>

$$\left(0.0729 \text{ m}^3/\text{s}\right) * \left(0.5267 \text{ mg}/\text{m}^3\right) * \left(58 \text{ min} * \frac{60\text{s}}{1\text{min}}\right) = 133.62 \text{ mg}$$

### 3.- Tasa de emisión intra-domiciliaria de PM<sub>2.5</sub>

$$\frac{133.62 \text{ mg}}{58 \text{ min}} = 2.3038 \text{ mg}/\text{min}$$

## TASAS DE EMISIONES DE LA CHIMENEA

### 1.- Flujo en tubería

$$7.8 \text{ m/s} * 0.01824 \text{ m}^2 = 0.1423 \text{ m}^3/\text{s}$$

### 2.- Densidad del flujo

Para el cálculo de la densidad del flujo, se tomó como referencia la temperatura del flujo de 25 °C; presión atmosférica ambiente; y el peso molecular del aire tomando como referencia 21% Oxígeno y 79% Nitrógeno.

$$\left( \frac{29 \text{ g/mol} * 82126 \text{ Pa}}{8.314 \text{ Pa} * \text{m}^3/\text{mol} * \text{K}} \right) // 298.15 \text{ K} = 961 \text{ g/m}^3$$

### 3.- Flujo másico

$$\left( 0.1423 \text{ m}^3/\text{s} \right) * \left( 961 \text{ g/m}^3 \right) = 136.75 \text{ g/s}$$

### 4.- Flujo molar

$$\frac{136.75 \text{ g/s}}{29 \text{ g/mol}} = 4.71 \text{ mol/s}$$

### 5.- Flujo molar de CO

Con el objetivo de hacer ilustrativo este cálculo, se realizó utilizando el promedio de la concentración de CO durante la fase (inicio frío) del WBT; 237 ppm para este caso.

$$\left(\frac{237 \text{ ppm}}{1000000}\right) * (4.71 \text{ mol/s}) = 1.11 \times 10^{-3} \text{ mol/s}$$

### 6.- CO integrado

Utilizando el peso molecular del CO (28 g/mol), se calculó la masa durante un intervalo de muestreo de 2 segundos, a partir del flujo molar del CO.

$$\left(1.11 \times 10^{-3} \text{ mol/s}\right) * \left(28 \text{ g/mol}\right) * (2 \text{ s}) = 6.21 \times 10^{-2} \text{ g}$$

### 7.- Emisión total de CO

A continuación, se presenta el resultado de la sumatoria de la masa de CO, medida durante cada intervalo de 2 segundos en la fase del WBT.

$$101.35 \text{ g}$$

### 8.- Tasa de emisión de la chimenea de CO

$$\frac{101.35 \text{ g}}{58 \text{ min}} = 1.75 \text{ g/min}$$

## **PM<sub>2.5</sub>**

### **1.- Flujo de PM<sub>2.5</sub>**

Para hacer ilustrativo este cálculo, se utilizó la concentración promedia obtenida a partir del método óptico de muestreo, 11726 µg/m<sup>3</sup>.

$$\left( \frac{136.75 \text{ g/s}}{961 \text{ g/m}^3} \right) * 11726 \text{ µg/m}^3 = 1668.61 \text{ µg/s}$$

### **2.- PM<sub>2.5</sub> integrado**

Se calculó la masa durante un intervalo de muestreo de 2 segundos, a partir del flujo de PM<sub>2.5</sub>.

$$(1668.61 \text{ µg/s}) * (2 \text{ s}) = 3337.22 \text{ µg}$$

### **3.- Masa total de PM<sub>2.5</sub>**

A continuación, se presenta el resultado de la sumatoria de la masa de PM<sub>2.5</sub>, medida durante cada intervalo de 2 segundos en la fase del WBT.

$$5667 \text{ mg}$$

### **4.- Tasa de emisión de la chimenea de PM<sub>2.5</sub>**

$$\frac{5567 \text{ mg}}{58 \text{ min}} = 95.98 \text{ mg/min}$$

## PORCENTAJE DE EMISIONES INTRA-DOMICILIARIAS

A continuación, se muestra el resultado del porcentaje que representan las emisiones intra-domiciliarias; respecto a la emisión total de la estufa.

### 1.- Porcentaje emisión intra-domiciliaria de CO

$$\frac{1.55 \times 10^{-3} \text{ g/min}}{1.55 \times 10^{-3} \text{ g/min} + 1.75 \text{ g/min}} * 100 = 0.09 \%$$

### 2.- Porcentaje emisión intra-domiciliaria de PM<sub>2.5</sub>

$$\frac{2.3038 \text{ mg/min}}{2.3038 \text{ mg/min} + 95.98 \text{ mg/min}} * 100 = 2.34 \%$$

## BALANCE DE CARBONO

### 1.- Carbono de entrada

$$[(0.5 * 2640 \text{ g}) * (1 - 0.1186)] - (0.81 * 432 \text{ g}) = 813.528 \text{ g}$$

### 2.- Carbono de salida

Se realizó la suma de la masa total de CO, CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub>, de las emisiones de la chimenea e intradomiciliarias; para después calcular el carbono que contiene cada uno de estos contaminantes. Con lo cual es posible calcular el balance de carbono.

- **Carbono en CO**

$$(0.09 \text{ g} + 101.35 \text{ g}) * \left(\frac{12}{28}\right) = 43.47 \text{ g}$$

- **Carbono en CO<sub>2</sub>**

Para obtener la masa total del CO<sub>2</sub>, emitida durante la fase del WBT se siguió el mismo procedimiento que el del CO.

$$(44.72 \text{ g} + 2839 \text{ g}) * \left(\frac{12}{44}\right) = 786.47 \text{ g}$$

- **Carbono en PM<sub>2.5</sub>**

$$(0.13362 \text{ g} + 5.667 \text{ g}) * 0.91 = 5.28 \text{ g}$$

- **Sumatoria de Carbono (Carbono de salida)**

$$43.47 \text{ g} + 786.47 \text{ g} + 5.28 \text{ g} = 835.22 \text{ g}$$

### 3.- Balance de Carbono

$$\frac{835.22 \text{ g}}{813.528 \text{ g}} * 100 = 102.67 \%$$

De acuerdo a la metodología seguida en este trabajo, un resultado del balance de carbono con  $100 \pm 20\%$  indica que la medición de emisiones es aceptable.

## 4.2 Porcentaje de emisiones intra-domiciliarias

Mediante las pruebas WBT (n=10), se obtuvieron las tasas de emisión totales de CO y PM<sub>2.5</sub>; y el porcentaje que representan las emisiones intra-domiciliarias respecto al total de las emisiones por el uso de la estufa Patsari. A continuación se muestran los resultados de la Eficiencia Modificada de Combustión (MCE), balance de carbono, y el porcentaje que representan las emisiones intra-domiciliarias para cada contaminante.

**Tabla 5.** Resultados de Eficiencia de combustión modificada, tasas de emisión totales y porcentaje de emisiones intra-domiciliarias de cada contaminante utilizando el WBT.

	Tasas de emisión total			Emisiones intra-domiciliarias		
	MCE (%)	Balance de carbono	PM <sub>2.5</sub> (mg/min)	CO (g/min)	PM <sub>2.5</sub> (%)	CO (%)
<b>Promedio</b>	95.1	103%	138.28	2.18	2.70	0.12
<b>Desviación estándar</b>	1.5	9%	85.81	1.32	1.97	0.07
<b>Máximo</b>	97.61	119%	359.25	4.91	8.07	0.25
<b>Mínimo</b>	92.17	82%	35.36	0.70	0	0.03
<b>n</b>	30	30	30	30	30	30

**Nota:** Se presentan los resultados en conjunto de las tres fases del WBT, inicio frío, inicio caliente y fuego lento.

Los valores del porcentaje de emisiones intra-domiciliarias, muestran que para PM<sub>2.5</sub> es de 2.7 ( $\pm$  1.97%) en promedio y de 0.12 ( $\pm$  0.07%) en promedio para CO por el uso de la estufa Patsari; lo que resulta muy contrastante con el 25 ( $\pm$  10%) que asume el WBT y la OMS para este tipo de dispositivos de cocción y que se encuentra reportado en la literatura.

#### 4.2.1 Prueba de exactitud de las balanzas analíticas

Con el fin de determinar la exactitud de cada balanza analítica para el pesado de los filtros de fibra de vidrio, se realizó el pesado de masas estándar con los siguientes pesos: 1mg, 2mg, 5 mg, 10mg, 50mg y 100mg. Se llevaron a cabo 5 mediciones para cada masa estándar, y el promedio fue comparado con el peso que indica el fabricante para cada masa estándar. En la Tabla 6 se muestran los resultados de las pruebas de exactitud para cada báscula analítica.

**Tabla 6.** Resultados de las pruebas de exactitud de las balanzas analíticas.

Masa estándar (mg)	Semi micro-analítica		Micro-analítica	
	Peso (mg)	Error (%)	Peso (mg)	Error (%)
1	0.97 ( $\pm 1E^{-5}$ )	3.00	0.9942 ( $\pm 1.3E^{-6}$ )	0.58
2	1.948 ( $\pm 1.64 E^{-5}$ )	2.60	1.992 ( $\pm 1.58E^{-6}$ )	0.40
5	4.92 ( $\pm 1.58 E^{-5}$ )	1.60	4.9894 ( $\pm 1.34E^{-6}$ )	0.21
10	9.898 ( $\pm 2.17 E^{-5}$ )	1.02	9.9784 ( $\pm 1.51E^{-6}$ )	0.22
50	49.946 ( $\pm 2.07 E^{-5}$ )	0.11	49.8968 ( $\pm 1.92E^{-6}$ )	0.21
100	99.95 ( $\pm 1.58 E^{-5}$ )	0.05	99.7922 ( $\pm 1.92E^{-6}$ )	0.21

**Nota:** El valor del peso de cada masa estándar reportado, es el resultado de un promedio de 5 mediciones.

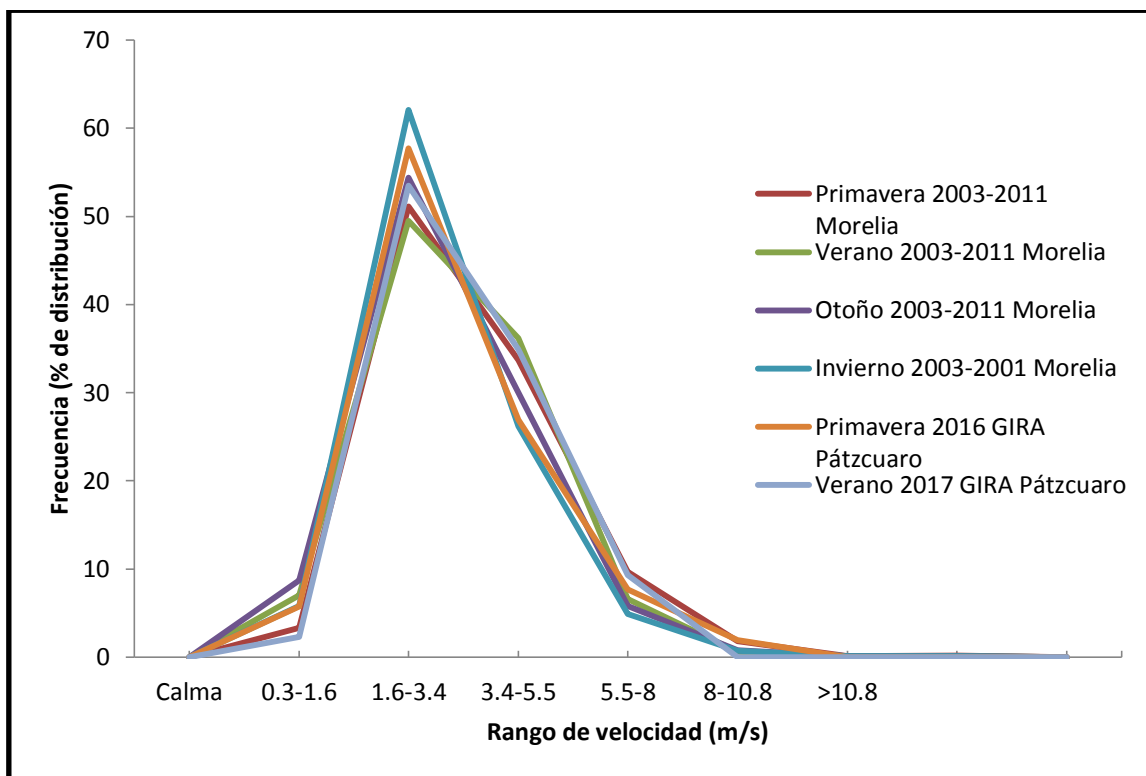
La báscula Semi Micro-analítica fue utilizada para determinar el peso de los filtros de fibra de vidrio con diámetro de 4 pulgadas procedentes de las emisiones de la chimenea; y así conocer la masa total de  $PM_{2.5}$  contenidos en los mismos. Por su parte, la báscula Micro-analítica fue utilizada para determinar el peso de los filtros de fibra de vidrio con diámetro de 37mm procedentes de las emisiones intra-domiciliarias y los CBC para determinar la concentración promedio a 24 horas para validar las estimaciones del modelo; y así conocer el contenido de  $PM_{2.5}$  en los mismos.



### 4.3 Parametrización de las variables de entrada al MCBM

#### 4.3.1 Comparación de los rangos de velocidad para los ensayos de TIA

A continuación se presentan los resultados de la comparación de los rangos de velocidad presentes durante los ensayos para la determinación de la TIA en las cocinas simuladas de GIRA en Pátzcuaro; con los rangos de velocidad dominantes para las estaciones del 2003-2011 para la ciudad de Morelia.



**Figura 33.** Comparación de las velocidades del viento entre la ciudad de Morelia y GIRA en Pátzcuaro.

Como se observa en la Figura 33, no existe variabilidad considerable en realizar los ensayos para la determinación de la TIA en cualquier estación del año. Debido a que el comportamiento de la distribución de las velocidades predominantes del viento es muy parecido en las cuatro estaciones.

A continuación (véase Tabla 7), se presenta los promedios entre la velocidad mínima y máxima registrada para la velocidad del viento en cada ensayo de TIA realizado en las instalaciones de GIRA.

**Tabla 7.** Rangos de velocidad registrados en las instalaciones de GIRA.

Rango de velocidad (m/s)	GIRA Primavera 2016		GIRA Verano 2017	
	Promedio	SD	Promedio	SD
Calma	0.20	0	0.25	0
0.3-1.6	0.92	0.37	0.93	0.33
1.6-3.4	2.19	0.47	2.32	0.55
3.4-5.5	No registrado	No registrado	3.75	0.21
<b>Total de eventos registrados</b>	63		44	

**Nota:** Promedios de velocidad calculados a partir de la velocidad mínima y máxima del viento SD (Desviación estándar).

Como se observa en la tabla anterior, solamente 4 rangos de velocidad del viento fueron registrados; y en dicha tabla puede observarse la variabilidad en las velocidades del viento, presentada como desviación estándar.

### 4.3.2 Datos de entrada al MCBM

Mediante las pruebas WBT (n=10), se determinaron las tasas de emisión totales de CO y PM<sub>2.5</sub>, así como la fracción de emisiones intra-domiciliarias para CO y PM<sub>2.5</sub> para la estufa Patsari. Con los resultados reportados por Medina en el 2017, se obtuvieron los datos para tasas de emisión totales de CO y PM<sub>2.5</sub> para el Fogón Tres Piedras (TSF por sus siglas en inglés) utilizando el protocolo WBT y las tasas de emisión de la estufa Patsari utilizando el CBC. Con el uso del método de decaimiento del gas trazador se determinaron los valores de la tasa de intercambio de aire de las 2 cocinas simulada de GIRA. Con datos proporcionados por el INSP se obtuvieron valores de volúmenes de cocinas de los usuarios de la estufa Patsari en comunidades de la zona Purepecha del estado de Michoacán. Finalmente, con la ayuda de bases de datos del LINEB se obtuvieron datos de tiempos de cocinados reales de las usuarias de la estufa Patsari en la zona Purepecha del estado de Michoacán. En la Tabla 8, se presentan los resultados de cada una de las variables que es requerida por el MCBM.

**Tabla 8.** Variables de entrada al MCBM y su distribución asumida.

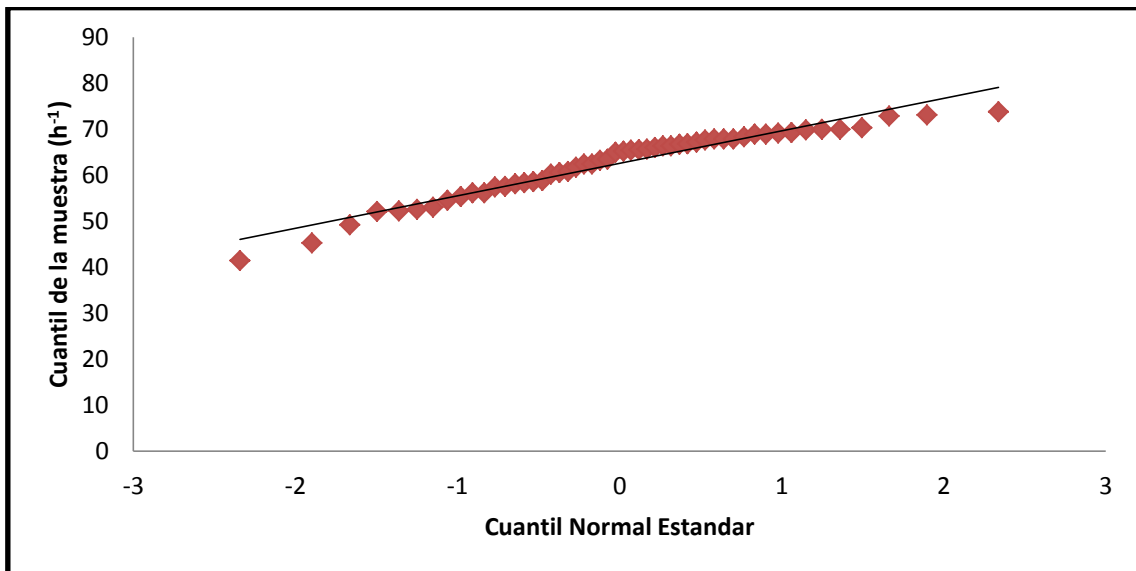
	Inputs Monte Carlo Box Model					Distribución
	Promedio	SD	n	Min	Max	
<b>TIA Cocina Simulada 1 (h-1)</b>	62.54	7.25	52	41.37	73.73	Normal
<b>TIA Cocina Simulada 2 (h-1)</b>	42.09	7.91	30	29.25	59.44	Normal
<b>Volumen (m3)</b>	41.23	4.23	100	35	52.20	Normal
<b>Tiempo (min)</b>	265.55	119.07	29	60	480	Normal
<b>G Patsari WBT CO (g/min)</b>	2.18	1.32	30	0.7	4.91	Normal
<b>f Patsari WBT CO (%)</b>	0.12	0.07	30	0.03	0.25	Normal
<b>G Patsari WBT PM2.5 (mg/min)</b>	138.28	85.81	30	35.36	359.25	Normal
<b>f Patsari WBT PM2.5 (%)</b>	2.70	1.97	30	0	8.07	Normal
<b>G TSF WBT CO (g/min)</b>	2.26	1.52	15	0.52	5.63	Normal
<b>G TSF WBT PM2.5 (mg/min)</b>	171.22	102.75	15	60.44	446.19	Normal
<b>G Patsari CBC CO (g/min)</b>	0.56	0.05	5	0.47	0.59	Normal
<b>G Patsari CBC PM2.5 (mg/min)</b>	260.58	105.42	5	89.50	375.33	Normal

**Nota:** WBT (Prueba de ebullición de agua), CBC (Ciclo de cocinado controlado) y SD (Desviación estándar).

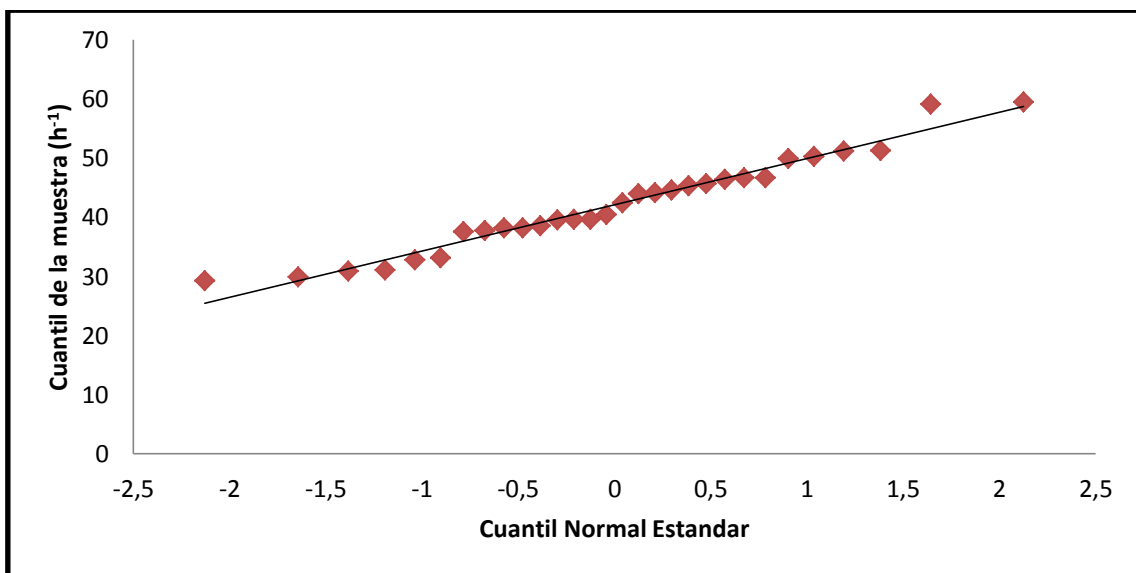
El modelo requiere del valor promedio de las variables de entrada, el valor mínimo esperado, el valor máximo esperado y la distribución del grupo de datos de la variable (véase Tabla 8). Donde  $\alpha$  es la tasa de intercambio de aire en unidades ( $\text{h}^{-1}$ ); V es el volumen del cuarto de cocinado ( $\text{m}^3$ ); t es el tiempo de cocinado (min); G CO es la tasa de emisión para el monóxido de carbono ( $\text{g}/\text{min}$ ); f CO es la fracción que representa la emisión intra-domiciliaria de CO en la tasa de emisión; G PM es la tasa de emisión de material particulado 2.5 micras ( $\text{mg}/\text{min}$ ); y f PM la fracción de material particulado que representa la emisión intra-domiciliaria de  $\text{PM}_{2.5}$  de la tasa de emisión. Para determinar la distribución de cada variable, se asumió que el comportamiento de cada variable es normal, lo cual es común en variables ambientales.

### 4.3.3 Evaluación del supuesto de normalidad en las variables

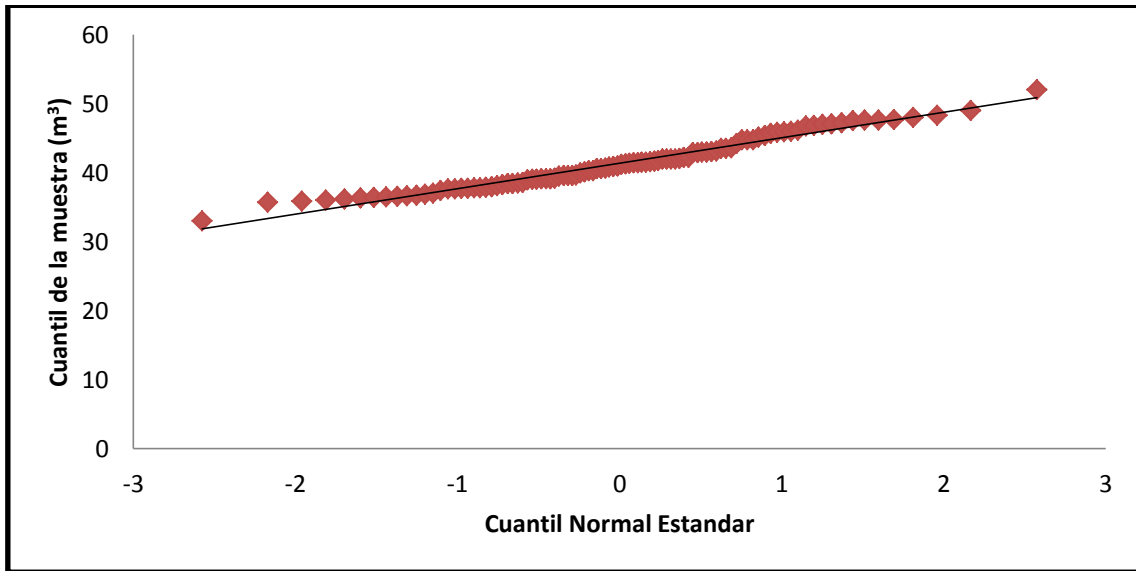
Para evaluar el supuesto de comportamiento normal de cada variable, se construyeron gráficos Cuantil-Cuantil, los cuales son una comparación entre el cuantil de la muestra contra el cuantil normal estándar esperado si la variable sigue un comportamiento “normal”. A continuación se presentan los gráficos del supuesto de normalidad para cada una de las variables de entrada al MCBM.



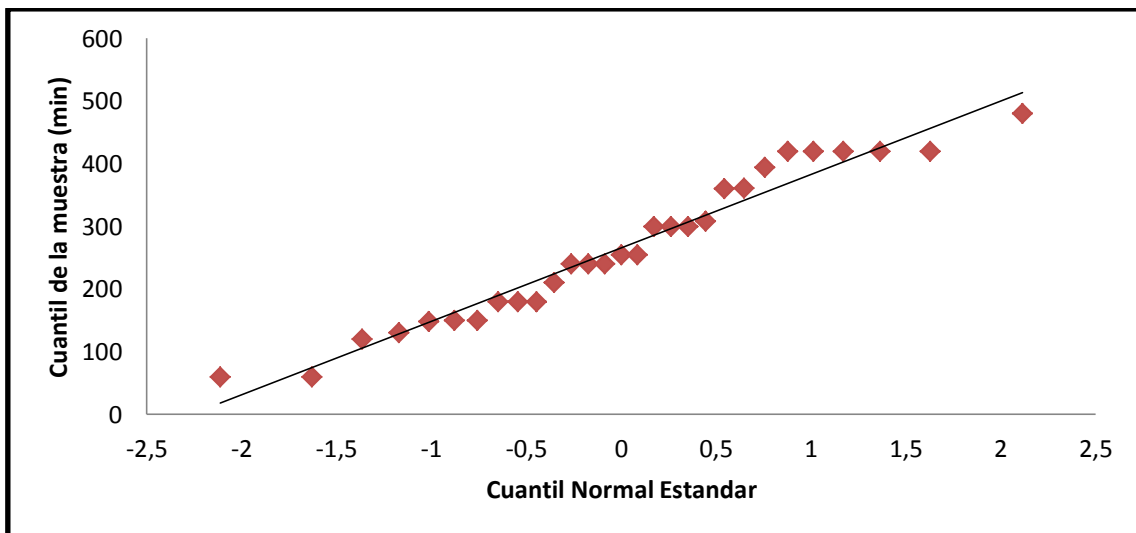
**Figura 34.** Gráfico Cuantil-Cuantil Tasa de Intercambio de Aire Cocina Simulada 1.



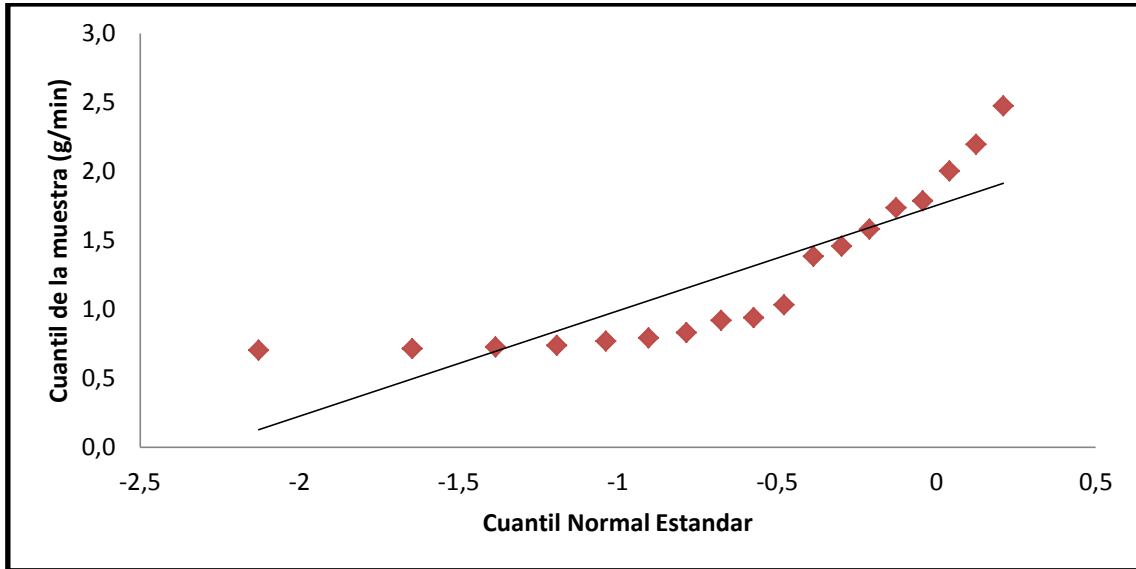
**Figura 35.** Gráfico Cuantil-Cuantil Tasa de Intercambio de Aire Cocina Simulada 2.



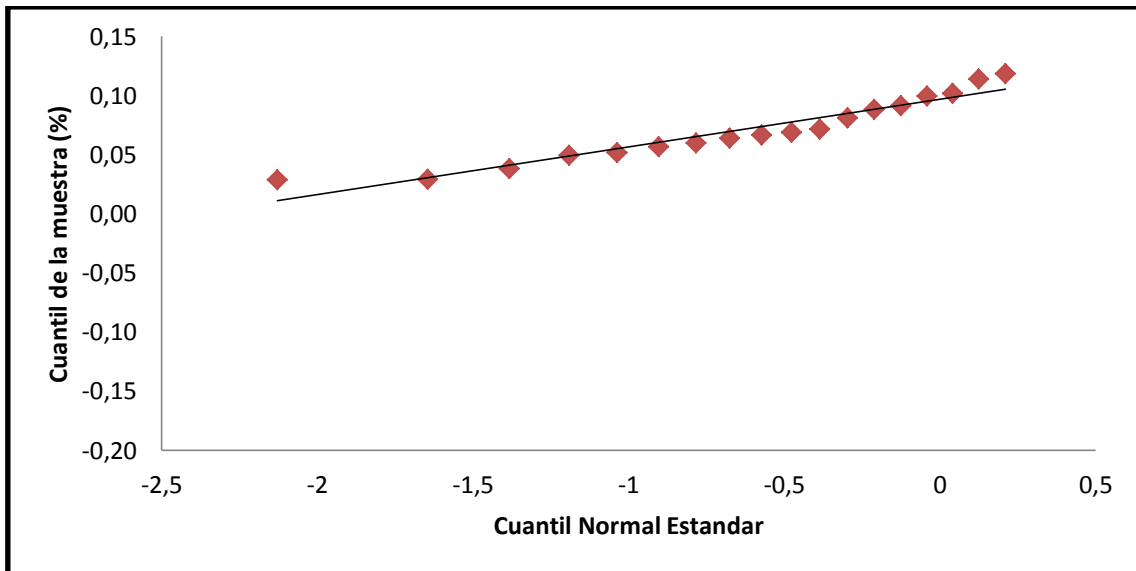
**Figura 36.** Gráfico Cuantil-Cuantil Volumen de cocinas.



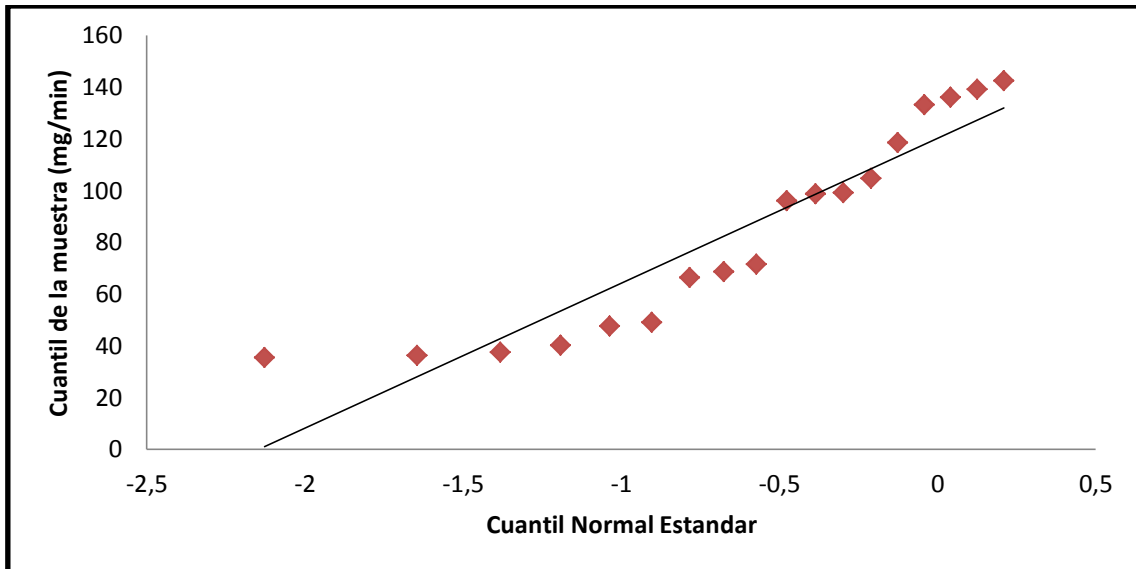
**Figura 37.** Gráfico Cuantil-Cuantil Tiempo de cocinado.



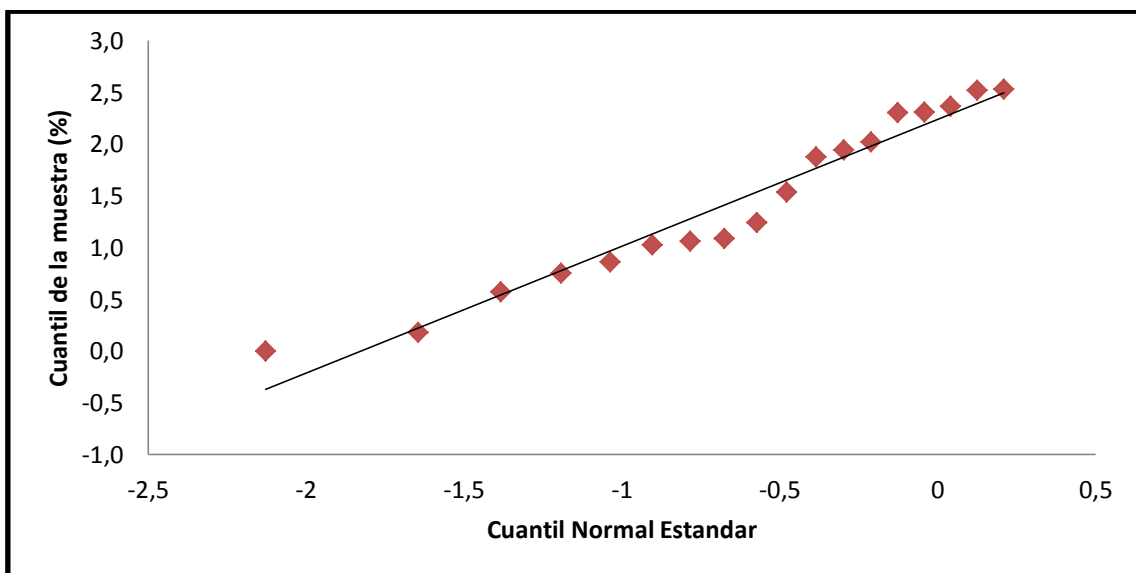
**Figura 38.** Gráfico Cuantil-Cuantil Tasa de emisión CO de la estufa Patsari utilizando el WBT.



**Figura 39.** Gráfico Cuantil-Cuantil Tasa de emisión CO de la estufa Patsari utilizando el WBT.

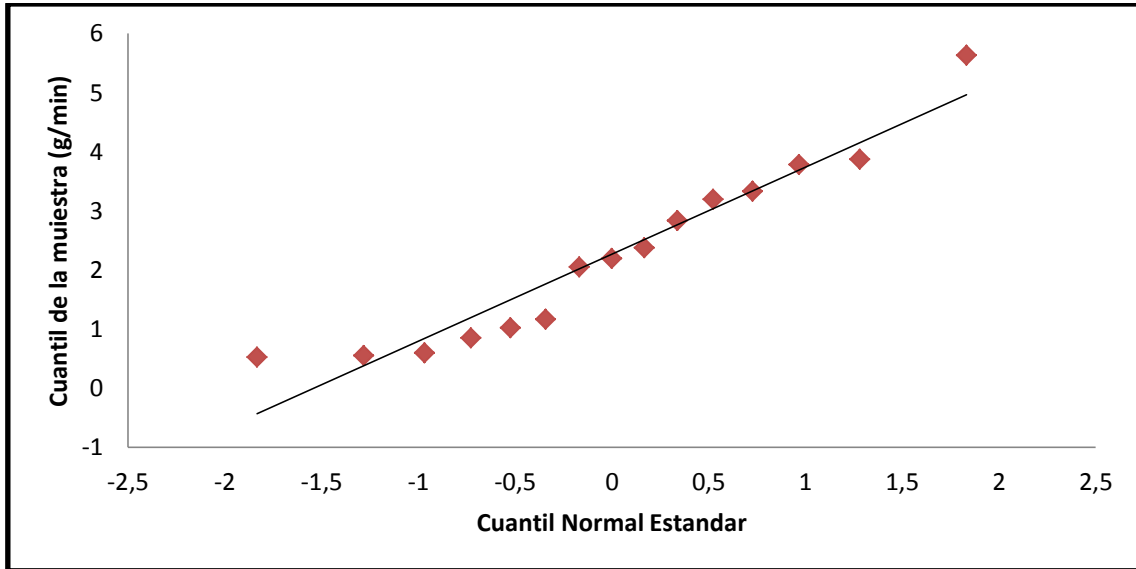


**Figura 40.** Gráfico Cuantil-Cuantil Tasa de emisión PM<sub>2,5</sub> de la estufa Patsari utilizando el WBT.

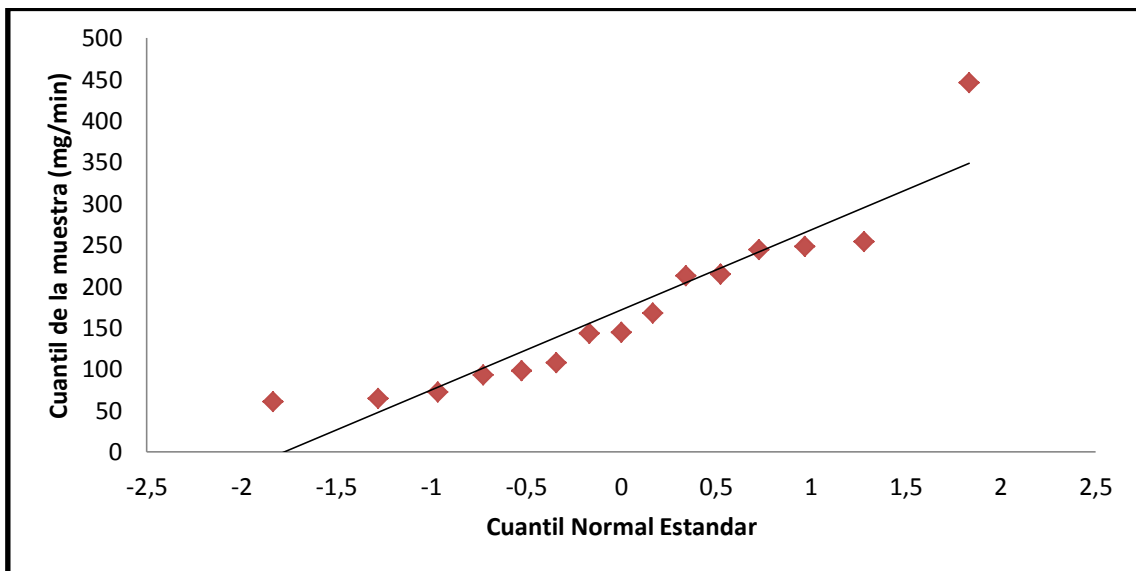


**Figura 41.** Gráfico Cuantil-Cuantil Porcentaje de emisiones intra-domiciliarias PM<sub>2,5</sub> de la estufa Patsari utilizando el WBT.

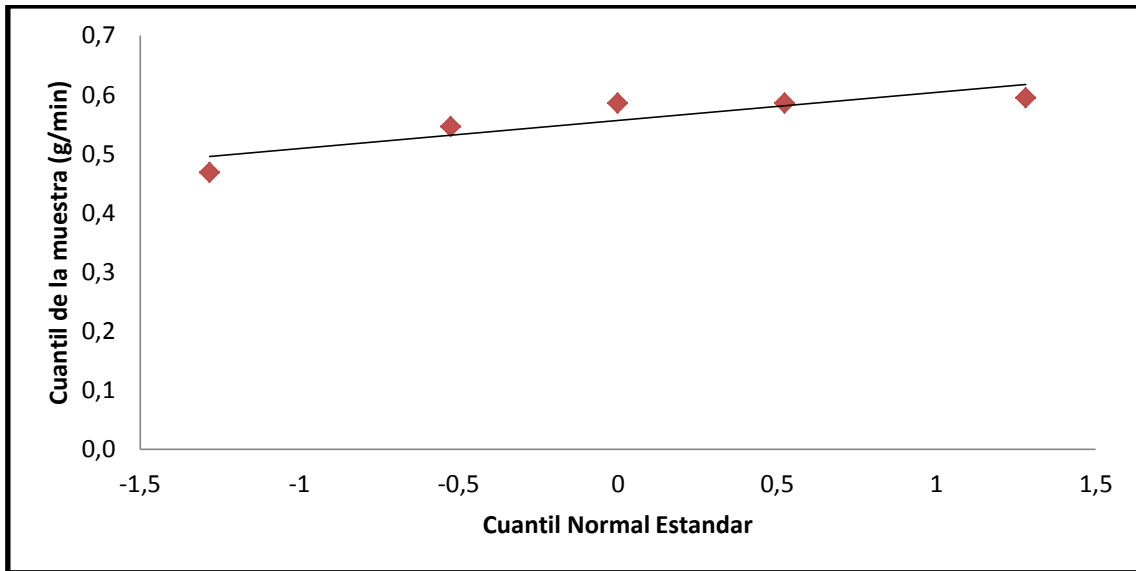




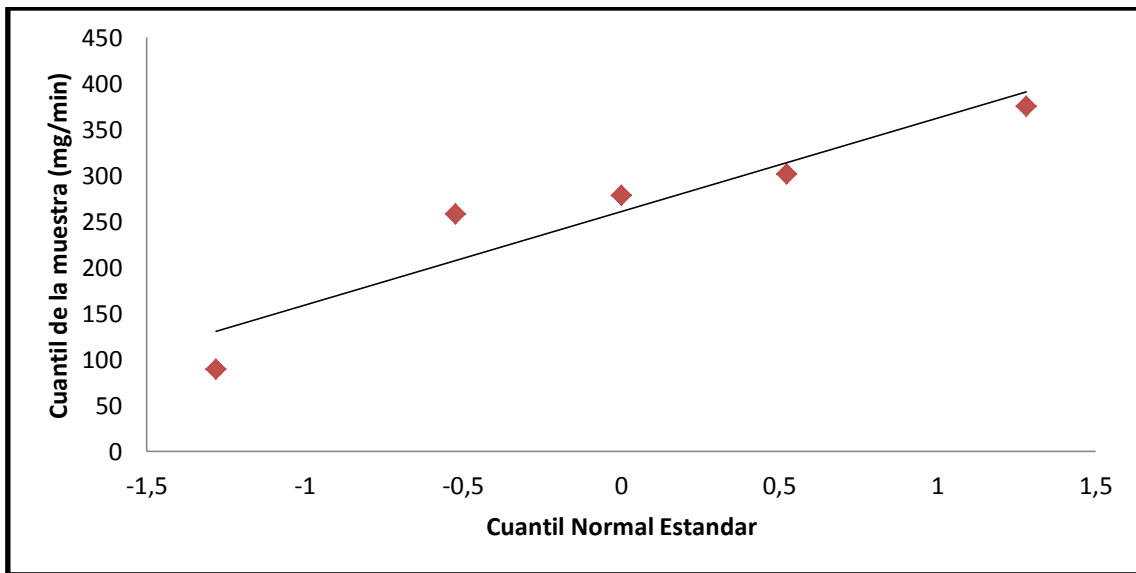
**Figura 42.** Gráfico Cuantil-Cuantil Tasa de emisión CO del TSF utilizando el WBT.



**Figura 43.** Gráfico Cuantil-Cuantil Tasa de emisión PM<sub>2.5</sub> del TSF utilizando el WBT.



**Figura 44.** Gráfico Cuantil-Cuantil Tasa de emisión CO de la estufa Patsari utilizando el CBC.



**Figura 45.** Gráfico Cuantil-Cuantil Tasa de emisión PM<sub>2,5</sub> de la estufa Patsari utilizando el CBC.

Con el fin de evaluar el comportamiento lineal de cada gráfico y así el supuesto de normalidad; se calculó el coeficiente de correlación  $r_Q$  para cada variable y se reportaron los valores de nivel de significancia de cada una de las variables (Véase Tabla 9).

**Tabla 9.** Coeficientes de correlación del supuesto de normalidad de cada variable y su nivel de significancia.

Variable	Tamaño de la muestra (n)	Coeficiente de correlación ( $r_Q$ )	Nivel de significancia ( $\alpha$ )
$\alpha$ Cocina Simulada 1	52	0.9707	0.01
$\alpha$ Cocina Simulada 2	30	0.9843	0.10
Volumen	100	0.9858	0.01
Tiempo	29	0.9800	0.10
G Patsari WBT CO	30	0.9552	0.01
f Patsari WBT CO	30	0.9609	0.01
G Patsari WBT PM2.5	30	0.9589	0.01
f Patsari WBT PM2.5	30	0.9675	0.05
G TSF WBT CO	15	0.9635	0.10
G TSF WBT PM2.5	15	0.9326	0.01
G Patsari CBC CO	5	0.8899	0.05
G Patsari CBC PM2.5	5	0.9429	0.10

**Nota:** La distribución de cada variable fue evaluada utilizando el coeficiente de correlación del gráfico Cuantil-Cuantil, determinando el nivel de significancia o certeza ( $\alpha=0.01, 0.05$  y  $0.1$ ).

Los resultados de los coeficientes de correlación y niveles de significancia en la Tabla 9, corroboran el supuesto de normalidad para todas las variables de entrada al MCBM. Con los siguientes resultados: Para la variable  $\alpha$  Cocina Simulada 1, con un nivel de significancia del 0.01 se confirma que su comportamiento es normal. Con un nivel de significancia de 0.1 se comprueba que el comportamiento de la variable de  $\alpha$  Cocina Simulada 2 es normal. La variable de volumen de cocinas presenta un comportamiento normal, con un nivel de significancia del 0.01. Con un nivel de significancia del 0.1, se confirma que la variable tiempo de cocinado sigue un comportamiento normal. Se confirma que la variable de tasa de emisión de CO de la estufa Patsari utilizando el WBT sigue un comportamiento normal, con un nivel de significancia del 0.01. Para la variable del porcentaje de emisiones intra-domiciliarias de CO de la estufa Patsari utilizando el WBT, se comprueba que sigue un

comportamiento normal con un nivel de significancia de 0.01. También se confirma con un nivel de significancia del 0.01 que la variable de tasa de emisión de  $PM_{2.5}$  de la estufa Patsari utilizando el WBT sigue un comportamiento normal. Por su parte, el porcentaje de emisiones intra-domiciliarias de  $PM_{2.5}$  de la estufa Patsari utilizando el WBT sigue un comportamiento normal con un nivel de significancia de 0.05. La tasa de emisión de CO del TSF utilizando el WBT sigue un comportamiento normal con un nivel de significancia de 0.1. Con un nivel de significancia de 0.01 la variable de tasa de emisión de  $PM_{2.5}$  del TSF utilizando el WBT sigue un comportamiento normal. Finalmente, las variables de las tasas de emisión de CO y  $PM_{2.5}$  de la estufa Patsari utilizando el CBC siguen un comportamiento normal con valores de significancia de 0.05 y 0.1 respectivamente.

#### 4.3.4 Resultados del uso del MCBM

Utilizando el MCBM, se modelaron las concentraciones de contaminantes en los hogares de los usuarios de la zona Purepecha del estado de Michoacán. Simulando el escenario de la Cocina Simulada 1 con el uso de la estufa Patsari y del TSF, utilizando tasas de emisión obtenidas del WBT; con el objetivo de determinar el porcentaje de simulaciones que cumplen con las AQG de la OMS para CO y el objetivo interno 1 para PM<sub>2.5</sub>. Además de conocer el porcentaje de reducción por la sustitución de un TSF por una estufa Patsari. Los resultados se muestran en la Tabla 10.

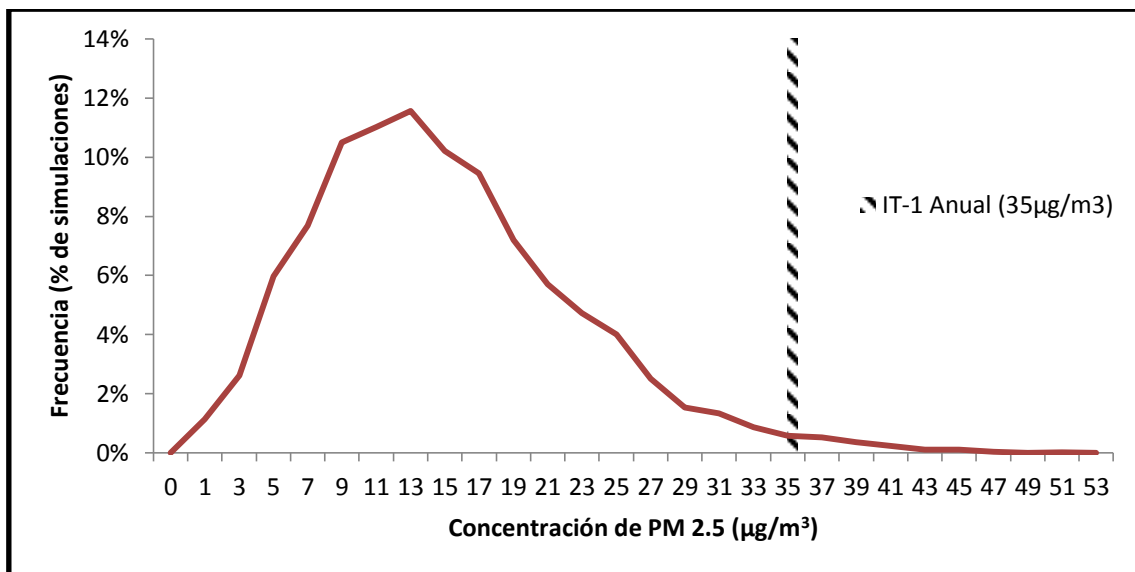
**Tabla 10.** Resultados de la simulación del MCBM para la estufa Patsari y el TSF.

<b>Resultados del MCBM</b>		
	Patsari	TSF
<b>Resultados PM<sub>2.5</sub></b>		
<b>Promedio (µg/m<sup>3</sup>)</b>	15	687
<b>Desviación estándar</b>	8	212
<b>Valor mínimo (µg/m<sup>3</sup>)</b>	0	138
<b>Valor máximo (µg/m<sup>3</sup>)</b>	51	1522
<b>Simulaciones dentro de las AQG de la OMS</b>		
<b>Objetivo 1 PM<sub>2.5</sub> (anual) 35 µg/m<sup>3</sup></b>	98%	0%
<b>Resultados CO</b>		
<b>Promedio (mg/m<sup>3</sup>)</b>	0.0111	9.7
<b>Desviación estándar</b>	0.0046	3.5
<b>Valor mínimo (mg/m<sup>3</sup>)</b>	0.0016	1.8
<b>Valor máximo (mg/m<sup>3</sup>)</b>	0.0399	24.6
<b>Simulaciones dentro de las AQG de la OMS</b>		
<b>24 (h) 7 mg/m<sup>3</sup></b>	100%	23%

Los resultados de la Tabla 10 muestran que las estimaciones del modelo para el escenario de las condiciones de ventilación de la Cocina Simulada 1 presentan los siguientes resultados: la estufa Patsari con datos del WBT para PM<sub>2.5</sub> estima que el promedio de la concentración es de  $15 \pm 8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y que el porcentaje de estimaciones que cumple con el Objetivo interno 1 anual ( $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) es de 98% de las estimaciones. Por su parte el TSF tiene como resultado de la concentración de  $687 \pm 212 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y que el porcentaje de estimaciones que cumple con las guías de calidad del aire de la OMS es del 0% para el objetivo interno 1 anual. Lo cual implica que el uso de la estufa Patsari

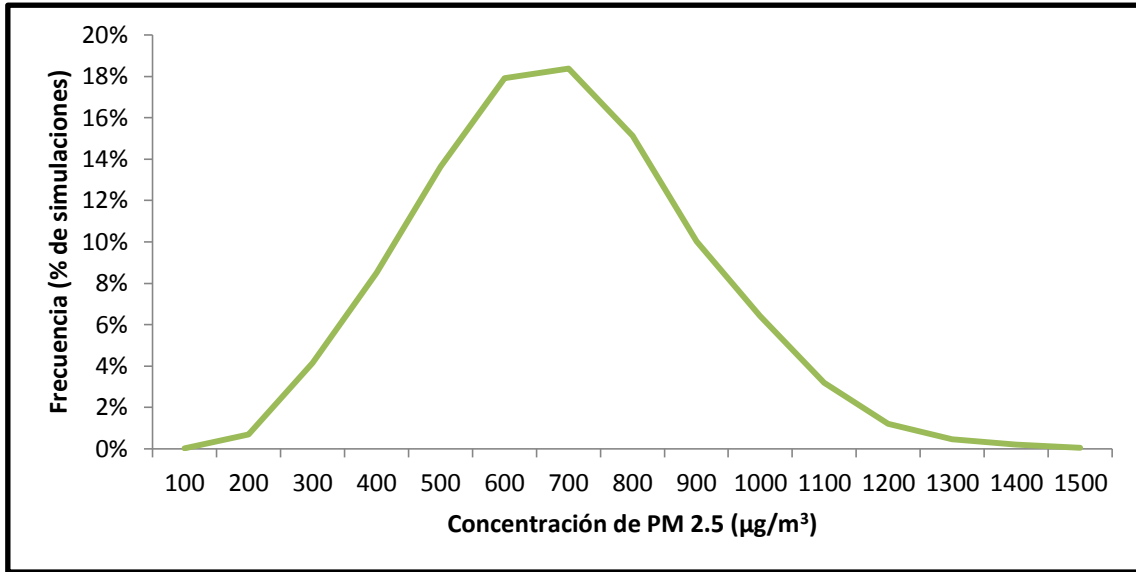
por la sustitución de un TSF reduce la concentración de  $PM_{2.5}$  en los hogares es de 98% en promedio. Para el caso del CO, la estufa Patsari presenta una concentración promedio de  $0.0111 \pm 0.0046 \text{ mg/m}^3$ ; y el porcentaje de estimaciones que cumplen con las AQG es del 100% para el objetivo a 24 horas ( $7\text{mg/m}^3$ ). Por su parte, el TSF presenta una concentración promedio de  $9.7 \pm 3.5 \text{ mg/m}^3$ ; y el porcentaje de estimaciones que cumplen AQG es del 100% para el objetivo de 24h ( $7\text{mg/m}^3$ ). Esto indica que el uso de la estufa Patsari en sustitución del TSF reduce la concentración de CO en los hogares en un 99% en promedio.

En la Figura 46, se presenta el histograma de las concentraciones simuladas por el MCBM para  $PM_{2.5}$  por el uso de la estufa Patsari, comparadas con las AQG de la OMS.



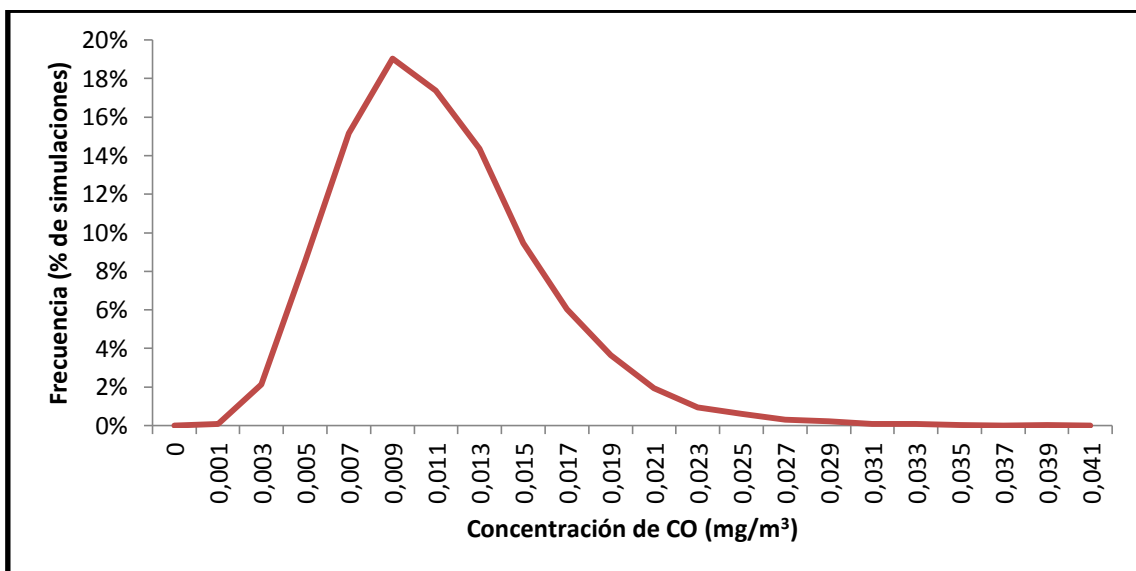
**Figura 46.** Histograma de frecuencias de la concentración calculada a 24 horas por el MCBM para  $PM_{2.5}$  de la estufa Patsari.

En la Figura 47, se presenta el histograma de las concentraciones simuladas por el MCBM para PM<sub>2.5</sub> por el uso del TSF.



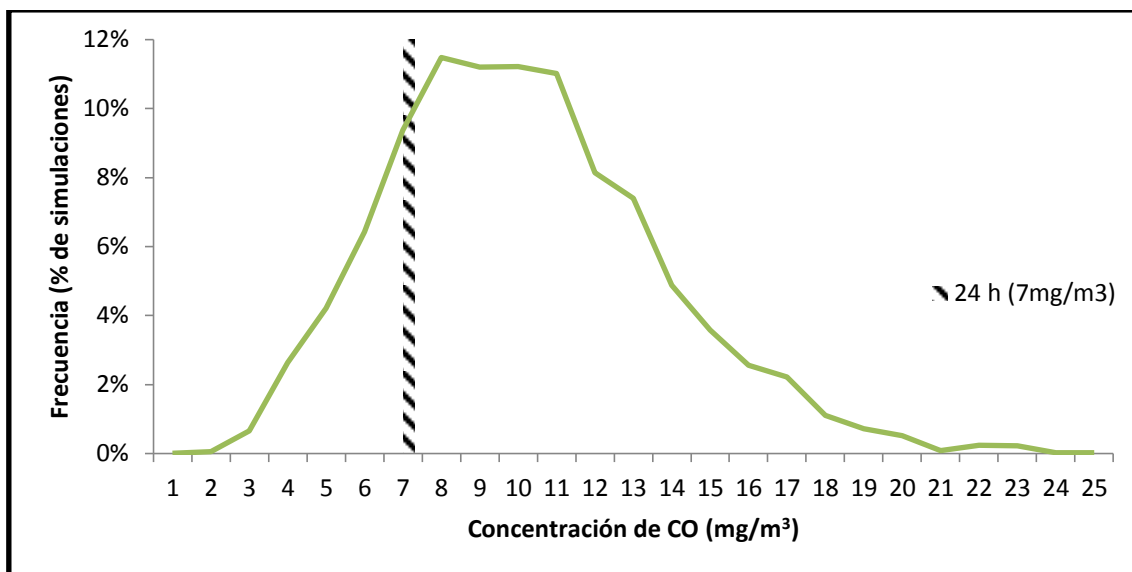
**Figura 47.** Histograma de frecuencias de la concentración calculada a 24 horas por el MCBM para PM<sub>2.5</sub> del TSF.

De igual forma, se presenta en la Figura 48 el histograma de las concentraciones de CO simuladas para la estufa Patsari.



**Figura 48.** Histograma de frecuencias de la concentración calculada a 24 horas por el MCBM para CO de la estufa Patsari.

En la Figura 49, se presenta el histograma de las concentraciones de CO simuladas para el TSF.



**Figura 49.** Histograma de frecuencias de la concentración calculada a 24 horas por el MCBM para CO del TSF.



## **4.4 Discusión de resultados**

### **4.4.1 Porcentaje de emisiones intra-domiciliarias**

El uso de la doble campana de extracción, en laboratorio y bajo condiciones controladas; permite la captura y separación de las emisiones de la chimenea e intra-domiciliarias. De acuerdo con los resultados de los WBT realizados en el presente trabajo de investigación, sugiere que el supuesto de  $25 \pm 10\%$  de la fracción de emisiones intra-domiciliarias que asume Johnson y colaboradores en el 2014 esta sobrestimado.

Lo que sugiere que el protocolo internacional WBT, estima incorrectamente la fracción de emisiones intra-domiciliarias por el uso de estufas con chimenea. Además, el uso de una doble campana de extracción, resulta en una importante contribución en la evaluación de estufas tipo plancha con chimenea; pues permite determinar las emisiones intra-domiciliarias de contaminantes que pueden causar efectos adversos a la salud de los usuarios.

### **4.4.2 Parametrización del MCBM**

Es importante mencionar que las estimaciones hechas por el MCBM, fueron realizadas utilizando factores de emisión de estufas Patsari nuevas y en condiciones ideales de funcionamiento; lo cual puede no ser lo más común, entre los usuarios de las comunidades de la zona Purepecha de Michoacán. Por otra parte, el MCBM que es un modelo que asume una dispersión homogénea de los contaminantes; podría presentar limitaciones respecto al Modelo de Tres Zonas y el Modelo Computacional de Dinámica de Fluidos, los cuales consideran una distribución gaussiana en tres dimensiones; teniendo en cuenta las características físicas y químicas del contaminante, su tiempo de residencia, entre otros; que es lo más parecido a la realidad en los hogares de los usuarios de las estufas eficientes de biomasa. Como menciona Johnson y colaboradores en el 2011, el MCBM se simplificó para considerar solo una fuente de emisión; sin embargo en muchos hogares se utilizan varias estufas o dispositivos de cocción para diversas tareas a lo largo del día. Otro factor importante es que el modelo

no incluye la contaminación atmosférica al aire libre, que podría afectar la concentración de contaminantes en interiores (véase Anexo B).

En términos generales, el uso del MCBM puede ser una buena herramienta para estimar las concentraciones dentro de las cocinas dado los rendimientos de emisiones de estufas tipo plancha; lo cual puede ser una capacidad útil y rentable para determinar los impactos potenciales de la instalación de un dispositivo de cocción.

## CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación expone el primer esfuerzo por determinar el porcentaje real de emisiones intra-domiciliarias por el uso de una estufa tipo plancha con chimenea; así como la parametrización de las variables de entrada del MCBM con datos propios de la zona Purépecha del estado de Michoacán. El hallazgo principal de este trabajo es que la fracción de emisiones intra-domiciliarias por el uso de una estufa tipo plancha con chimenea como la Patsari, es menor que el supuesto de la OMS (Johnson y col. 2014), los protocolos internacionales de evaluación y los trabajos de investigación previamente realizados; con lo cual se reafirma la hipótesis planteada al inicio de esta investigación. A continuación se presentan las conclusiones medulares del presente trabajo:

Las tasas de emisiones intra-domiciliarias para los contaminantes CO y PM<sub>2.5</sub> de la estufa Patsari (estufa con chimenea) reducen los efectos adversos a la salud en comparación con un fogón tradicional.

Los resultados del balance de carbono de los WBT realizados en la doble campana de extracción, demuestran que el uso de este tipo de campanas en laboratorio, permite la captura total y la separación de las emisiones intra-domiciliarias y emisiones de la chimenea.

Los trenes de muestreo de la doble campana de extracción, permiten el registro en paralelo y en tiempo real de las concentraciones de CO, CO<sub>2</sub>; la captura de PM<sub>2.5</sub> por el método gravimétrico; temperatura y velocidad de flujo; de los flujos de las emisiones intra-domiciliarias y de la chimenea.

## RECOMENDACIONES

De acuerdo al desarrollo del presente trabajo de investigación, se recomienda el uso de campanas de doble extracción en laboratorio, para la extracción y captura de las emisiones intra-domiciliarias y de la chimenea; por el uso de estufas eficientes tipo plancha con chimenea. Lo cual permite determinar las tasas de emisiones intra-domiciliarias de los contaminantes que causan efectos adversos a la salud de los usuarios de estufas con chimenea. Además presenta el primer uso del MCBM en México, para calcular concentraciones dentro de las cocinas de los usuarios que utilizan la estufa Patsari en la zona Purepecha del estado de Michoacán; donde aún existen diversos campos por explorar. Las recomendaciones que surgen de este trabajo de investigación son:

Es necesario modificar el protocolo de ebullición de agua en lo que a la determinación de tasas de emisión intra-domiciliarias se refiere.

Las mediciones en campo (en condiciones simuladas) deben incluir el método de captura y los trenes de muestreo propuestos en este trabajo.

Se recomienda utilizar el MCBM por zonas o regiones geográficas, pero es necesario contar con bases de datos robustas para cada variable de entrada al modelo; las cuales sean propias de cada región.

Los resultados del uso del modelo, necesitan ser validados mediante concentraciones medidas en los hogares de los usuarios, llevando a cabo campañas de mediciones extensas y robustas.

La determinación del aporte de la concentración a 24 horas de  $PM_{2.5}$  en el ambiente, podría ser una variable más de entrada al MCBM, para poder estimar con mayor certeza los aportes de  $PM_{2.5}$  por el uso de estufas de biomasa.

Finalmente, podrían incluirse el uso de múltiples fuentes de emisión en los hogares; y el uso de factores de mezclado al modelo para aumentar la precisión durante su uso.

## BIBLIOGRAFIA

**Albalak, R., Bruce, N., McCracken, J. P., Smith, K. R., & De Gallardo, T. (2001).** Indoor respirable particulate matter concentrations from an open fire, improved cookstove, and LPG/open fire combination in a rural Guatemalan community. *Environmental science & technology*, 35(13), 2650-2655.

**Alemán, J. (2013).** Evaluación de la emisión de partículas menores a diez micrómetros (PM<sub>10</sub>) como producto de la erosión eólica en áreas agrícolas de Morelia y zonas aledañas (tesis de maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

**Armendariz Cynthia, A., Edwards, R. D., Johnson, M., Zuk, M., Rojas, L., Jiménez, R. D., ... & Masera, O. (2008).** Reduction in personal exposures to particulate matter and carbon monoxide as a result of the installation of a Patsari improved cook stove in Michoacan Mexico. *Indoor air*, 18(2), 93-105.

**Arnold, J. E. M., Kohlin, G., Persson, R., & Shepherd, G. (2003).** *Fuelwood Revisited: What has changed in the last decade?* (No. CIFOR Occasional Paper no. 39, pp. viii-35p). CIFOR, Bogor, Indonesia.

**Barnes, D. F., Openshaw, K., Smith, K., & van der Plas, R. (1993).** What Makes People Cook With Improved Stoves? A Comparative Review. *Wood Energy Development: Planning, Policies and Strategies. Volume III*, 137-168.

**Berrueta, V. M., Edwards, R. D., & Masera, O. R. (2008).** Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico. *renewable energy*, 33(5), 859-870.

**Blanco S., Cárdenas B., Maíz P., Berrueta V., Masera O. y Cruz J. (2009).** Estudio comparativo de estufas mejoradas para sustentar un Programa de Intervención Masiva en

México. Informe Final. Instituto Nacional de Ecología. Versión actualizada Septiembre de 2012. México D.F. 61 pp.

**Bruce, N., Dora, C., Krzyzanowski, M., Adair-Rohani, H., Morawska, L., & Wangchuk, T. (2013).** Tackling the health burden from household air pollution: Development and implementation of new WHO Guidelines. *Air Quality and Climate Change*, 47(1), 32.

**Bruce, N., Pope, D., Rehfuss, E., Balakrishnan, K., Adair-Rohani, H., & Dora, C. (2015).** WHO indoor air quality guidelines on household fuel combustion: Strategy implications of new evidence on interventions and exposure–risk functions. *Atmospheric Environment*, 106, 451-457.

**Cowlin, S. C. (2005).** Tracer Decay for Determining Kitchen Ventilation Rates in San Lorenzo, Guatemala. *Maxwell Student Projects, Max-04-4, EHS, School of Public Health, University of California, Berkeley*, 1, 2.

**Cui, S., Cohen, M., Stabat, P., & Marchio, D. (2015).** CO<sub>2</sub> tracer gas concentration decay method for measuring air change rate. *Building and Environment*, 84, 162-169.

**Díaz, R. (2000).** Consumo de leña en el sector residencial de México. Evolución histórica y emisiones de CO<sub>2</sub>. *UNAM. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México DF*, 113.

**Ezzati, M., Mbinda, B. M., & Kammen, D. M. (2000).** Comparison of emissions and residential exposure from traditional and improved cookstoves in Kenya. *Environmental Science & Technology*, 34(4), 578-583.

**Gifford, M. L. (2010).** A global review of cookstove programs (Master's dissertation).

**IEA, 2017.** Bioenergy. International Energy Agency. Available from: <https://www.iea.org/topics/renewables/subtopics/bioenergy/> (accessed 30.01.17.).

**ISO 9096:2003,** Stationary source emissions — Manual determination of mass concentration of particulate matter

**ISO CD 19867-1:2015,** Clean cookstoves and clean cooking solutions-Harmonized laboratory test protocols.

**ISO CD 19869:2016,** Clean cookstoves and clean Cooking solutions-Guidance on field testing methods for cookstoves.

**Jetter J, Zhao Y, Smith KR, Khan B, Yelverton T, DeCarlo P, et al. (2012).** Pollutant Emissions and Energy Efficiency under Controlled Conditions for Household Biomass Cookstoves and Implications for Metrics Useful in Setting International Test Standards. *Environ Sci Technol* 2012; 46: 10827\_834.

**Jetter, J. J., & Kariher, P. (2009).** Solid-fuel household cook stoves: characterization of performance and emissions. *Biomass and Bioenergy*,33(2), 294-305.

**Jhonson MA, Chiang RA. 2015.** Quantitative guidance for stove usage and performance to achieve health and environmental targets. *Environ Health Perspect*: 123:820-826; <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1408681>.

**Johnson, M., Edwards, R., Frenk, C. A., & Masera, O. (2008).** In-field greenhouse gas emissions from cookstoves in rural Mexican households. *Atmospheric Environment*, 42(6), 1206-1222.

**Johnson, M., Edwards, R., Ghilardi, A., Berrueta, V., Gillen, D., Frenk, C. A., & Masera, O. (2009).** Quantification of carbon savings from improved biomass cookstove projects. *Environmental Science & Technology*, 43(7), 2456-2462.

**Johnson, M., Edwards, R., Morawska, L., Nicas, M., & Smith, K. R. (2014).** Review 3: Model for Linking Household Energy Use with Indoor Air Quality. *WHO Indoor Air Quality Guidelines: Household Fuel Combustion*.

**Johnson, M., Lam, N., Brant, S., Gray, C., & Pennise, D. (2011).** Modeling indoor air pollution from cookstove emissions in developing countries using a Monte Carlo single-box model. *Atmospheric Environment*, 45(19), 3237-3243.

**Johnson, R. A., & Wichern, D. W. (2002).** Applied multivariate statistical analysis. Ed. *New Jersey*.

**Lewis, J. J., & Pattanayak, S. K. (2012).** Who adopts improved fuels and cookstoves? A systematic review. *Environmental health perspectives*, 120(5), 637-645.

**Lim, S. S., Vos, T., Flaxman, A. D., Danaei, G., Shibuya, K., Adair-Rohani, H., ... & Aryee, M. (2013).** A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *The lancet*, 380(9859), 2224-2260.

**MacCarty N., Ogle D., Still D., Bond T. and Roden C., (2008).** A laboratory comparison of the global warming impact of five major types of biomass cooking stoves. *Energy Sustainable Dev.*, 12, 5-14.

**MacCarty, N. A. (2013).** A zonal model to aid in the design of household biomass cookstoves.



**Masera O, Navia J, Arias T, Riegelhaupt E (1997).** Dendroenergía para el Desarrollo Rural: Patrones de Consumo de Leña en Tres Microrregiones de México. Proyecto: FAO/MEX/TCP/4553(A), Síntesis de Resultados, Pátzcuaro, Michoacán, 1997.

**Masera, O. R., Bellon, M. R., & Segura, G. (1995).** Forest management options for sequestering carbon in Mexico. *Biomass and Bioenergy*, 8(5), 357-367.

**Masera, O. R., Díaz, R., & Berrueta, V. (2005).** From cookstoves to cooking systems: the integrated program on sustainable household energy use in Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 9(1), 25-36.

**Masera, O. R., Saatkamp, B. D., & Kammen, D. M. (2000).** From linear fuel switching to multiple cooking strategies: a critique and alternative to the energy ladder model. *World development*, 28(12), 2083-2103.

**Masera, O., Edwards, R., Arnez, C. A., Berrueta, V., Johnson, M., Bracho, L. R., ... & Smith, K. R. (2007).** Impact of Patsari improved cookstoves on indoor air quality in Michoacán, Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 11(2), 45-56.

**Medina, P. (2017).** Evaluación de la contribución de emisiones y de los parámetros de rendimiento de las estufas eficientes de leña mediante los protocolos WBT/CCT y durante ciclos de cocinado controlado (tesis de doctorado). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

**Medina, P., Berrueta, V., Martínez, M., Ruiz, V., Edwards, R. D., & Masera, O. (2017).** Comparative performance of five Mexican plancha-type cookstoves using water boiling tests. *Development Engineering*, 2, 20-28.

**Murray, D. M., & Burmaster, D. E. (1995).** Residential air exchange rates in the United States: empirical and estimated parametric distributions by season and climatic region. *Risk Analysis*, 15(4), 459-465.

**Naeher, L. P., Brauer, M., Lipsett, M., Zelikoff, J. T., Simpson, C. D., Koenig, J. Q., & Smith, K. R. (2007).** Woodsmoke health effects: a review. *Inhalation toxicology*, 19(1), 67-106.

**Okuyama, H., & Onishi, Y. (2012).** Uncertainty analysis and optimum concentration decay term for air exchange rate measurements: Estimation methods for effective volume and infiltration rate. *Building and Environment*, 49, 182-192.

**REMBIO, 2011.** Red Mexicana de Bioenergía, Cuaderno Temático No. 4, La Bioenergía en México, Situación Actual y perspectivas.

**Riojas-Rodríguez, H., Romieu, I., Marron-Mares, T., Rodriguez-Dozal, S., & Macera, O. (2006).** Health impact assessment due to the introduction of improved stoves in Michoacan, Mexico. *Epidemiology*, 17(6), S226-S227.

**Romieu, I., Riojas-Rodriguez, H., Marrón-Mares, A. T., Schilman, A., Perez-Padilla, R., & Masera, O. (2009).** Improved biomass stove intervention in rural Mexico: impact on the respiratory health of women. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 180(7), 649-656.

**Roth C., (2014),** “Micro-gasification: Cooking with gas from dry biomass. An introduction to concepts and applications of wood-gas burning technologies for coking 2<sup>nd</sup> revised edition”, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

**Ruiz-Mercado, I., Maser, O., Zamora, H., & Smith, K. R. (2011).** Adoption and sustained use of improved cookstoves. *Energy Policy*, 39(12), 7557-7566.

**Serrano Medrano, Montserrat (2016).** Escenarios espaciales explícitos de uso múltiple de combustibles para cocción en el sector energético residencial mexicano y su potencial de mitigación de gases efecto invernadero (tesis de doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México.

**Smith, K. R., & Haigler, E. (2008).** Co-benefits of climate mitigation and health protection in energy systems: scoping methods. *Annu. Rev. Public Health*, 29, 11-25.

**Smith, K. R., Bruce, N., Balakrishnan, K., Adair-Rohani, H., Balmes, J., Chafe, Z., ... & Rehfuess, E. (2014).** Millions dead: how do we know and what does it mean? Methods used in the comparative risk assessment of household air pollution. *Annual review of public health*, 35, 185-206.

**Smith, K. R., Mehta, S., & Maeusezahl-Feuz, M. (2004).** Indoor air pollution from household use of solid fuels. *Comparative quantification of health risks: global and regional burden of disease attributable to selected major risk factors*, 2, 1435-93.

**Smith, K. R., Samet, J. M., Romieu, I., & Bruce, N. (2000).** Indoor air pollution in developing countries and acute lower respiratory infections in children. *Thorax*, 55(6), 518-532.

**Von Schirnding, Y. (2002).** *Addressing the Impact of Household Energy and Indoor Air Pollution on the Health of Poor: Implications for Policy Action and Intervention Measures*. Geneva: World Health Organization.

**Wallace, L. A., Emmerich, S. J., & Howard-Reed, C. (2002).** Continuous measurements of air change rates in an occupied house for 1 year: the effect of temperature, wind, fans, and windows. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 12(4), 296.

**Water Boiling Test, version 4.2.4.** *Cookstove Emissions and Efficiency in a Controlled Laboratory Setting.*

**WHO, 2014. Deaths from Household Air Pollution, 2012.** World Health Organization, Geneva. Available from: <http://apps.who.int/gho/data/node.main.140?lang=en> (accessed 13.01.17.).

**World Health Organization WHO. (2010).** *WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants.* WHO.

**World Health Organization. (2006).** *Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide.* World Health Organization.

**Yamamoto, N., Shendell, D. G., Winer, A. M., & Zhang, J. (2010).** Residential air exchange rates in three major US metropolitan areas: results from the Relationship Among Indoor, Outdoor, and Personal Air Study 1999–2001. *Indoor air*, 20(1), 85-90.

**Zuk, M., Rojas, L., Blanco, S., Serrano, P., Cruz, J., Angeles, F., ... & Riojas-Rodriguez, H. (2007).** The impact of improved wood-burning stoves on fine particulate matter concentrations in rural Mexican homes. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 17(3), 224-232.

## ANEXOS

### Anexo A. Resultados de la evaluación de emisiones

**Tabla 11.** Resultados de la evaluación de las emisiones de los 10 WBT.

# WBT	Fase	Tasas emisión intra-domiciliarias		Tasas emisión chimenea		Emisiones intra-domiciliarias		Balance Carbono (%)	MCE (%)
		CO (g/min)	PM2.5 (mg/min)	CO (g/min)	PM2.5 (mg/min)	CO (%)	PM2.5 (%)		
1	Inicio Frio	0.0016	2.29	1.73	96.98	0.09	2.31	101	94.7
	Inicio Caliente	0.0007	7.97	1.46	90.72	0.05	8.07	94	96.1
	Fuego lento	0.0009	3.53	0.92	62.92	0.10	5.32	106	95.6
2	Inicio Frio	0.0067	3.45	3.20	142.62	0.21	2.36	90	92.9
	Inicio Caliente	0.0060	2.81	2.94	180.28	0.20	1.54	109	94.3
	Fuego lento	0.0016	2.75	0.77	46.38	0.20	5.60	112	96.4
3	Inicio Frio	0.0012	3.21	3.20	135.97	0.04	2.31	88	93.5
	Inicio Caliente	0.0006	2.98	2	115.52	0.03	2.52	98	95.3
	Fuego lento	0.0009	2.72	1.03	93.35	0.09	2.83	117	95.2
4	Inicio Frio	0.0042	1.60	3.07	145.36	0.14	1.09	82	93.1
	Inicio Caliente	0.0079	3.25	3.38	169.95	0.23	1.88	98	93.8
	Fuego lento	0.0020	2.77	0.94	65.97	0.22	4.03	110	96.1
5	Inicio Frio	0.0026	3.27	1.58	158.43	0.17	2.02	98	95.7
	Inicio Caliente	0.0024	3.74	1.38	100.95	0.18	3.57	98	96.2
	Fuego lento	0.0008	3.90	0.79	67.74	0.10	5.44	107	96.2
6	Inicio Frio	0.0072	2.59	2.92	130.61	0.25	1.94	90	93.4

	Inicio Caliente	0.0035	3.45	1.78	132.64	0.20	2.53	101	96.1
	Fuego lento	0.0012	3.27	0.73	44.34	0.16	6.86	107	97.1
	Inicio Frio	0.0031	2.73	4.91	264.04	0.06	1.02	106	92.2
7	Inicio Caliente	0.0020	1.22	2.75	212.32	0.07	0,57	102	94.8
	Fuego lento	0.0007	0	0.83	35.36	0.08	0	114	96.3
	Inicio Frio	0.0017	0.27	2.91	154.21	0.06	0.18	107	93.5
8	Inicio Caliente	0.0017	1.66	2.47	219.57	0.07	0.75	110	93.2
	Fuego lento	0.0002	1.1	0.7	35.17	0.03	3.03	119	97.4
	Inicio Frio	0.0053	11.17	4.48	323.50	0.12	3.45	107	93.5
9	Inicio Caliente	0.0122	4.47	4.83	359.25	0.25	1.24	110	93.2
	Fuego lento	0.0005	1.37	0.74	37.60	0.07	3.64	119	97.4
	Inicio Frio	0.0025	1.52	2.19	140.99	0.11	1.06	113	95.7
10	Inicio Caliente	0.0021	2.39	4.04	275.03	0.05	0.86	110	94
	Fuego lento	0.0004	1.17	0.71	39.06	0.06	2.90	116	97.6

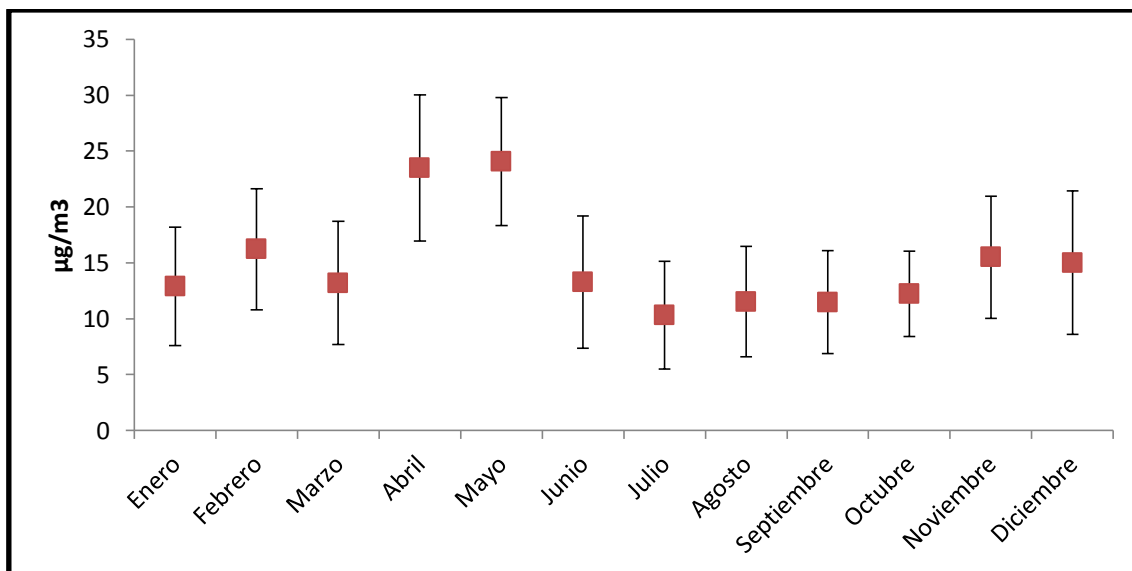
## Anexo B. Concentración ambiente de PM<sub>2.5</sub>.

Con el objetivo de determinar la concentración ambiente de PM<sub>2.5</sub>, y así conocer la concentración que puede estar presente en las cocinas de los usuarios; se presentan a continuación los datos de concentración del Observatorio Atmosférico de Morelia, el cual se encuentra en las instalaciones de la UNAM Campus Morelia. Con estos datos podría determinarse el aporte real de la concentración de PM<sub>2.5</sub> por el uso de una estufa eficiente de biomasa, mediante el uso del MCBM. O bien, la parametrización de esta variable para poder ser utilizada en el modelo.

**Tabla 12.** Concentración ambiente de PM<sub>2.5</sub> del Observatorio Atmosférico de Morelia, para el año 2016.

Mes	PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Desviación estándar (µg/m <sup>3</sup> )
Enero	13	5
Febrero	16	5
Marzo	13	6
Abril	23	7
Mayo	24	6
Junio	13	6
Julio	10	5
Agosto	12	5
Septiembre	11	5
Octubre	12	4
Noviembre	16	5
Diciembre	15	6

**Fuente:** Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA).



**Figura 50.** Gráfico de la concentración ambiente de PM<sub>2.5</sub> del Observatorio Atmosférico de Morelia, para el año 2016. Nota: Las barras de error representa la desviación estándar.

De acuerdo a los datos de la Tabla 12 y la Figura 50, se observa que el supuesto de concentración cero para el PM<sub>2.5</sub> que asume el MCBM pudiera ser incorrecto. Además de que dicha concentración presenta una variabilidad considerable dependiendo de la época del año; la cual puede estar sujeta a variables ambientales como: precipitación, erosión de suelos, velocidad del viento, vegetación, el tránsito vehicular y la presencia de puertos industriales, entre otros factores. Por lo que estas concentraciones ambientales y sus respectivas variaciones deben ser consideradas en futuros proyectos que utilicen el MCBM o modelos parecidos.



## **Anexo C. Método para el pesado de filtros.**

Para el uso de equipos y manejo de muestras se deben de seguir las siguientes indicaciones recomendadas por la EPA:

- El cuarto de pesaje debe ser un espacio limpio, libre de polvo y aislado de vibraciones.
- Previo al pesaje se realiza la limpieza de balanzas, pinzas, mesa de trabajo, que serán utilizados durante el pesaje.
- Asegurarse de que las balanzas se encuentren niveladas antes de ser encendidas. Una vez que se encienden las balanzas esperar un lapso de 5-10 minutos para que el peso en vacío se estabilice automáticamente.
- Se deben utilizar guantes de látex para el manejo de los filtros.
- Los filtros deben ser pesados antes de cada sesión de pesaje, para comparar el peso medido durante la sesión con las mediciones disponibles.
- La estática que puede estar presente en la superficie de los filtros, debe ser eliminada utilizando un desionizador sobre el filtro antes y después de cada serie de pesado.
- Los filtros, deben ser examinados en busca de defectos e irregularidades.
- Los filtros deben ser acondicionados en gabinetes desecadores durante al menos 24 horas antes de ser pesados para el pesaje inicial y final.
- Los filtros deben manejarse siempre con pinzas limpias para evitar la contaminación. Los filtros no deben ser invertidos (con la muestra hacia abajo).
- Los filtros deben ser pesados por el mismo operador.