



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS CONCENTRACIONES
INTRAMUROS DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO) Y MATERIAL
PARTICULADO (PM_{2.5}) PRODUCIDAS POR EL USO COMBINADO DE
DISTINTOS DISPOSITIVOS Y COMBUSTIBLES PARA SATISFACER
TAREAS DE COCCIÓN EN ZONAS RURALES DE MICHOACÁN:
SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN MODELO DE ZONA SIMPE
MEDIANTE ITERACIÓN MONTE-CARLO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A

P. I. Q. MARÍA DE LOURDES CINCO IZQUIERDO

ASESOR:

DR. MARCO ANTONIO MARTÍNEZ CINCO

CO-ASESOR:

DR. VÍCTOR MANUEL RUÍZ GARCÍA

MORELIA, MICHOACÁN, AGOSTO DE 2019



DEDICATORIA

A mis padres, Lourdes y Ariel.

AGRADECIMIENTOS

Institucionales

Agradezco en primer lugar a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y la Facultad de Ingeniería Química por brindarme mi formación como Ingeniero Químico, así como a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), y al Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES) por las facilidades brindadas para el desarrollo de esta investigación. También quiero agradecer a la Unidad de Ecotecnologías por el espacio de trabajo que me proporcionaron, al Laboratorio de Innovación y Evaluación de Estufas de Biomasa (LINEB) y al Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada por el apoyo para realizar la experimentación que sustenta esta tesis. También agradezco el apoyo del Fondo de Sustentabilidad Energética a través del proyecto SENER-CONACYT 2014-N°246911 Clúster de Biocombustibles Sólidos, L3 para la generación de Energía, por la maquinaria, equipos y los recursos económicos brindados para la culminación de este trabajo de tesis.

Quiero agradecer particularmente al Dr. Marco Antonio Martínez Cinco y al Dr. Víctor Manuel Ruíz García por la dirección de la tesis, por confiar en mí, por el apoyo otorgado durante esta investigación y por brindarme la oportunidad de colaborar en este proyecto, el cual fortaleció mi formación académica. Así como a los miembros de comité de revisión, al Dr. Omar Raúl Masera Cerutti, al Dr. Luis Fernando Lira Barragán y al Ing. Francisco Ramírez Cardos por aceptar ser parte del proceso de evaluación.

Agradezco al personal del IIES: de la Unidad de Tecnologías de la Información y Comunicaciones a 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; del Laboratorio de Bioenergía, al M.C. Rene D. Martínez Bravo y de la Unidad de Ecotecnologías a el M.C Alfredo Fuentes Gutiérrez, por su apoyo en facilitar vehículos, herramientas e insumos de papelería, al Dr. Víctor Berrueta Soriano por todo el apoyo y observaciones brindadas para la consolidación de este trabajo de tesis.

Agradezco al personal del LINEB, especialmente al Dr. Paulo César Medina Mendoza por el soporte técnico para el desarrollo de la experimentación, análisis de resultados y su aporte de datos utilizados en este trabajo, a la M. C. Sarafí Ramos Vargas, al M. C. Juan Carlos Vázquez Tinoco y al Ing. Dante Samuel Villanueva Peralta por todos sus aportes y apoyo técnico.

Personales

Agradezco infinitamente a mis padres María de Lourdes Izquierdo García y Ariel Cinco Valle quienes siempre me han brindado su apoyo y amor incondicional y me han enseñado a ser una persona responsable y alegre. A mis hermanos Daniela y Jair quienes han sido ejemplo en mi vida y me han motivado a nunca rendirme y esforzarme por alcanzar mis metas.

Por otra parte agradezco a mis amigos y compañeros de la Facultad de Ingeniería Química con los que compartí tantas noches de desvelo y estudio pero cuya compañía me ayudó a sobrellevar todo el proceso para la culminación de mi carrera. Pero en particular agradezco a mis amigos y amigas: Miryam, Anthony, Sandra, Leopoldo, Andrea, Oscar, Daniel, Stephanie, Isaac, Edgar, Arturo, Mauricio, Juan Manuel, Juan y Jorge Luis con los cuales compartí varios momentos de frustración, nerviosismo, angustia pero sobre todo mucha felicidad, gracias por todas las risas y los buenos momentos que me hicieron pasar; a mi novio Hirepan quien siempre me brindó su amor incondicional y sobre todo su paciencia en mis días de crisis.

Así mismo agradezco a todas aquellas personas de ECOTEC con las que inicié una relación profesional y que ahora considero mis amigos: Sarai, Jorge, Víctor, Juan Carlos, Dante, Paulo, Omar, Alfredo, Carolina, Ana Laura, Emilio, Belén y muchos otros, de quienes me llevo recuerdos inolvidables.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|------|
| DEDICATORIA..... | I |
| AGRADECIMIENTOS | II |
| ÍNDICE DE FIGURAS | VIII |
| ÍNDICE DE TABLAS | X |
| ÍNDICE DE ECUACIONES..... | XII |
| NOMENCLATURA | XIII |
| RESUMEN | XIV |
| ABSTRACT | XVI |
| CAPITULO I INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 GENERALIDADES..... | 1 |
| 1.2 OBJETIVO GENERAL | 2 |
| 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 3 |
| 1.4 JUSTIFICACIÓN | 3 |
| 1.5 HIPÓTESIS | 5 |
| CAPITULO II MARCO TEÓRICO..... | 6 |
| 2.1 BIOMASA..... | 6 |
| 2.1.1 Generalidades de la biomasa | 6 |
| 2.2 BIOENERGÍA..... | 7 |
| 2.2.1 Generalidades de la bioenergía..... | 7 |
| 2.2.2 Panorama de la bioenergía | 8 |
| 2.2.3 Biocombustibles..... | 9 |
| 2.2.4 Biocombustibles sólidos | 9 |
| 2.2.5 Proceso de combustión de los BCS | 10 |
| 2.3 IMPACTOS EN LA SALUD DE LAS EMISIONES AL INTERIOR | 12 |

| | | |
|-------------------------------|---|----|
| 2.3.1 | Dispositivos de cocción | 12 |
| 2.3.2 | Patrones de uso y consumo | 16 |
| 2.3.3 | Guías de calidad del aire | 18 |
| 2.3.4 | Emisiones | 18 |
| 2.3.5 | Estimación de las concentraciones intramuros..... | 19 |
| 2.3.6 | Modelo de zona simple..... | 21 |
| CAPITULO III METODOLOGÍA..... | | 22 |
| 3.1 | DISEÑO DEL TREN DE MUESTREO..... | 22 |
| 3.2 | CAMPAÑA DE MUESTREO EN CAMPO | 27 |
| 3.2.1 | Dispositivos evaluados | 27 |
| 3.2.2 | Ciclo de cocinado controlado (CBC)..... | 28 |
| 3.2.3 | Método del decaimiento del gas trazador | 32 |
| 3.2.4 | Medición de concentraciones intra – domiciliarias..... | 34 |
| 3.3 | ESTIMACIONES DE LAS CONCENTRACIONES INTRAMUROS MEDIANTE EL USO DEL MODELO DE ZONA SIMPLE | 36 |
| 3.3.1 | Parámetros de entrada | 36 |
| 3.3.2 | Parámetros de salida | 40 |
| 3.4 | ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN CAMPO Y EN SIMULACIÓN..... | 41 |
| CAPITULO IV RESULTADOS..... | | 42 |
| 4.1 | ESTIMACION DE CONCENTRACIONES INTRAMUROS MEDIANTE PRUEBAS DE CAMPO..... | 42 |
| 4.2 | ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIONES INTRAMUROS MEDIANTE EL MODELO DE ZONA SIMPLE | 45 |
| CONCLUSIONES..... | | 60 |
| RECOMENDACIONES | | 62 |

| | |
|--------------------|----|
| BIBLIOGRAFÍA | 63 |
| APÉNDICES..... | 69 |
| APÉNDICE A | 69 |
| APÉNDICE B | 73 |
| APÉNDICE C | 75 |
| APÉNDICE D | 79 |
| APÉNDICE E | 85 |
| APÉNDICE F..... | 86 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Proceso de combustión de biomasa y temperaturas de formación de cada una de sus cuatro etapas, (Fuente: Roth, 2014). | 12 |
| Figura 2. Estufa eficiente "Patsari" | 15 |
| Figura 3. Patrones promedio de uso de estufas y combustibles desde el 2005 hasta el 2012, Fuente: GIRA-UNAM, 2019. | 17 |
| Figura 4. Analizador de PM _{2.5} y CO intramuros. | 23 |
| Figura 5. Estación de monitoreo de ambiente. | 23 |
| Figura 6. Sistema gravimétrico para determinar PM _{2.5} intramuros..... | 24 |
| Figura 7. Bomba de succión..... | 24 |
| Figura 8. Medidor de <i>flujo primario</i> | 25 |
| Figura 9. Filtros de teflón con diámetro de 37 mm. | 25 |
| Figura 10. Tren de muestreo diseñado para realizar mediciones de PM _{2.5} y CO en campo. | 26 |
| Figura 11. Alimentos tradicionales incluidos en el CBC. | 29 |
| Figura 12. Cocina simulada en GIRA. | 34 |
| Figura 13. Instalación de los medidores intramuros de CO y PM _{2.5} al interior de la cocina simulada..... | 35 |
| Figura 14. Concentraciones promedio a 24 h de PM _{2.5} y CO para CBC y tareas individuales..... | 44 |
| Figura 15. Distribución de las concentraciones a 24 h de PM _{2.5} para la estufa Patsari, la estufa de gas LP y sus combinaciones con otros dispositivos. | 51 |
| Figura 16. Distribución de las concentraciones a 24 h de CO para la estufa Patsari, la estufa de gas LP y sus combinaciones con otros dispositivos. | 52 |
| Figura 17. Distribución de las concentraciones a 24 h de PM _{2.5} para el Fogón "U" y sus combinaciones con otros dispositivos..... | 53 |
| Figura 18. Distribución de las concentraciones a 24 h de CO para el Fogón "U" y sus combinaciones con otros dispositivos..... | 54 |

| | |
|--|----|
| Figura 19. Concentraciones a 24 h de PM _{2.5} y CO obtenida con el modelo de zona simple en mediciones de campo en diferentes tareas de cocción, dispositivos y combustibles. | 57 |
| Figura 20. Alimentos tradicionales realizados en el CBC. | 74 |
| Figura 21. Bosquejo de la distribución de los IAP dentro de la cocina. | 77 |
| Figura 22. Adecuación del protocolo de Berkeley 2005. | 78 |
| Figura 23. Masas estándar. | 79 |
| Figura 24. Filtros de 37 mm. | 80 |
| Figura 25. Micro balanza electrónica. | 81 |
| Figura 26. Neutralizador antiestática. | 81 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Guías de Calidad de aire interior de la Organización Mundial de la Salud. | 18 |
| Tabla 2. Diseño de la distribución de las tareas de cocción por dispositivo en uso individual y combinado. | 30 |
| Tabla 3. Concentraciones intramuros de PM _{2.5} en tareas de cocción para CBC, ambiente y 24h obtenidas en campo..... | 43 |
| Tabla 4. Concentraciones intramuros de CO en tareas de cocción para CBC, ambiente y 24h obtenidas en campo..... | 43 |
| Tabla 5. Parámetros de entrada al MSZ referentes a las condiciones de la cocina. | 46 |
| Tabla 6. Parámetros de entrada al MZS para dispositivos usados de manera individual durante el ciclo de cocción (CBC). | 46 |
| Tabla 7. Parámetros de entrada al MZS para las combinaciones de dispositivos y combustibles en el CBC. | 47 |
| Tabla 8. Parámetros de entrada al MZS para dispositivos usados de manera individual durante la tarea de recalentar. | 47 |
| Tabla 9. Resumen de las concentraciones dentro de la cocina simulada estimadas mediante el modelo de zona simple, así como el porcentaje de simulaciones que cumplen con las directrices de la OMS sobre calidad de aire para 3 modelo de estufas en uso individual combinado (stacking) para el ciclo de cocción (CBC). ... | 49 |
| Tabla 10. Resumen de las concentraciones estimadas utilizando el modelo de zona simple y el porcentaje de simulaciones que cumplen con las directrices de la OMS para 3 modelos de estufas, en forma individual para tareas incluidas en un ciclo. | 50 |
| Tabla 11. Comparación de la concentración promedio de Material Particulado y Monóxido de Carbono obtenido del modelo de zona simple vs la prueba de campo. | 56 |

| | |
|---|----|
| Tabla 12. Resultados del P - valor obtenidos mediante la prueba t para la diferencia de medias de las concentraciones de PM _{2.5} y CO en uso de dispositivos de cocción individual y combinado. | 58 |
| Tabla 13. Parámetros de entrada al MZS para estufas de gas LP durante la tarea de hacer tortillas. | 85 |
| Tabla 14. Parámetros de entrada al modelo para Patsari y Fogón "U" durante la tarea de Nixtamal y calentar agua para baño. | 85 |
| Tabla 15. Concentración promedio de PM _{2.5} y CO obtenidos en campo y simulación durante el CBC, empleados para la prueba t | 86 |
| Tabla 16. Concentración promedio de PM _{2.5} y CO obtenidos en campo y simulación durante tareas individuales, empleados para la prueba t | 87 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|--|----|
| Ecuación 1 Porcentaje de humedad en base húmeda..... | 32 |
| Ecuación 2 Tasa de intercambio de aire por hora..... | 33 |
| Ecuación 3 Modelo de Zona Simple..... | 37 |
| Ecuación 4 Fracción que representan las emisiones intra-domiciliarias respecto a la tasa de emisión total de cada contaminante..... | 38 |
| Ecuación 5 Tasa de emisión total | 38 |

NOMENCLATURA

ACH: Tasa de intercambio de aire por hora.

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

CBC: Ciclo de cocinado controlado.

CO: Monóxido de Carbono.

GIRA: Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada.

IAP: Contaminación del aire interior.

ICS: Estufas Eficientes de leña.

IEMS: Estación de monitoreo de ambiente.

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

LPG: Estufa de gas licuado de petróleo.

MZS: Modelo de Zona Simple.

OMS: Organización Mundial de la Salud.

PM: Material Particulado.

PM_{2.5}: Material Particulado de 2.5 micrómetros de diámetro aerodinámico.

REMBIO: Red Mexicana de Bioenergía.

STACKING: Término dado al uso combinado de los dispositivos de cocción.

TSF: Fuego abierto o fogón tradicional.

RESUMEN

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS CONCENTRACIONES INTRAMUROS DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO) Y MATERIAL PARTICULADO (PM_{2.5}) PRODUCIDAS POR EL USO COMBINADO DE DISTINTOS DISPOSITIVOS Y COMBUSTIBLES PARA SATISFACER TAREAS DE COCCIÓN EN ZONAS RURALES DE MICHOACÁN: SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN MODELO DE ZONA SIMPLE MEDIANTE ITERACIÓN MONTE - CARLO.

Este trabajo es uno de los primeros estudios que describe las necesidades energéticas en las comunidades rurales de la Meseta Purépecha en el periodo de 2005 a 2012 incluyendo el tipo de energía y tareas que satisfacen los usuarios. Se evaluaron las concentraciones intramuros experimental y analíticamente de Monóxido de Carbono (CO) y Material Particulado (PM_{2.5}) producidas debido a la combustión de tres tipos de estufas y cuatro tipos de stacking (uso combinado de los dispositivos) para satisfacer tareas de cocción en zonas rurales del estado de Michoacán. Las estufas evaluadas fueron la estufa tipo plancha Patsari, el fogón tradicional tipo “U” y una estufa de gas licuado de petróleo (LPG por sus siglas en inglés), los tipos de stacking evaluados fueron Patsari - Fogón “U”, Fogón “U” – LPG, Patsari – LPG y Patsari - Fogón “U” - LPG. Las estufas se evaluaron empleando un ciclo de cocinado controlado (CBC por sus siglas en inglés) en el cual se reprodujeron las prácticas de cocinado tradicional predominantes de la región Purépecha. El análisis se realizó considerando el CBC completo y para tareas individuales representativas de las comunidades rurales de la zona. Las pruebas se llevaron a cabo dentro de una cocina simulada con parámetros representativos de la región tales como el volumen y la tasa de intercambio de aire. Se calcularon las concentraciones mediante un modelo de zona simple propuesto por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para evaluar la calidad del aire interior. El modelo emplea iteración Monte - Carlo, fue parametrizado para la región de la Meseta Purépecha, así como validación con mediciones en campo.

Los resultados de las pruebas mostraron que el uso de manera individual de la Patsari y LPG y el stacking Patsari – LPG cumplen con los lineamientos propuestos por la OMS; el objetivo intermedio anual – 1 de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y con la guía de calidad del aire de $7 \text{ mg}/\text{m}^3$ para CO, con concentraciones de $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $2 \text{ mg}/\text{m}^3$, $17.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1 \text{ mg}/\text{m}^3$, $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $3 \text{ mg}/\text{m}^3$ respectivamente para el CBC. El fogón “U” y sus stacking con otras estufas mostraron concentraciones por arriba del objetivo intermedio anual – 1 para $\text{PM}_{2.5}$ de hasta $144 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual podría tener efectos nocivos para la salud de los usuarios. El fogón no cumple con los lineamientos de $\text{PM}_{2.5}$, a excepción de la tarea de recalentar que se considera una tarea de corta duración. Por otro lado todos los dispositivos cumplieron con el lineamiento para CO.

Respecto a la simulación el modelo fue capaz de predecir concentraciones dentro de los lineamientos de la OMS para CO y $\text{PM}_{2.5}$. Tales dispositivos fueron la estufa Patsari, LPG y el stacking Patsari – LPG con concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ de $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $20.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y concentraciones de CO de $2 \text{ mg}/\text{m}^3$, $0 \text{ mg}/\text{m}^3$ y $2 \text{ mg}/\text{m}^3$ respectivamente pero no es capaz de predecir las concentraciones para el fogón “U” y las combinaciones con otros dispositivos.

Palabras claves: Stacking, Patsari, LPG, Fogón “U”, IAP.

ABSTRACT

COMPARATIVE EVALUATION OF IN-DOOR CONCENTRATIONS OF CARBON MONOXIDE (CO) AND PARTICULATED MATERIAL (PM_{2.5}) PRODUCED BY THE USAGE OF DIFFERENT FUELS AND DEVICES TO SATISFY COOKING TASKS ON MICHOACAN RURAL ZONES: SIMULATION AND VALIDATION OF A SIMPLE ZONE MODEL THROUGH MONTECARLO ITERATION

This work is a pioneer study that shows the energetic needs of rural communities in the Purepecha plateau, in the period of 2005 to 2012 including the type of energy and tasks in order to satisfy the users. The indoor concentrations of CO and PM_{2.5} generated by the combustion of three types of stoves and four types of stacking (combined usage of devices) used to satisfy cooking tasks in Michoacan rural zones were experimental and analytically evaluated. The evaluated stoves were the Patsari stove type plate, "U" type and a LPG stove (Liquefied Petroleum Gas). The evaluated stacking combinations were: Patsari – "U" type, "U" type – LPG, Patsari – LPG and Patsari – "U" type - LPG. The stoves were evaluated using a Controlled Burning Cycle (CBC) by reproduction of cooking practices characteristics of Purepecha zone. The analysis was carried out considering a complete CBC and for representative tasks of rural communities of the zone. The tests were carried out inside a simulated kitchen with representative parameters for the zone such as volume and air exchange rate. The concentrations were calculated through a simple zone model proposed by the World Health Organization (WHO) that evaluates the indoor air quality, the model uses Monte - Carlo iteration and were parametrized for the Purepecha plateau as well as its validation with in-field measurements.

The results show that the individual usage of Patsari, LPG and the stacking Patsari – LPG comply with the guidelines proposed by the WHO; the interim target – 1.-35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for $\text{PM}_{2.5}$ and with air quality guideline 7 mg/m^3 for CO, with concentrations of 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2 mg/m^3 , 17.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1 mg/m^3 , 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and 3 mg/m^3 for the CBC. “U” type and their stackings showed concentrations above the interim target – 1 for $\text{PM}_{2.5}$ up to 144 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, which could have novice effects over users health, the “U” type does not comply with the $\text{PM}_{2.5}$ guideline with the exception of the task of reheating which is considered a short duration-time task. On the other hand, all the devices fulfilled the CO guidelines.

In the simulation the model was capable of predict concentrations within the WHO guidelines of CO and $\text{PM}_{2.5}$ for each device. Such devices were stove Patsari, LPG and the stacking Patsari - LPG with $\text{PM}_{2.5}$ concentrations of 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 20.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectively and CO concentrations of 2 mg/m^3 , 0 mg/m^3 and 2 mg/m^3 respectively. Otherwise, the model is not capable of predicting correctly concentrations for “U” type and their stackings.

Key words: Stacking, Patsari, LPG, Type “U”, IAP.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

El uso de energía en el hogar es una característica vital de la sociedad humana, en la actualidad aproximadamente 2.4 mil millones de personas principalmente en países emergentes aún dependen de combustibles sólidos (madera, carbón vegetal, residuos agrícolas y carbón) (Ruiz-Mercado, Masera Cerutti, Zamora, & Smith, 2011). El consumo de energía en los hogares rurales de México es una de las necesidades básicas dentro de las cuales la cocción de alimentos es la más importante (Berrueta et al., 2008). Dicho consumo de energía en el sector residencial está relacionado con impactos al ambiente y a la salud.

Se estima que en México aproximadamente 28 millones de habitantes cocinan sus alimentos en empleando biocombustibles sólidos, específicamente leña de los cuales 90% viven en el medio rural (Berrueta V. , Serrano-Medrano, García Bustamante, Astier, & Masera, 2017), éstos biocombustibles son utilizados en dispositivos tradicionales muy poco eficientes para satisfacer tareas de cocción y calefacción. Del total de usuarios de leña, 19 millones de habitantes usan este energético como combustible único para cocinar (INEGI, 2007) y 9 millones la usan en combinación con gas licuado de petróleo (LPG, por sus siglas en inglés) (Masera, Díaz, & Berrueta, 2005). El acceso a la energía limpia es una de las metas globales actuales, incluso existen fuertes impulsos hacia el LPG para desplazar el uso de fuegos abiertos (TSF, por sus siglas en inglés) lamentablemente estos no han sido del todo exitosos, por lo cual existe una necesidad de buscar la mejor estrategia para reducir los impactos a la salud de los usuarios de biomasa quienes usualmente se encuentran en las zonas más marginadas.

La combustión de leña en fuegos abiertos en interiores pese a su versatilidad y bajo costo conduce a concentraciones de contaminantes del aire en interiores muy superiores a los estándares internacionales de calidad del aire establecidos por la

Organización Mundial de la Salud (OMS), lo cual impacta directamente a la salud de los usuarios, especialmente en mujeres y niños expuestos al humo, debido a que éstos son quienes presentan una exposición diaria de entre tres y siete horas. Existen diversas afectaciones tales como infecciones respiratorias agudas, enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), cáncer de pulmón, enfermedades cardiovasculares, asma, otros tipos de cáncer, déficit del desarrollo cognitivo, bajo peso al nacer entre otras, de igual manera se agregan a esto la cantidad de accidentes por quemaduras y enfermedades en los ojos (Medina M. P., 2017) por lo que el tema de la contaminación del aire en los hogares se ha vuelto un tema de interés mundial, solo en 2016, no menos de 3.8 millones de niños y adultos murieron prematuramente por enfermedades causadas por la contaminación del aire en el hogar, según estimaciones de la Organización Mundial de la Salud. En un esfuerzo para contrarrestar los efectos nocivos a la salud la Organización Mundial de la Salud desarrolló las guías de calidad del aire referentes al Material Particulado ($PM_{2.5}$) y al Monóxido de Carbono (CO), éstas guías tienen como fin el garantizar un ambiente limpio en y los alrededores del hogar, se basan en las Guías de Calidad del Aire (AQG por sus siglas en inglés) de la OMS existentes para la contaminación del aire interior (OMS, 2006) y el volumen del AQG del 2010 para contaminantes selectos (OMS, 2010).

1.2 OBJETIVO GENERAL

Evaluar las concentraciones intramuros de Monóxido de Carbono (CO) y Material Particulado de 2.5 micrómetros de diámetro ($PM_{2.5}$) producidas por el uso combinado de distintos dispositivos y combustibles para satisfacer tareas de cocción en zonas rurales de Michoacán: simulación y validación de un modelo de zona simple mediante iteración Monte - Carlo.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Diseñar el tren de muestreo para medición de concentraciones intramuros de CO y PM_{2.5}.
- II. Realizar una campaña de muestreo en campo para medir las concentraciones intramuros del uso combinado y exclusivo de tres dispositivos de cocción: fogón tipo “U”, estufa Patsari y estufa de gas LP.
- III. Establecer los parámetros de entrada al modelo de zona simple: Tasa de emisión intramuros de CO, y PM_{2.5} en una estufa Patsari, un fogón tradicional tipo “U” y una estufa de GLP, tasa de intercambio de aire, volumen del cuarto de cocinado y tiempos de cocción de los dispositivos
- IV. Realizar simulaciones usando el modelo de zona simple con iteración Monte – Carlo para estimar las concentraciones intramuros de los diferentes escenarios de stacking y validar **estadísticamente** el modelo con las concentraciones medidas en campo.

1.4 JUSTIFICACIÓN

En el mundo la mitad de la población usa biomasa mientras que en México aproximadamente 28 millones de personas (Medina, y otros, 2017), ésta población se localiza en las zonas más vulnerables y marginadas. El uso de esta biomasa se utiliza para satisfacer necesidades básicas como la cocción y calefacción, lamentablemente su uso es en fuegos abiertos (poco eficientes y con bajas eficiencias de combustión) dentro de los hogares lo que afecta a la salud de las familias de diversas maneras. Una consecuencia por el uso de estos es la contaminación del aire dentro del hogar causada por la combustión incompleta. Para el año 2012 la OMS estimó que cerca de 3 mil millones de personas en su mayoría con ingresos bajos carecían de acceso a energía limpia y que aproximadamente hubo 4.3 millones de muertes prematuras debido a tareas de cocción en dispositivos ineficientes por lo que ésta situación se ha convertido en una de las metas mundiales (Séptimo Objetivo de Desarrollo Sustentable (ODS))

para mejorar la calidad de vida de los usuarios y tener acceso universal a energías limpias (Gold estándar).

Actualmente existe poco conocimiento acerca de los impactos y beneficios de las estufas tipo plancha, las cuales han sido ampliamente difundidas en Latinoamérica, en relación a su contribución de emisiones intramuros dentro de las cocinas de los hogares rurales. Diversos estudios para conocer las concentraciones intramuros generadas por este tipo combustibles están enfocados únicamente al uso exclusivo de un dispositivo y combustible, pero se desconoce lo que sucede en escenarios más reales donde se utiliza una gama combinada de combustibles y dispositivos.

El stacking es una práctica que ha alcanzado auge en la comunidad rural con la finalidad de hacer una disminución en el impacto de la economía familiar. Actualmente no se cuenta con información suficiente acerca de la contribución de emisiones contaminantes de éstos dispositivos dentro de los hogares rurales, por lo que existe la creciente necesidad de conocer los impactos de estos contaminantes (CO, y PM_{2.5}). El conocer la contribución del stacking en términos de contaminación intramuros aportará información sobre la implementación de dispositivos en programas gubernamentales destinados a las comunidades rurales. El presente trabajo de tesis representa la primera investigación en su tipo en cuanto a la determinación de los impactos de contaminantes intramuros asociados a diferentes tipos de stacking de estufas y combustibles durante un ciclo de cocinado tradicional de la región Purépecha de Michoacán, y su importancia radica en que proporciona información para comenzar a entender dos problemáticas de nivel mundial, como lo es el acceso universal a energías limpias y la disminución de contaminantes intramuros.

1.5 HIPÓTESIS

El uso combinado de estufas de leña y de gas LP cumplen con los lineamientos de contaminación intramuros de la OMS, el uso de un modelo de zona simple puede predecir este tipo de concentraciones que pueden ser validadas en campo con parámetros que reflejan las condiciones de las zonas rurales de Michoacán (tiempo de uso de dispositivos, tasa de ventilación y tamaño de las viviendas).

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 BIOMASA

2.1.1 Generalidades de la biomasa

La biomasa se define como toda materia orgánica que almacena energía proveniente de la luz solar mediante enlaces químicos entre moléculas de carbono, hidrógeno y oxígeno (McKendry, 2002), presenta un potencial real para elevar la seguridad energética en regiones sin abundantes reservas de combustibles fósiles y para reducir las emisiones netas de carbono a la atmósfera por unidad de energía suministrada (Field, Campbell , & Lobell, 2008). Actualmente la biomasa contribuye alrededor del 13% en la matriz de energía primaria y sigue siendo la fuente de energía renovable mayormente utilizada. Entre los diferentes tipos de biomasa podemos distinguir a los siguientes:

- Biomasa natural: es aquella que se genera en los ecosistemas naturales, sin ningún tipo de intervención por parte del ser humano, leña es un ejemplo de este tipo de biomasa.
- Biomasa residual: es generada a partir de la actividad humana, principalmente en los procesos agrícolas, ganaderos y los propios del hombre, como basuras y aguas residuales. Incluye los residuos forestales, agrícolas, sólidos urbanos y biodegradables.
- Biomasa producida o cultivos energéticos: es la biomasa cultivada con el propósito de obtener biomasa transformable en combustible como por ejemplo la caña de azúcar. Este tipo de cultivos se caracterizan por tener una gran producción de materia viva por unidad de tiempo y por permitir minimizar los cuidados al cultivo.

La biomasa cuenta con la gran versatilidad de que a partir de ella es posible obtener biocombustibles líquidos, sólidos y gaseosos, al utilizarla como combustible en cualquiera de sus formas (sólida, líquida o gaseosa), se emite bióxido de carbono, agua y se desprende para su aprovechamiento la energía química almacenada como energía térmica y eléctrica (Rincón Martínez & Silva Lora, 2015). En este sentido la combustión de biomasa es la ruta principal de tecnología para la conversión a bioenergía, la cual es responsable del más del 90% de la contribución mundial a la bioenergía (Koppejan & Loo, 2008).

2.2 BIOENERGÍA

2.2.1 Generalidades de la bioenergía

La bioenergía es la energía obtenida de la biomasa, que es la materia constitutiva de los seres vivos, sus excretas y sus restos no vivos (García Bustamante & Masera Cerutti, 2016). La bioenergía presenta varias ventajas en comparación con otras fuentes de energía renovable (REMBIO, 2011):

- Es versátil, lo que permite satisfacer la mayor parte de los usos finales de la energía ya que puede brindar calor, electricidad en forma de combustibles sólidos, gaseosos y líquidos.
- Es almacenable, lo que complementa la intermitencia de otras fuentes de energía renovable y presenta ventajas para aplicaciones de calor y producción de electricidad.
- Es escalable, lo que permite desarrollar sistemas de suministro energético a nivel hogar y a escala mayores, con alcances locales, regionales, nacionales y hasta globales.
- Es comercialmente madura, porque muchas de las tecnologías para su producción están disponibles en el mercado.

2.2.2 Panorama de la bioenergía

Los problemas sociopolíticos, de salud y ambientales (particularmente el problema del cambio climático global) asociados al uso de combustibles fósiles ha generado en los países la necesidad de una transición energética, donde una parte crucial corresponde a las fuentes de energía renovable, entre la cual destaca la bioenergía (García Bustamante & Masera Cerutti, 2016). Hoy en día, las fuentes de energía renovable proveen alrededor del 10% de la demanda de energía final, de la cual, la bioenergía es la fuente principal con una oferta de 55.6 EJ/año o el 47% del total de energía renovable (REN21, 2014). El 67% de la bioenergía se utiliza en el sector residencial y en usos tradicionales (cocción de alimentos en zonas rurales y periurbanas empleando leña, residuos agrícolas y estiércol. El 33% se usa con tecnologías modernas (incluyendo 23% para generación de calor) y el 10% remanente se divide entre biocombustibles líquidos y generación eléctrica (REN21, 2014).

La bioenergía tiene un potencial energético muy importante en México, que alcanza dos terceras partes del consumo de energía final del país (García Bustamante & Masera Cerutti, 2016), su participación actual en la oferta de energía primaria del país es del 4.2% del total, y 60% de la proveniente de fuentes renovables (SENER , 2014).

En México los recursos renovables presentan potencial de ser una pieza fundamental en el sistema energético sustentable, alrededor de $\frac{3}{4}$ partes de las publicaciones de investigación se han basado en el uso de la biomasa como energía renovable seguida por la energía solar, geotérmica, eólica y la energía hidroeléctrica, estos estudios indican que la producción de energía a partir de biomasa ha tenido un crecimiento exponencial en los últimos 30 años.

2.2.3 Biocombustibles

Los biocombustibles se obtienen a partir de la biomasa, con mayor o menor grado de procesamiento, entre estos últimos se distingue a (García Bustamante & Masera Cerutti, 2016):

- Biocombustibles sólidos (leña, carbón vegetal, residuos agrícolas, residuos forestales, pellets, briquetas): pueden quemarse directamente o previa gasificación o pirolisis, para producir calor y electricidad.
- Biocombustibles líquidos (bioetanol, biodiésel y bioturbosina): obtenidos de cultivos energéticos como caña de azúcar y oleaginosas o de aceite vegetal usado, grasas animales y otras fuentes.
- Biocombustibles gaseosos (biogás, biometano): obtenidos de los residuos municipales y estiércol; pueden generar calor y electricidad, localmente y en sistemas interconectados

2.2.4 Biocombustibles sólidos

Los biocombustibles sólidos (BCS) son vectores energéticos obtenidos de la biomasa, con mayores o menores grados de transformación física o química, que se mantienen en estado sólido hasta su uso final.

Entre ellos se encuentran: La leña (el bioenergético más utilizado por el hombre en la actualidad), las astillas de madera, los pellets de madera (el BCS de mayor comercio global actual), los pellets y briquetas de residuos forestales y agrícolas y el carbón vegetal (García Bustamante & Masera Cerutti, 2016).

Los BCS en particular presentan diversas ventajas desde el punto de versatilidad tecnológica, factibilidad económica, disponibilidad de recursos y una eficiencia competitiva para la generación de energía térmica y eléctrica, y son los que presentan mayores potenciales para el desarrollo de la

bioenergía, en las últimas tres o cuatro décadas los BCS han recibido creciente atención como alternativas de bioenergía en diferentes aplicaciones, dentro del contexto de la transición energética global (García Bustamante & Masera Cerutti, 2016)

En México aproximadamente 28 millones de personas utilizan biomasa, específicamente leña como combustible para la satisfacción de necesidades energéticas (Serrano-Medrano, Arias-Chalico, Guilardi, & Masera, 2014), (Berrueta V. , Serrano-Medrano, García Bustamante, Astier, & Masera, 2017). México consume aproximadamente 18 millones de toneladas de materia seca de leña (tMSL) (Masera, Arias , Ghilardi, Guerrero, & Patiño , 2010) en 2010 la leña representó el 41% de la demanda total de energía en el sector residencial. Los principales municipios consumidores de leña en el país cuentan con una característica en común; y es que son los que se ubican con los menores ingresos y aún se encuentran en vías de desarrollo, en ellos las familias llegan a destinar hasta el 25% de sus ingresos mensuales para la compra de leña.

La leña cumple una función de gran importancia en el consumo doméstico de energía a nivel rural debido a su obtención y manutención sobre una base de rendimiento sostenido, su importancia radica en que se encuentra disponible en el entorno inmediato, su transporte depende fundamentalmente de energía humana y animal y puede ser almacenada largo tiempo, éstas características permiten definirla como un combustible local y autónomo que no está vinculado a las redes hegemónicas y dominantes de los energéticos nacionales o internacionales (CFE, PEMEX o petroleras transnacionales) y posee gran importancia cultural e histórica (Quiroz Carranza & Cantú, 2012).

2.&) Proceso de combustión de los BCS

La reacción de combustión se basa en la reacción química exotérmica de una sustancia llamada combustible con el oxígeno. El comburente o el agente que aporta dicho oxígeno en la reacción de combustión y la fuente

usual y económica es el aire. Si la reacción se efectúa a temperaturas suficientemente altas, con un suministro adecuado de O_2 mezclado con el combustible y en un tiempo de residencia suficiente de los componentes del combustible, se originarán sustancias gaseosas tales como CO_2 y H_2O , lo que indica que la reacción se efectuó de manera completa, al contrario si existe una mezcla inadecuada del aire de combustión y el combustible, temperaturas muy bajas y tiempos de residencia cortos se originarán sustancias gaseosas como CO_2 , H_2O , CO , CH_4 , PM , OC , por lo que la reacción se efectuó de manera incompleta.

Existen 4 etapas que describen el proceso de combustión de biomasa (Roth, 2014):

1. *Secado*: La biomasa se calienta y se aproxima a $100^\circ C$, 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 mayor a $300^\circ C$, la pirólisis de la biomasa comienza (ruptura mediante altas temperaturas). El incremento de temperatura eventualmente ocasiona una conversión completa de la biomasa en vapores volátiles y un residuo sólido llamado carbón residual (el cual se compone de carbono puro). El gas de pirólisis se puede utilizar para la producción de calor o generación de energía o sintetizarse para producir metanol o amonio.
3. *Gasificación*: Esta etapa se lleva a cabo en la fase sólida del combustible. Aproximadamente a $600^\circ C$ los gases volátiles se queman en presencia de un agente de oxidación (oxígeno vía de aire primario); a esta temperatura ocurre la gasificación del carbón residual, el oxígeno reacciona con el carbón residual sólido en la cama de combustible, creando monóxido de carbono el cual se adiciona a la nube del gas de leña de los gases volátiles.

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 previa de gasificación reaccionan con el oxígeno, proporcionado vía aire secundario para completar el proceso de combustión

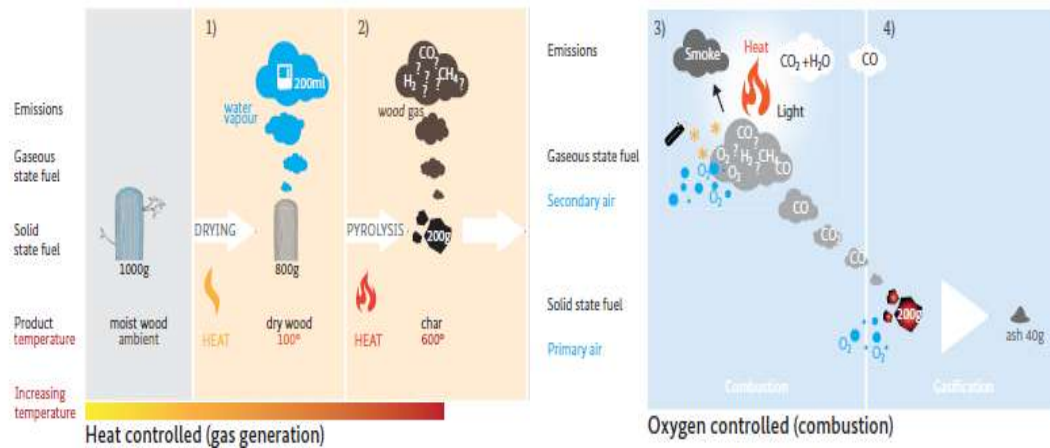


Figura 1. Proceso de combustión de biomasa y temperaturas de formación de cada una de sus cuatro etapas, (Fuente: Roth, 2014).

2.3 IMPACTOS EN LA SALUD DE LAS EMISIONES AL INTERIOR

2.3.1 Dispositivos de cocción

Durante miles de años el hombre ha aprovechado el fuego para calentarse, iluminarse y preparar sus alimentos en dispositivos llamados fogones (Cumana, Gutiérrez, Miranda, Masera, & Tavera, 2013), los más comúnmente utilizados son el fogón semicerrado o tipo “U” y el fogón abierto o de tres pierdas. El uso del fogón tradicional pese a ser versátil tiene implicaciones en la salud de alto impacto debido a la contaminación del aire dentro de los hogares de los usuarios a causa de la combustión incompleta de combustibles. En el fogón abierto la concentración de material particulado (PM) supera con creces las medidas por las normas internacionales, se han realizado mediciones en espacios cerrados y encontrado concentraciones de PM₁₀ de hasta 30000 µg/m³, siendo el límite

permisible de 300 a 3000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ al día, de igual manera impacta negativamente a bosques debido a que requieren de una gran cantidad de combustible (leña) para funcionar. Para resolver ésta problemática se han introducido las estufas eficientes de leña (ICS por sus siglas en inglés).

Las estufas eficientes de leña se definen como tecnologías que optimizan la eficiencia energética y el proceso de combustión con la finalidad de reducir el consumo de combustibles y emisiones contaminantes en relación a los fogones y estufas tradicionales. Las principales ventajas de una estufa eficiente son que mejora la combustión por lo que aprovecha mejor el calor de la misma, envía el humo y los gases de combustión fuera del hogar (si cuenta con chimenea), con lo que evita riesgos de enfermedades respiratorias y mejora la calidad de vida de los usuarios y familias (Cumana, Gutiérrez, Miranda, Masera, & Tavera, 2013).

Se han realizado diversas mejoras en estos dispositivos a lo largo del tiempo con la finalidad de mejorar la eficiencia energética y de mejorar el proceso de combustión. La “primera generación” de estufas de biomasa surge en el año de 1940. Los primeros diseños tenían chimeneas y cámaras de combustión cerradas, diseños posteriores ya contaban con rejillas, aislamiento, flujo de aire forzado y eran fabricadas con materiales más durables por lo que se conseguía una combustión más limpia.

Tiempo después aparece la “segunda generación” de estufas mejoradas con principios de diseño ingenieril para la conservación de la energía, las cuales contenían mejoras en la transferencia de calor. Los nuevos diseños contaban de un tiro natural y forzado, uso de gasificadores para mejorar la eficiencia de combustión debido a la regulación de calor y el control de suministro de aire. Las estufas mejoradas pueden satisfacer tareas de cocción y o calefacción con una menor cantidad de biomasa en comparación que una estufa tradicional y consecuentemente producir una cantidad menor de emisiones, son tecnologías más limpias, más eficientes, de última generación que siguen las prácticas tradicionales de los usuarios.

En la actualidad los programas de difusión de estufas se han implementado en países emergentes, esto como una alternativa para mejorar la calidad de vida de las familias en términos de salud y economía.

Las estufas tipo plancha han sido ampliamente difundidas en México debido a que se adaptan a las costumbres locales de cocinado y son muy aceptadas en las comunidades locales (REMBIO, 2011). Entre 2007 y 2012 un total de más de 600,000 estufas tipo plancha fueron distribuidas mayoritariamente a través del Programa Nacional de Estufas de Leña, de los modelos mayormente difundidos en nuestro país destacan las siguientes estufas: Patsari, Patsari Portátil, ONIL, Mera-Mera y Ecostufa.

La estufa eficiente de leña Patsari (“la que protege”, en lengua purépecha) ha sido difundida desde el año 2003 por el Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada A.C. (GIRA) en colaboración con el Centro de Investigaciones en ecosistemas (CIECO), UNAM, como una medida para reducir impactos nocivos a la salud y al ambiente, fomentar el uso sustentable de la leña en México y mejorar así la calidad de vida de las familias rurales, la estufa se compone de una cámara de combustión amplia, un comal principal tortillero y dos comales secundarios que se pueden emplear para calentar agua para baño o para mantener los alimentos calientes (Cumana, Gutiérrez, Miranda, Masera, & Tavera, 2013).

Otro tipo de tecnologías recientes son las estufas de gases las cuales utilizan combustible fósil, producen bajas emisiones pero el costo del combustible es muy alto y por lo tanto difícil de costear, otra limitante es que hay lugares donde no se tiene el acceso al combustible y aunque existan subsidios gubernamentales para su distribución y manutención éstos no se encuentran bien regulados. En el estudio de seguimiento realizado por (Yadavar, 2019) para comunidades en la India donde bajo un plan gubernamental se buscó la promoción de combustibles para una cocción más “limpia” se encontró que además de las razones financieras que implican mantener un cilindro de gas existen factores culturales para no

abandonar las prácticas de cocinado en dispositivos ineficientes tales como; que la mayoría de la población consideran que los alimentos en estufas tradicionales son “más saludables” y “sabrosos”, el arraigo en los sesgos de género, es decir los riesgos de la salud a los que se enfrentan las mujeres por el uso de combustibles sólidos tienden a ser ignorados y la falta de información, hacia las usuarias; no se les enseña a usar cilindros de gas LP lo cual conlleva a preocupaciones tales como que el cilindro pudiese explotar. Debido a todos estos factores es de suma importancia buscar opciones energéticas,



Figura 2. Estufa eficiente "Patsari"

2.3.2 Patrones de uso y consumo

En el estudio realizado por GIRA UNAM (2019), se recopiló información retrospectiva desde 2005 hasta 2012, en donde se exploraron eventos relevantes sobre las prácticas de cocinado en comunidades rurales, las cuales están fuertemente influenciadas por los cambios tecnológicos. Un total de 257 de hogares rurales se analizaron entre 2005 y 2012 para identificar cuáles son principales tareas de cocina, así como los patrones de uso de las estufas.

La Figura 3 reporta sobre siete patrones principales de uso de estufas y que las comunidades rurales de la región de Purépecha usan sus dispositivos de cocina en forma de stacking (de forma combinada), con un 45% en 112 hogares. Se observa que el uso individual de estufas no es muy común, mientras que el uso del fogón tradicional representó el 37% en 93 casas, la estufa Patsari solo con el 17% en 42 casas. El caso más dramático fue el GLP individual con tan solo el 1% del total de viviendas. El stacking principal de estufas fue Patsari-TSF (fuego de tres piedras) como también reporta (Ruiz-Mercado, Maserá, Zamora, & Smith, 2011) que representó el 37%.

Las principales tareas de cocción identificadas fueron hacer tortillas, hervir frijoles, comidas fritas y recalentar en la estufa Patsari. El TSF sólo se utiliza para tareas de mayor duración tales como hervir frijoles, hacer nixtamal y para calentar agua para el baño. El resto de stacking tuvo poca presencia: Patsari-GLP (N = 6), TSF-GLP (N = 8) y Patsari-TSF-GLP (N=6).

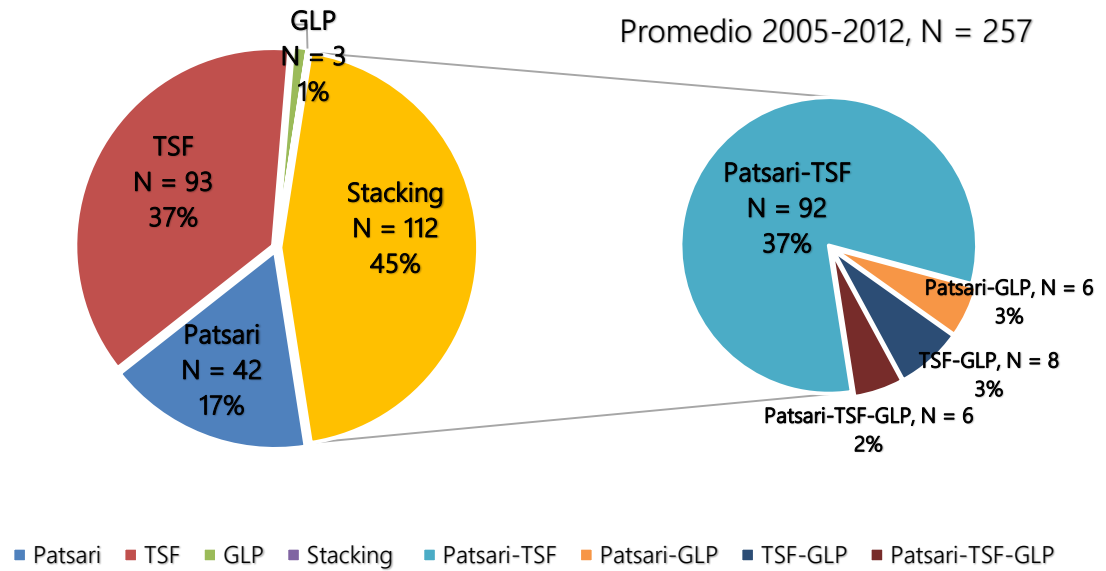


Figura 3. Patrones promedio de uso de estufas y combustibles desde el 2005 hasta el 2012, Fuente: GIRA-UNAM, 2019.

2.3.3 Guías de calidad del aire

En un esfuerzo para contrarrestar los efectos nocivos a la salud la Organización Mundial de la Salud ha desarrollado las guías de calidad del aire referentes al PM_{2.5} y al CO, con la finalidad de garantizar un ambiente limpio en y los alrededores del hogar, se basan en las AQG de la OMS existentes para la contaminación del aire interior (OMS, 2006) y el volumen del AQG del 2010 para contaminantes selectos (OMS, 2010).

Tabla 1. Guías de Calidad de aire interior de la Organización Mundial de la Salud.

| Material particulado de 2.5 micrómetros de diámetro (PM_{2.5}) | | |
|---|--|---|
| | Concentración promedio anual ($\mu\text{g m}^{-3}$) | Concentración promedio 24 h ($\mu\text{g m}^{-3}$) |
| Objetivo Intermedio/parcial 1 | 35 | 75 |
| Objetivo Intermedio/parcial 2 | 25 | 50 |
| Objetivo Intermedio/parcial 3 | 15 | 37.5 |
| Guía de calidad del Aire (AQG) | 10 | 25 |
| Monóxido de carbono (CO) | | |
| Tiempo promedio | Concentración promedio (mg m^{-3}) | |
| 15 (min) | 100 | |
| 1 (h) | 35 | |
| 8 (h) | 10 | |
| 24 (h) | 7 | |

(Fuente: OMS, 2006 y 2010).

2.3.4 Emisiones

Las emisiones totales se definen como las emisiones producidas por la combustión y que son emitidas al ambiente, estas emisiones incluyen las emisiones totales producidas por cualquier dispositivo. Estas incluyen a las emisiones en la chimenea y a las intramuros. Las emisiones fugitivas o intramuros se definen como las emisiones producidas por la combustión, estas incluyen solo a las emisiones que se fugan hacia el interior del cuarto de cocinado. Estas emisiones fugitivas pueden provenir de la cámara de combustión, de imperfecciones del dispositivo o, del mal diseño y funcionamiento de la chimenea (Ruíz García, 2018).

2.3.5 Estimación de las concentraciones intramuros

Se han realizado estudios previos para conocer el impacto real a la salud que pueden brindar las estufas eficientes (ICS) así como obtener beneficios en la economía familiar; el realizado por (Tinoco, 2017) en el cual se determinó las emisiones intradomiciliarias de CO y PM_{2.5} producidas por el uso de la estufa tipo plancha “Patsari” empleando el protocolo de ebullición de agua (WBT, por sus siglas en inglés) se obtuvo que ésta estufa presenta una fracción de emisiones intradomiciliaria de $0.12 \pm 0.07\%$ para CO y $2.7 \pm 1.97\%$ para PM_{2.5}, éstas cifras fueron mucho menores a las reportadas en la literatura por lo que los impactos a la salud son menores en comparación a los fuegos abiertos, el estudio realizado por (Medina, y otros, 2017) el cual tenía como objetivo medir la contribución de emisiones de CO y PM_{2.5}, el rendimiento de las ICS en comparación con las estufas tradicionales empleando los protocolos de ebullición de agua (WBT) y el ciclo de cocinado controlado (CCT, por sus siglas en inglés) demostró una reducción significativa de las emisiones en comparación con el fogón tradicional de tres piedras al igual que en consumos energéticos. El estudio realizado por (Ruíz García, 2018) en el cual se midieron las emisiones fugitivas de cuatro estufas tipo plancha (Patsari, ONIL, Ecostufa y Mera-Mera) difundidas en México se obtuvo como resultado que las concentraciones promedio dentro de la cocina resultante de las emisiones fueron $15 \pm 9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{2.5} y $0.06 \pm 0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para CO y que de acuerdo a esto las cuatro estufas cumplían con los estándares de referencia de las guías de calidad del aire de la OMS (AQG) por lo que su uso mitiga los efectos adversos a la salud de sus usuarios.

Actualmente la OMS realiza esfuerzos para el desarrollo de modelos que puedan predecir las concentraciones intramuros en espacios donde se encuentren dispositivos que emitan contaminantes (Ruíz García, 2018). Cada uno de estos combina la tasa de emisión de contaminantes (en términos de masa) dentro de una habitación (por ejemplo la cocina) con modelos matemáticos de transporte de contaminantes, éstos tipos de

modelos van desde construcciones simples hasta simulaciones complejas basadas en computadora, y todos tienen la capacidad de proporcionar estimaciones de concentración en interiores donde exista el uso de dispositivos de uso final, éstos modelos son (OMS, 2014):

1. **Modelo de zona simple:** supone que el contaminante emitido en el aire de la habitación se mezcla uniformemente en todo el espacio. La concentración está determinada por la tasa de emisión y una serie de factores que pueden incorporarse al modelo, como lo es la duración de la combustión, el volumen de las instalaciones y la tasa de intercambio de aire.
2. **Modelo de tres zonas:** divide la habitación en tres zonas, 1) Donde una pluma es levantada sobre el dispositivo de combustión; 2) Aire caliente/tibio a una distancia dada del techo y 3) El resto de la habitación, por lo que se supone que se produce una mezcla uniforme en cada zona. En otros aspectos, este enfoque es similar al modelo de zona simple.
3. **Simulación computacional de dinámica de fluido:** considera las fuerzas involucradas en la determinación del transporte de aire y contaminantes dentro de una habitación, al dividir el espacio en un gran número (o muy grande) de unidades pequeñas, y al desarrollar ecuaciones que incorporan el impulso, la energía térmica y la conservación de masa para determinar las concentraciones de contaminantes atmosféricos resultantes.

Dichos modelos asumen diferentes escenarios de acuerdo al dispositivo de uso final usado.

2.3.6 Modelo de zona simple

El modelo de zona simple predice las concentraciones dentro del cuarto en función de las emisiones de los dispositivos (tasas de emisión y tiempo de uso) y las características de la cocina (volumen y tasa de intercambio de aire). Las concentraciones de los contaminantes son modeladas suponiendo una mezcla instantánea con cero flujo de retorno a la habitación, que la eliminación del contaminante del aire está dominado por la ventilación y que los mecanismos de pérdida competitiva son insignificantes (por ejemplo, reacciones superficiales, sedimentación de partículas) (Johnson, Lam, Brant, Gray, & Pennise, 2011)

Este modelo ha sido aplicado en el sector residencial rural para conocer la calidad del aire. El modelo debe tener en cuenta una amplia variación en relación a las variables de entrada (es decir, tamaño de la habitación, tasa de intercambio de aire, duración del uso del dispositivo y la tasa de emisión) los cuales determinan la concentración del área (OMS, 2014). Éstas variables se incorporan utilizando un rango de valores derivados en una simulación Monte Carlo en el cual conociendo la variabilidad o el comportamiento de cada una de las variables de entrada y sus valores promedio calcula aleatoriamente el resultado final de las concentraciones de los contaminantes, realizando las iteraciones deseadas, es decir se obtendrá una distribución de los resultados predicha por variabilidad de los datos de entrada al modelo.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1 DISEÑO DEL TREN DE MUESTREO

El tren de muestreo para determinar las concentraciones intra – domiciliarias a 24 horas de PM_{2.5} y CO utilizado en ésta investigación fue diseñado bajo los parámetros estándar de la norma ISO 19867 – 1 (2018). El tren constaba de un sensor óptico y un sistema gravimétrico, y el Laboratorio de Innovación y Evaluación en Estufas de Biomasa (LINEB) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) proporcionó el equipo necesario para llevar a cabo ésta investigación, dicho equipo es descrito a continuación:

Método óptico

- Analizador de contaminantes IAP meter (*by Aprovecho Research*) (ver Figura 5): el equipo registra la concentración de monóxido de carbono mediante un sensor infrarrojo no dispersivo (NDIR) el cual se calibra con un gas estándar de 500 ppm, el sensor tiene una repetibilidad del 2%, resolución de 1 ppm, un rango de 0 – 1000 ppm y un tiempo de respuesta de T90 = 30 segundos, mientras que el *Material Particulado* se determina por el método óptico empleando un fotómetro de láser de dispersión (scattering, término utilizado en inglés), con una resolución de 1 µg/ m³, un rango de 0 – 60,000 µg/ m³ y un tiempo de respuesta de 1 segundo Ambos contaminantes se miden en tiempo real en intervalos de 9 segundos (Aprovecho Research Center, 2013).



Figura 4. Analizador de PM_{2.5} y CO intramuros.

- Estación de monitoreo de ambiente IEMS (ver Figura 5): proporciona lecturas directas en tiempo real de PM_{2.5} y CO. Cuenta con sensor infrarrojo de dispersión de luz para PM que le permite la medición de partículas de 1 μm , 2.5 μm , ó 4.0 μm de diámetro. Puede medir concentraciones desde 1 a 20000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ó de 0.01 a 200 mg/m^3 . Los sensores del equipo deben de ser calibrados de acuerdo al manual técnico del IEMS.



Figura 5. Estación de monitoreo de ambiente.

Sistema gravimétrico:

- Sistema gravimétrico para las emisiones intra-domiciliarias (ver Figura 6): éste sistema se empleó para determinar la concentración de PM_{2.5} al interior de la cocina, el tren consta de un ciclón de polvo respirable de aluminio (SKC Inc., Ochenta y cuatro, PA, EE. UU.), el cual elimina los efectos electrostáticos adversos y permite la captura de las partículas con un diámetro menor a 2.5 µm de manera eficiente, un cassette porta filtro, un porta ciclón, mangueras y un adaptador de calibración.



Figura 6. Sistema gravimétrico para determinar PM_{2.5} intramuros.

- Bomba de succión SKC modelo 224-PCXR8 (ver Figura 7): se emplearon cuatro bombas para la succión de la muestra en el tren de muestreo, las cuales se operaron a un flujo de 4 l/min.



Figura 7. Bomba de succión.

- Medidor de flujo (ver Figura 8): debido a que el flujo de la bomba es una variable determinante para la correcta captura de partículas se hizo uso de un medidor de flujo primario (*MesaLabs Bios Defender 520-M, Brandt Instruments, EE. UU.*) el cual nos brinda una lectura del flujo real de la bomba y nos permite asegurar y calibrar el flujo de succión.

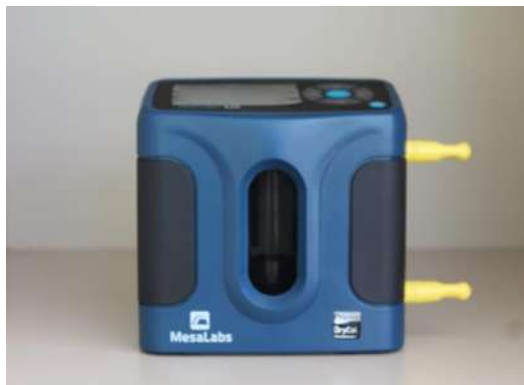


Figura 8. Medidor de *flujo primario*.

- Filtros de teflón (ver Figura 9): se emplearon filtros de fibra de teflón de un diámetro de 37 milímetros y un tamaño de poro de 1 micra de diámetro (*SKC Inc., USA*) para la captura de partículas con el ciclón. Mediante diferencia de peso podremos conocer la cantidad de $PM_{2.5}$ contenido en cada filtro.



Figura 9. Filtros de teflón con diámetro de 37 mm.

El tren de muestreo propuesto para realizar las mediciones en campo se muestra en la Figura 10:

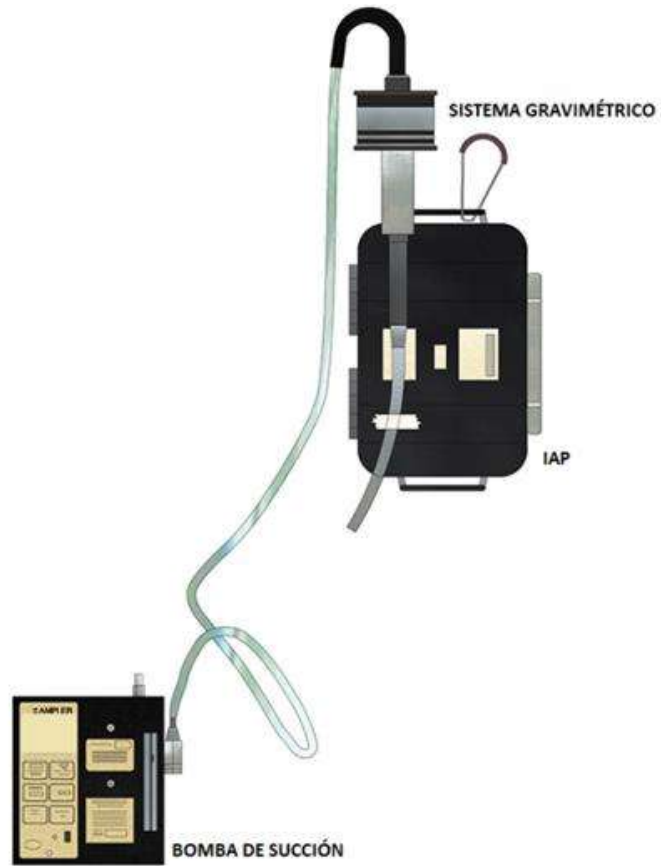


Figura 10. Tren de muestreo diseñado para realizar mediciones de $PM_{2.5}$ y CO en campo.

3.2 CAMPAÑA DE MUESTREO EN CAMPO

3.2.1 Dispositivos evaluados

Se evaluó el impacto de la contaminación del aire interior (IAP) de tres estufas individuales; Patsari; fogón tradicional tipo “U” y estufa de gas licuado de petróleo (LPG) y de cuatro tipos de combinaciones o stacking; Patsari / LPG, fogón tipo “U” / LPG y Patsari /. fogón tipo “U” / LPG empleando el protocolo CBC. Los dispositivos evaluados son descritos posteriormente:

- Estufa Patsari: La estufa Patsari está construida (in situ) a base de ladrillos y cemento, tiene una cámara de combustión principal de 20 cm de altura con entrada de aire primario, un comal principal y dos secundarios de 52 y 27 cm de diámetro respectivamente los cuales están sellados con arcilla para evitar fugas de humo y una chimenea para ventilar el humo fuera de la cocina. Las dimensiones exteriores de la estufa son: 80 cm de ancho 100 cm de largo y una altura de 27 cm (Berrueta, Edwards, & Masera, 2008).
- Fogón tipo “U”: Es un dispositivo a fuego abierto con bordes en forma de “U”, el cual “encierra” el fuego en una especie de cámara de combustión y carece de chimenea por lo que la combustión que lleva a cabo es incompleta e incontrolada, generando una gran cantidad de partículas y gases que se emiten en la cocina, su eficiencia térmica oscila entre el 5% y el 17% (Berrueta, Edwards, & Masera, 2008).
- Estufa de gas: construida a base de acero inoxidable, y con cuatro hornillas para realizar las tareas de cocción.

3.2.2 Ciclo de cocinado controlado (CBC)

El estudio reportado por (Johnson , Edwards, Berrueta, & Masera, 2010) define al término “ciclo de quemado” denominado “ciclo de cocinado” o “ciclo de cocción” como al conjunto de actividades de cocción de alimentos que se llevan a cabo en una estufa eficiente o un fogón tradicional a lo largo del día en un hogar rural. Este protocolo CBC (por sus siglas en inglés) vincula las evaluaciones de rendimiento en laboratorio con las actividades diarias de cocinado replicando dichos ciclos de quemado (Johnson , Edwards, Berrueta, & Masera, 2010) y proporciona una oportunidad para cerrar la brecha existente entre las pruebas de laboratorio y las de campo.

El CBC de este trabajo fue una adaptación del realizado por (Medina M. P., 2017), su estudio fue diseñado de acuerdo a observaciones en campo en los hogares rurales de la región rural del estado de Michoacán, México; teniendo como objetivo principal la forma en la que los usuarios de la estufa Patsari cocinan sus alimentos, cómo utilizan el comal principal y las hornillas secundarias de la estufa haciendo un uso eficiente tanto de las superficies como del calor generado y de las prácticas de cocinado que se realizan con mayor frecuencia en un día normal.

El CBC de éste trabajo incluyó tareas que se preparan de forma secuencial y en paralelo, y fue validado por cocineras de la región. Una cocinera tradicional de la zona contribuyó en la realización de las pruebas realizadas dentro de la cocina simulada.

El ciclo consistía de las siguientes tareas: 1) Hacer tortillas a partir de 3 Kg de masa, 2) Freír 5 piezas de huevo, 3) Freír 0.5 Kg de frijol 4) Preparar 0.5 Kg de sopa de arroz, 5) Hervir 1 L de agua, 6) Hervir 1 Kg de frijol crudo, 7) Recalentar tortillas y guisados y 8) Poner a hervir 2Kg de nixtamal y calentar agua para el baño a una temperatura entre 34 y 36 °C. Algunas tareas comprendidas dentro del ciclo se evaluaron de manera individual como recalentar alimentos, hacer tortillas a partir de 3 Kg de masa (exclusivamente en LPG) y poner a hervir 2 Kg de nixtamal y calentar agua

para el baño (únicamente en la estufa Patsari y fogón tipo “U”). Estas tareas de cocina concuerdan con lo reportado por (Ruiz-Mercado & Masera, 2015) para la región Purépecha.



Figura 11. Alimentos tradicionales incluidos en el CBC.

La Tabla 2 presenta el diseño de tareas de cocción para cada dispositivo de manera individual y por uso combinado.

Tabla 2. Diseño de la distribución de las tareas de cocción por dispositivo en uso individual y combinado.

| Práctica de cocinado | CBC | | | Recalentar | | | Tortillas | Stacking | | | |
|------------------------------------|---------|-----------|-----|------------|-----------|-----|-----------|-------------------|-------------|---------------|-----------------------|
| | Patsari | Fogón "U" | LPG | Patsari | Fogón "U" | LPG | LPG | Patsari-Fogón "U" | Patsari-LPG | LPG-Fogón "U" | Patsari-LPG-Fogón "U" |
| 1. Hacer tortillas | * | * | - | - | - | - | * | Patsari | Patsari | TSF | Patsari |
| 2. Freir frijoles | * | * | * | - | - | - | - | | LPG | LPG | LPG |
| 3. Freir huevos | * | * | * | - | - | - | - | | LPG | LPG | LPG |
| 4. Sopa de arroz | * | * | * | - | - | - | - | | Patsari | TSF | Patsari |
| 5. Hervir 1 L de agua | * | * | * | - | - | - | - | | LPG | LPG | LPG |
| 6. Hervir frijoles | * | * | * | - | - | - | - | TSF | Patsari | TSF | TSF |
| 7. Recalentar tortillas y guisados | - | - | - | * | * | * | - | Patsari | LPG | LPG | LPG |
| 8. Hervir nixtamal | * | * | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| N | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| IAP | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

Previo a realizarse cada prueba se registraba en una hoja de control el peso de los alimentos en crudo, peso de las cacerolas, y la cantidad de combustible. Una vez finalizada la prueba se pesaban nuevamente los alimentos, el combustible sobrante y el carbón residual. Se emplearon dos básculas; Rhino Ig (sensibilidad de 1g y un pesaje máximo de 10 Kg y un mínimo de 20 g) para los alimentos, la leña y el carbón residual y Tor Rey (sensibilidad de 10 g y un pesaje máximo de 50 kg y un mínimo de 200g) para el peso del agua y del gas LP.

De acuerdo al dispositivo o uso combinado de los dispositivos a evaluar se seleccionó el combustible en la realización del CBC y las tareas individuales. Para la estufa Patsari y el fogón tipo “U” se seleccionó encino blanco (*Quercus bicolor*) como combustible y ocote (pieza altamente resinosa de pino) como iniciador de llama, ambos son comúnmente utilizados en la mayoría de las comunidades rurales y periurbanas de México para la cocción de alimentos tradicionales.

Las dimensiones promedio del combustible fueron de 3 cm x 5 cm x 30 cm, y se utilizó una báscula digital con sensibilidad de 1 g para determinar las medidas del combustible. El contenido de humedad del combustible se determinó empleando un dispositivo que determina la humedad en base seca de leña; Protimeter Timbermaster Wood Moisture Meter®. Previo a cada prueba se tomaron 9 mediciones de la humedad en base seca para cada estufa según lo reportado por (Johnson , Edwards, Alatorre, & Masera, 2008) El contenido promedio de humedad de la leña para todas las pruebas fue de $11 \pm 2\%$, expresado en base húmeda con un rango de (8-15%). La humedad en base húmeda se calculó empleando la ecuación 1 la cual se reporta en el protocolo WBT versión 4.2.4:

$$\% \text{ Humedad en base húmeda} = \frac{\% \text{ humedad base seca}}{1 + \% \text{ humedad base seca}}$$

Para la estufa de gas, se utilizó un cilindro de 19 Kg de gas LP como combustible y fósforos de cocina como iniciador. Se usó una báscula digital con sensibilidad de 10 g para medir el consumo inicial y final de gas LP en cada prueba.

3.2.3 Método del decaimiento del gas trazador

Las mediciones de ventilación se realizan principalmente utilizando técnicas de gas trazador, en estas técnicas se inyecta un gas en la zona a estudiar y se mide su respuesta de concentración. Resultan ser de gran efectividad debido a que también pueden aplicarse a infiltración y determinación de la eficiencia de la ventilación en el espacio (Cui, Cohen, Stabat, & Marchio, 2015). Se pueden realizar diversos métodos de gas trazador para la medición de la tasa de intercambio de aire:

- a. Disminución de la concentración.
- b. Inyección constante.
- c. Concentración constante.

Entre los tres métodos el más comúnmente aceptado debido a su fácil implementación es el de la disminución de la concentración, de igual manera es el método que requiere una cantidad menor de gas trazador en comparación con los otros métodos. Es importante mencionar que el gas trazador debe cumplir con las siguientes especificaciones: seguro (no tóxico, no alergénico y no inflamable), no reactivo (no debe reaccionar química o físicamente con el medio ambiente), fácilmente medible (preferiblemente medir con instrumentación de bajo costo, y que sean capaces de medir en concentraciones bajas) y con una densidad similar a la del aire para lograr el mezclado perfecto.

Metodología de la disminución de la concentración: se inyecta una dosis de gas trazador y se mezcla con el aire de la habitación. La inyección se detiene y la concentración del gas trazador dentro de la habitación es uniforme, una vez que inicia la disminución de la concentración del gas se registra el periodo de tiempo en el cual la concentración decae hasta la concentración del ambiente.

En este trabajo se implementó la metodología de la disminución de la concentración de un gas trazador en una serie de 12 ensayos para determinar la tasa de intercambio de aire de una de las cocinas simuladas de GIRA (Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiable A.C.). El gas trazador empleado fue el CO, debido a que el contaminante no reacciona para la formación de contaminantes secundarios, sólo es removible mediante ventilación y es de fácil producción (quema de madera u otros combustibles sólidos). Los ensayos se realizaron de la siguiente manera: la cocina fue saturada empleando CO como gas trazador a una concentración de 40 ppm, posteriormente se midió el tiempo del decaimiento hasta una concentración de 0 ppm o ambiente se emplearon dos equipos IEMS para las lecturas de concentración.

Comúnmente la tasa de intercambio de aire se reporta como intercambio de aire por hora (ACH, por sus siglas en inglés y tiene unidades de h^{-1}). Si se conoce el tiempo en el que la concentración decae a concentración inicial (C_0) y la concentración inicial y final del gas trazador, la tasa de ventilación en términos de ACH puede ser calculada mediante la siguiente ecuación 2 (Tinoco, 2017):

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

Ecuación 2

Donde:

t^* = tiempo donde la C_{final} decae a la $C_{inicial}$

C = concentración final

C_o = concentración inicial

3.2.4 Medición de concentraciones intra – domiciliarias

Sitio de estudio: las pruebas en campo con duración de 9 semanas se realizaron dentro de una de las cocinas simuladas de GIRA ubicada en la región de Tzetenguaro, Pátazcuaro en el estado de Michoacán. Las dimensiones de la cocina son las siguientes: 3.20 m de largo y 4.3 m de ancho y un volumen de 40 m³ una tasa de ventilación de 40/h. El diseño de ésta cocina contaba con la versatilidad de que podía ser cambiado, es decir se podía manipular la orientación de las aberturas (la cocina estaba diseñada mediante paneles móviles que pueden intercambiarse) y los materiales del envoltente por lo que era posible controlar la tasa de ventilación de la misma.



Figura 12. Cocina simulada en GIRA.

Medición y determinación de las concentraciones por el método óptico y gravimétrico: todas las pruebas fueron realizadas dentro de la cocina simulada, los equipos IAP se utilizaron para determinar las concentraciones interiores en tiempo real de los periodos de cocción. Los equipos IAP se

instalaron dentro de la cocina como se muestra en la Figura 13 siguiendo el Procedimiento de Operación Estándar (University of California-Berkeley, 2005) (ver apéndice C) que también fue usado por (Smith, y otros, 2007).



Figura 13. Instalación de los medidores intramuros de CO y PM_{2.5} al interior de la cocina simulada.

Las muestras gravimétricas de PM_{2.5} se recolectaron mediante un tren de muestreo utilizando un ciclón de polvo respirable de aluminio; SKC y bombas de muestreo de aire estándar (Modelo 224-PCXR8; SKC Inc., Ochenta y cuatro, PA, EE. UU.) las cuales operaron a un caudal de 4l/min de acuerdo a la curva de corte o curva de operación del ciclón (SKC, 2019). Los caudales se midieron antes y después de las mediciones de muestreo utilizando un medidor de flujo primario (MesaLabs Bios Defender 520-M, Brandt Instruments, EE. UU.) El material particulado se recogió en filtros de teflón de 37 mm (SKC Inc). La determinación de la masa de PM_{2.5} en los filtros se realizó de la siguiente manera: los filtros se equilibraron durante 48 h (Armendáriz , y otros, 2008) a 21 ± 2 ° C y $35 \pm 5\%$ de humedad relativa para asegurar la estabilidad de la masa del filtro, posteriormente fueron pesados previo y después del muestreo utilizando una microbalanza analítica electrónica Mettler-Toledo GmbH; XPR10; 8606 Greifensee, Suiza (1 µg de legibilidad), la cual se encuentra localizada sobre una barra de

concreto que elimina las vibraciones. La balanza se calibró previo a cada set de pesajes con masas estándar de 1 mg, 2 mg, 5 mg, 10 mg, 20 mg, 50 mg, 100 mg, 200 mg 500 mg, 0.1 g, 0.2 g, 0.5 g, 1 g, 2 g y 5 g. Relacionado al pesaje, se utilizó un desionizador (Sartorius) para eliminar las cargas electrostáticas en los filtros que puedan alterar (aumentar o disminuir) las masas registradas por la microbalanza analítica. El desionizador se pasa a través de los filtros durante un periodo de 30 a 60 segundos previo a cada pesaje.

Para la medición de la concentración ambiente (24 h) de CO y PM_{2.5} se usó una Estación de Monitoreo del Ambiente (IEMS por sus siglas en inglés), el equipo registra las concentraciones por minuto en tiempo real. El sensor de CO se calibró de acuerdo con el manual IEMS y para el PM_{2.5} se utilizó gravimetría de igual manera en que se colectaron las muestras en interiores para las pruebas de cocinado. El equipo de IEMS registró mediciones continuas fuera de la cocina durante períodos de 24 horas desde el principio hasta el final del estudio. Es importante tener en cuenta que no se encontraron diferencias significativas entre el aire ambiente del interior y el exterior de la cocina simulada durante períodos de 24 h (valores de $p = 0.23$ y 0.61 para PM_{2.5} y CO, respectivamente). Finalmente, las concentraciones de CO y PM_{2.5} de los eventos de cocción se integraron a las concentraciones de aire ambiente de 24 horas para obtener valores promedio para cada día.

3.3 ESTIMACIONES DE LAS CONCENTRACIONES INTRAMUROS MEDIANTE EL USO DEL MODELO DE ZONA SIMPLE

3.3.1 Parámetros de entrada

El modelo de zona simple es uno de los modelos que evalúan la calidad del aire en interiores, es empleado para predecir las concentraciones intramuros en función de las emisiones de la estufa y las características de

la cocina (Johnson, Lam, Brant, Gray, & Pennise, 2011). Las variables antes mencionadas se incorporan mediante un rango de valores derivados en una simulación Monte Carlo la cual calcula aleatoriamente el resultado final de las concentraciones de los contaminantes, realizando las iteraciones deseadas. El principio de la técnica de la simulación Monte Carlo es la siguiente (Delgado, 2009):

- Se define **Y** o la variable de salida.
- Se determinan las variables de entrada **X=x1,x2,...,xm** que influyen en la cuantificación.
- Se deduce el modelo que relaciona **Y** con **X**, $y= f(x)$, siendo $j = 1,2,...m$ variables.
- Se asigna el tipo de distribución a las variables de entrada.

El MZS es descrito matemáticamente como la ecuación 3:

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

Ecuación 3

Donde:

C_t = Concentración del contaminante dentro del cuarto de cocinado en el tiempo t (mg m^{-3});

C_{t-1} = Concentración del contaminante dentro del cuarto de cocinado predecesora al tiempo t (mg m^{-3});

g_{in} = Tasa de emisión intramuros (mg min^{-1} o g min^{-1});

α = Tasa nominal de intercambio de aire (min^{-1});

V = Volumen del cuarto de cocinado (m^3);

t = Tiempo de uso de los dispositivos (min);

Fracción de emisiones intramuros: Esta fracción se calcula de acuerdo a las ecuaciones 4 y 5 y representa la porción de emisiones fugitivas o intramuros respecto de las emisiones totales. La fracción de las emisiones en la chimenea y la fracción de las emisiones fugitivas o intramuros suman la unidad o expresado en el porcentaje representan el 100% de las emisiones totales (Ruíz García, 2018).

$$f = \frac{g_{in}}{g_{in} + g_{ch}}$$

Ecuación 4

Donde:

f = Fracción que representan las emisiones intra-domiciliarias respecto a la tasa de emisión total de cada contaminante

g_{in} = Tasa de emisión intramuros (mg min^{-1} o g min^{-1});

g_{ch} = Tasa de emisión en la chimenea (mg min^{-1} o g min^{-1});

$$G = g_{in} + g_{ch}$$

Ecuación 5

Donde:

G = Tasa de emisión total (mg min^{-1} o g min^{-1});

g_{in} = Tasa de emisión intramuros (mg min^{-1} o g min^{-1});

g_{ch} = Tasa de emisión en la chimenea (mg min^{-1} o g min^{-1});

Se obtuvieron los parámetros de entrada al modelo, los cuales son representativos de las comunidades mexicanas dentro de la región Purépecha de Michoacán. A continuación, se detalla cada parámetro.

Volúmen: El volumen de la cocina se calculó de acuerdo a sus dimensiones (3.20 m de largo y 4.3 m de ancho).

Tasa nominal de intercambio de aire: Se utilizó el método de decaimiento de un gas trazador, empleando CO como gas trazador, saturando la cocina simulada a 40 ppm, se realizaron 12 ensayos en donde se midió el tiempo hasta que la concentración decae a cero o concentración ambiente.

Tiempo: El tiempo de cocción representa el periodo de tiempo desde que la estufa es encendida hasta que concluye con las tareas del ciclo de cocinado, y es medida en minutos por día. Generalmente en las comunidades rurales es posible encontrar periodos de cocinado relativamente largos, debido a que los usuarios cocinan tortillas y hierven frijoles para consumo familiar de uno o dos días.

Tasas de emisión total e intramuros: las tasas de emisión totales fueron obtenidas de (Medina M. P., 2017) en ciclos de cocinado con una gran similitud en los alimentos seleccionados para estudio, mientras que las fracciones de las emisiones fugitivas (Ecuación 5) se obtuvieron de los reportados por (Ruíz-García, y otros, 2018) y (Ruiz & Masera, 2018) para estufas tipo plancha como la Patsari éstas tasas representan el 1% y el 7% de las totales para Monóxido de Carbono y Material Particulado respectivamente. Se realizó un análisis de confianza y se obtuvo 4.3 % de emisiones fugitivas de Material Particulado con respecto a las totales, en relación al CO no se encontró una variación significativa con la reportada en la literatura.

3.3.2 Parámetros de salida

La concentración de contaminantes suele expresarse comúnmente como “ C_t ” y es la suma de las emisiones interiores de la estufa más la re-infiltración de contaminantes ambientales, en ésta investigación no se incluyó al término re-infiltración debido a que el objetivo es medir la contribución de cada uno de los dispositivos. La Iteración Monte Carlo se utilizó para predecir las distribuciones de $PM_{2.5}$ y CO. La ecuación 3 se utilizó para ejecutar 10,000 simulaciones que representan las concentraciones dentro de la cocina en un día típico de cocinado. Se le asignó una distribución de probabilidad normal a cada una de las variables de entrada al modelo. El modelo, considera que la extracción de gases por la chimenea no vuelve a entrar al volumen de aire considerado inicialmente en el cuarto de cocinado, eliminando de esta manera la re-infiltración.

3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN CAMPO Y EN SIMULACIÓN

Para comparar los conjuntos de datos de campo ($N = 5$) y del modelo de zona simple ($N = 10000$), las variables en la simulación fueron aleatorizadas para cada tipo de dispositivos y sus combinaciones, tanto para CO como para $PM_{2.5}$.

Una vez realizada la aleatorización de los conjuntos de datos (iguales en ambos casos) se utilizó la prueba t en lugar de otros análisis estadísticos tales como la prueba Welch (Winter, 2013). Se realizó el análisis estadístico de la diferencia de medias con varianzas desconocidas pero iguales de las concentraciones obtenidas en campo y en la simulación utilizando la prueba t de dos vías considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Las pruebas t se realizaron en el programa computacional MINITAB.

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1 ESTIMACION DE CONCENTRACIONES INTRAMUROS MEDIANTE PRUEBAS DE CAMPO

Las tablas 3 y 4 muestra las concentraciones de PM_{2.5} y CO ambiente, durante la tarea de cocinado (periodo que abarca desde el encendido hasta que se completa la tarea o el ciclo) y a 24 horas obtenidas mediante las pruebas en campo para el CBC y las tareas individuales (recalentar y hacer tortillas). Las concentraciones más bajas a 24 horas se obtuvieron para la estufa de gas LP con $18 \pm 2.1 \mu\text{g} / \text{m}^3$ para PM_{2.5} y $0.8 \pm 0.1 \text{mg} / \text{m}^3$ para CO, la estufa Patsari obtuvo $21 \pm 5 \mu\text{g} / \text{m}^3$ y $1.7 \pm 0.2 \text{mg} / \text{m}^3$ y el stacking Patsari-LPG $24 \pm 2.2 \mu\text{g} / \text{m}^3$ y $3 \pm 0.3 \text{mg} / \text{m}^3$. El fogón tipo “U” fue el que arrojó las concentraciones más altas; la concentración de PM_{2.5} fue de $144 \pm 20.7 \mu\text{g} / \text{m}^3$ que está en buen acuerdo según lo informado por (Armendáriz-Arnez, y otros, 2010) y 3 ± 0.3 para CO.

Tabla 3. Concentraciones intramuros de PM_{2.5} en tareas de cocción para CBC, ambiente y 24h obtenidas en campo.

| Tarea | Estufa / Stacking | Material Particulado PM _{2.5} (µg/m ³) | | |
|----------------------------------|--------------------------|---|----------|----------|
| | | Tarea de cocinado | Ambiente | 24 h |
| CBC | Patsari | 29 ± 12 | 19 ± 11 | 21 ± 8 |
| | Fogón tipo "U" | 874 ± 177 | 16 ± 11 | 144 ± 46 |
| | LPG | 31 ± 5 | 14 ± 5 | 18 ± 5 |
| | Patsari / Tipo "U" | 610 ± 72 | 13 ± 6 | 107 ± 9 |
| | Patsari / LPG | 53 ± 8 | 18 ± 6 | 24 ± 5 |
| | Tipo "U" / LPG | 868 ± 420 | 10 ± 7 | 131 ± 55 |
| | Patsari / Tipo "U" / LPG | 718 ± 146 | 17 ± 9 | 107 ± 22 |
| Recalentar alimentos y tortillas | Patsari | 13 ± 7 | 19 ± 11 | 19 ± 10 |
| | Fogón tipo "U" | 536 ± 264 | 16 ± 11 | 32 ± 14 |
| | LPG | 17 ± 8 | 14 ± 5 | 14 ± 5 |
| Hacer tortillas | LPG | 44 ± 14 | 14 ± 5 | 19 ± 4 |
| Nixtamal y agua para el baño | Patsari | 33 ± 12 | 18 ± 6 | 22 ± 7 |
| | Fogón tipo "U" | 646 ± 87 | 18 ± 6 | 43 ± 5 |

Nota: La variabilidad es expresada como ± la desviación estándar.

Tabla 4. Concentraciones intramuros de CO en tareas de cocción para CBC, ambiente y 24h obtenidas en campo.

| Tarea | Estufa / Stacking | Monóxido de Carbono (mg/m ³) | | |
|----------------------------------|--------------------------|--|------------|-----------|
| | | Tarea de cocinado | Ambiente | 24 h |
| CBC | Patsari | 2.7 ± 0.3 | 1.1 ± 0.4 | 2 ± 0.5 |
| | Fogón tipo "U" | 12 ± 2 | 0.7 ± 0.3 | 3 ± 1 |
| | LPG | 3.2 ± 0.1 | 0.2 ± 0.2 | 1 ± 0.2 |
| | Patsari / Tipo "U" | 11 ± 1 | 0.9 ± 0.1 | 3 ± 0.3 |
| | Patsari / LPG | 4 ± 1 | 2 ± 1 | 3 ± 1 |
| | Tipo "U" / LPG | 21 ± 7 | 1 ± 0.1 | 4 ± 1 |
| | Patsari / Tipo "U" / LPG | 22 ± 2 | 0.5 ± 0.3 | 3 ± 0.2 |
| Recalentar alimentos y tortillas | Patsari | 3 ± 0.1 | 1.1 ± 0.2 | 1 ± 0.2 |
| | Fogón tipo "U" | 13 ± 1.2 | 0.7 ± 0.2 | 2 ± 0.2 |
| | LPG | 2 ± 0.7 | 0.2 ± 0.1 | 0.3 ± 0.1 |
| Hacer tortillas | LPG | 2 ± 0.7 | 0.2 ± 0.1 | 0.4 ± 0.1 |
| Nixtamal y agua para el baño | Patsari | 5 ± 0.8 | 1.2 ± 0.01 | 1 ± 0.04 |
| | Fogón tipo "U" | 13 ± 0.9 | 1.2 ± 0.01 | 2 ± 0.1 |

Nota: La variabilidad es expresada como ± la desviación estándar.

La Figura 14 reporta las concentraciones a 24 h de PM_{2.5} y CO para CBC y tareas individuales. Las estufas Patsari y LPG y la combinación Patsari-LPG cumplen con la concentración del objetivo intermedio anual para PM_{2.5} (35 µg / m³) y con la directriz de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para CO (7 mg / m³). El fogón tipo “U” y sus respectivos combinaciones exceden la concentración límite para PM_{2.5}. Sin embargo, la tarea de recalentado cumple con el objetivo 1 provisional, esto debido a que es una tarea con tiempos relativamente cortos.

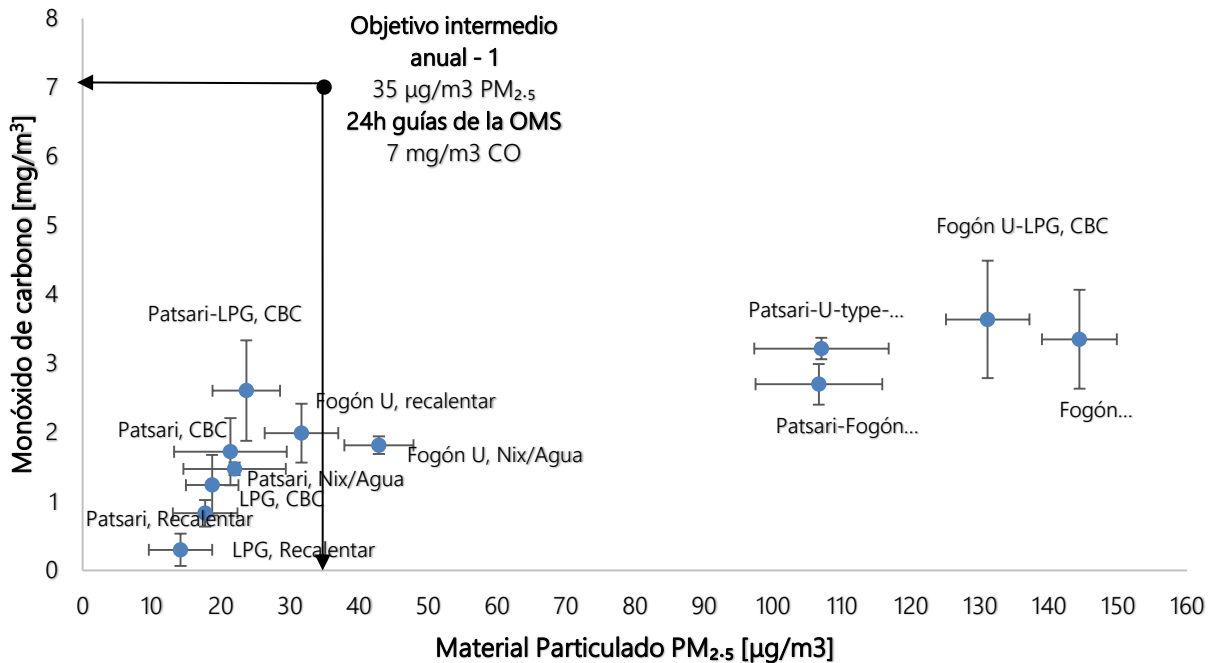


Figura 14. Concentraciones promedio a 24 h de PM_{2.5} y CO para CBC y tareas individuales.

4.2 ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIONES INTRAMUROS MEDIANTE EL MODELO DE ZONA SIMPLE

Las Tablas 5, 6, 7, 8, 9 y 10 muestran los diferentes parámetros de entrada al modelo de zona simple; tasa de ventilación, tasa de emisión intramuros, periodos de cocinado y volumen del cuarto de cocinado. Los parámetros que se mantuvieron constantes fueron el volumen, y la tasa de ventilación, mientras los que mantuvieron variables de acuerdo al tipo de stacking fueron las tasas de emisión y los tiempos de cocción.

A continuación se presentan los resultados de los parámetros de entrada al modelo: **Volúmen:** El volumen de la cocina se calculó de acuerdo a las dimensiones de la misma 3.20 m de largo y 4.2 m de ancho, lo que nos dio un volumen de **40 m³**. **Tasa nominal de intercambio de aire:** Se calculó la tasa de intercambio de aire mediante el método de decaimiento de un gas trazador (CO), se saturó la cocina a 40 ppm y se midió el tiempo hasta que la concentración decayó a la concentración ambiente, posteriormente se empleó la ecuación 2 la cual calcula la tasa de intercambio de aire por hora (IAH). Se obtuvo una tasa de intercambio de **36 ± 7 ≈ 40 ACH**. **Tiempo:** El tiempo de cocción para cada estufa y stacking fue considerado desde el momento en el cual la cocinera enciende la estufa(s) hasta que concluye con las tareas del ciclo de cocinado, y fue medida en minutos por día. Generalmente en las comunidades rurales es posible encontrar periodos de cocinado relativamente largos, las mujeres comienzan a cocinar desde temprano. Para las costumbres mexicanas en las zonas rurales no hay eventos de cocinado (desayuno, comida y cena), sino que existen periodos de operación continuos que incluyen tareas de larga duración. **Tasas de emisión de Contaminantes (CO y PM_{2.5}):** Las tasas de emisión total fueron tomadas del estudio de (Medina M. P., 2017), las cuales fueron determinadas mediante el protocolo CCT. Debido a que la concentración calculada fue la intra-domiciliaria es necesario conocer la fracción de emisiones intramuros o intra-domiciliarias que pertenecen a las tasas de emisión total de PM_{2.5} y CO para esto se consideró lo reportado por (Ruíz

García, 2018) y (Ruiz & Masera, 2018) el porcentaje de emisiones en interiores respecto a las emisiones totales producidas por estufas con chimeneas se estimó en un 4.3% para PM_{2.5} y un 1% para las emisiones de CO.

Tabla 5. Parámetros de entrada al MSZ referentes a las condiciones de la cocina.

| Parámetros | Unidad | Promedio | SD | Min | Max |
|--|----------------|----------|-------|-------|-------|
| Dimensiones de la cocina | | | | | |
| Alto | m | 3.0 | n. a. | n. a. | n. a. |
| Ancho | m | 4.2 | n. a. | n. a. | n. a. |
| Largo | m | 3.2 | n. a. | n. a. | n. a. |
| Volúmen de la cocina (V) | m ³ | 40 | n. a. | n.a. | n. a. |
| Tasa nominal de intercambio de aire (α) | ACH | 36 | 7 | 26 | 45 |

Tabla 6. Parámetros de entrada al MZS para dispositivos usados de manera individual durante el ciclo de cocción (CBC).

| CBC | | | | | | |
|-------------|--------------------------------------|--------|----------|-----|------|------|
| Dispositivo | Parámetros | Unidad | Promedio | SD | Min | Max |
| Patsari | Tasa de emisión (CO) | mg/min | 13 | 1 | 12 | 14 |
| | Tasa de emisión (PM _{2.5}) | mg/min | 2.2 | 0.2 | 2.1 | 2.4 |
| | Tiempo | Min | 305 | 25 | 273 | 320 |
| Fogón "U" | Tasa de emisión (CO) | mg/min | 3206 | 60 | 3154 | 3273 |
| | Tasa de emisión (PM _{2.5}) | mg/min | 311 | 6 | 306 | 318 |
| | Tiempo | Min | 283 | 20 | 255 | 304 |
| LPG | Tasa de emisión (CO) | mg/min | 34 | 2 | 32 | 36 |
| | Tasa de emisión (PM _{2.5}) | mg/min | 1.2 | 0.1 | 1.1 | 1.2 |
| | Tiempo | Min | 283 | 20 | 255 | 304 |

Nota: SD representa la desviación estándar.

Tabla 7. Parámetros de entrada al MZS para las combinaciones de dispositivos y combustibles en el CBC.

| CBC | | | | | | |
|---------------------------|--------------------------------------|--------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|
| Stacking | Parámetros | Unidad | Promedio | SD | Min | Max |
| Patsari / Fogón "U" | Tasa de emisión (CO) | mg/min | 13 / 3206 | 1 / 60 | 12 / 3154 | 14 / 3273 |
| | Tasa de emisión (PM _{2.5}) | mg/min | 2.2 / 311 | 0.2 / 6 | 2.1 / 306 | 2.4 / 318 |
| | Tiempo | min | 162 / 189 | 10 / 16 | 152 / 171 | 172 / 199 |
| Patsari / LPG | Tasa de emisión (CO) | mg/min | 13 / 34 | 1 / 2 | 12 / 32 | 14 / 36 |
| | Tasa de emisión (PM _{2.5}) | mg/min | 2.2 / 1.2 | 0.2 / 0.1 | 2.1 / 1.1 | 2.4 / 1.2 |
| | Tiempo | min | 215 / 43 | 17 / 4 | 197 / 38 | 225 / 47 |
| Fogón "U" / LPG | Tasa de emisión (CO) | mg/min | 3206 / 34 | 60 / 2 | 3154 / 32 | 3273 / 36 |
| | Tasa de emisión (PM _{2.5}) | mg/min | 311 / 1.2 | 6 / 0.1 | 306 / 1.1 | 318 / 1.12 |
| | Tiempo | min | 212 / 36 | 17 / 2 | 190 / 34 | 239 / 37 |
| Patsari / Fogón "U" / LPG | Tasa de emisión (CO) | mg/min | 13 / 3206 / 34 | 1 / 60 / 2 | 12 / 3154 / 32 | 14 / 3273 / 36 |
| | Tasa de emisión (PM _{2.5}) | mg/min | 2.2 / 311 / 1.2 | 0.2 / 6 / 0.1 | 2.1 / 306 / 1.1 | 2.4 / 318 / 1.2 |
| | Tiempo | min | 107 / 169 / 35 | 15 / 15 / 7 | 85 / 154 / 26 | 141 / 186 / 44 |

Nota: Los valores de Promedio, SD, Min y Max representan diferentes dispositivos (por ejemplo, Dispositivo 1 / Dispositivo 2 / Dispositivo 3).

Tabla 8. Parámetros de entrada al MZS para dispositivos usados de manera individual durante la tarea de recalentar.

| Dispositivo | Parámetros | Unidad | Promedio | SD | Min | Max |
|-------------|--------------------------------------|--------|----------|-----|------|------|
| Patsari | Tasa de emisión (CO) | mg/min | 7 | 3 | 6 | 11 |
| | Tasa de emisión (PM _{2.5}) | mg/min | 2.5 | 0.9 | 1.9 | 3.6 |
| | Tiempo | min | 18 | 2 | 15 | 19 |
| Fogón "U" | Tasa de emisión (CO) | mg/min | 1810 | 826 | 1310 | 2923 |
| | Tasa de emisión (PM _{2.5}) | mg/min | 138 | 63 | 100 | 223 |
| | Tiempo | min | 25 | 10 | 16 | 41 |
| LPG | Tasa de emisión (CO) | mg/min | 34 | 2 | 32 | 36 |
| | Tasa de emisión (PM _{2.5}) | mg/min | 1.2 | 0.1 | 1.1 | 1.2 |
| | Tiempo | min | 17 | 2 | 15 | 19 |

Parámetros de salida:

A continuación se presentan los resultados de la aplicación del modelo de zona simple mediante iteración Monte Carlo, su parametrización y validación para los diferentes escenarios de stacking que son representativos de las comunidades rurales del estado de Michoacán. Las tablas 9 y 10 presentan un resumen de las concentraciones de salida, así como el porcentaje de simulaciones que cumplen con la concentración objetivo intermedio 1 ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de $\text{PM}_{2.5}$ y con la concentración AQG 24 h ($7 \text{ mg}/\text{m}^3$) de las AQG de la OMS.

Las concentraciones obtenidas mediante la simulación indican que la estufa Patsari, la de gas LP y el uso combinado de estufa Patsari y estufa de gas LP cumplen con el objetivo intermedio anual-1 con concentraciones de $34 \pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $21 \pm 0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $32 \pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

El MZS no predijo concentraciones cercanas a las obtenidas en campo con los IAP para el Fogón tipo "U" y sus combinaciones correspondientes; Patsari / Fogón "U", LPG / Fogón "U" y Patsari / Fogón "U" / LPG durante el CBC y las tareas individuales, pero predice concentraciones cercanas para la estufa Patsari, la estufa de gas (LPG) y la combinación Patsari / LPG. La tarea de recalentar alimentos para la estufa de gas LP arrojó concentraciones de $14 \pm 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y $0.3 \pm 0.1 \text{ mg}/\text{m}^3$ para CO medido en campo, contra $15 \pm 0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y $0.2 \pm 0 \text{ mg}/\text{m}^3$ para CO utilizando el MZS con simulación Montecarlo. Por otra parte la tarea de Nixtamal y agua para el baño de la estufa Patsari mostraron concentraciones de 22 ± 3.3 para $\text{PM}_{2.5}$ y $1.5 \pm 0 \text{ mg}/\text{m}^3$ para CO medidos en campo contra 25 ± 0 para $\text{PM}_{2.5}$ y $1.2 \pm 0 \text{ mg}/\text{m}^3$ para CO mediante la simulación. Relacionado a la combinación Patsari / LPG se obtuvo 24 ± 2.2 para $\text{PM}_{2.5}$ y $3 \pm 0.3 \text{ mg}/\text{m}^3$ para CO medido en campo, contra 32 ± 0 para $\text{PM}_{2.5}$ y $2 \pm 0.0 \text{ mg}/\text{m}^3$ para CO con la simulación (ver figuras 15, 16, 17, y 18).

Tabla 9. Resumen de las concentraciones dentro de la cocina simulada estimadas mediante el modelo de zona simple, así como el porcentaje de simulaciones que cumplen con las directrices de la OMS sobre calidad de aire para 3 modelo de estufas en uso individual combinado (stacking) para el ciclo de cocción (CBC).

| CBC | | | | | | | |
|--|---------|-----------|------|--------------------|--------------|-----------------|-------------------------|
| Parámetros de salida | Patsari | Fogón "U" | LPG | Patsari /Fogón "U" | Patsari /LPG | Fogón "U" / LPG | Patsari / Fogón "U"/LPG |
| Material Particulado (PM_{2.5}) | | | | | | | |
| Promedio (µg m ⁻³) | 34 | 2423 | 21 | 1716 | 32 | 1909 | 1539 |
| Mediana (µg m ⁻³) | 34 | 2412 | 21 | 1709 | 32 | 1901 | 1532 |
| Desviación estándar (µg m ⁻³) | 1 | 165 | 0 | 120 | 1 | 134 | 107 |
| Percentil 10 (µg m ⁻³) | 33 | 2223 | 20 | 1570 | 31 | 1747 | 1409 |
| Percentil 90 (µg m ⁻³) | 35 | 2640 | 21 | 1872 | 33 | 2085 | 1677 |
| Porcentaje de simulaciones en referencia al lineamiento para PM _{2.5} de la OMS | | | | | | | |
| Objetivo intermedio anual – 1 (35 µg m ⁻³) | 81% | 0% | 100% | 0% | 100% | 0% | 0% |
| Monóxido de carbono (CO) | | | | | | | |
| Promedio (mg m ⁻³) | 1 | 26 | 0.4 | 18 | 2 | 21 | 16 |
| Mediana (mg m ⁻³) | 1 | 25 | 0.4 | 18 | 2 | 21 | 16 |
| Desviación estándar (mg m ⁻³) | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| Percentil 10 (mg m ⁻³) | 1 | 24 | 0.4 | 17 | 2 | 19 | 15 |
| Percentil 90 (mg m ⁻³) | 1 | 28 | 0.4 | 20 | 2 | 22 | 18 |
| Porcentaje de simulaciones en referencia al lineamiento para CO de la OMS | | | | | | | |
| 24 h AQG (7 mg m ⁻³) | 100% | 0% | 100% | 0% | 100% | 0% | 0% |

Tabla 10. Resumen de las concentraciones estimadas utilizando el modelo de zona simple y el porcentaje de simulaciones que cumplen con las directrices de la OMS para 3 modelos de estufas, en forma individual para tareas incluidas en un ciclo.

| Parámetros de salida | Recalentart | | | Hacer Tortillas | Nixtamal y agua para el baño | |
|--|-------------|-----------|------|-----------------|------------------------------|-----------|
| | Patsari | Fogón "U" | LPG | LPG | Patsari | Fogón "U" |
| Material Particulado (PM_{2.5}) | | | | | | |
| Promedio ($\mu\text{g m}^{-3}$) | 20.2 | 115 | 14.7 | 16.0 | 25 | 402 |
| Mediana ($\mu\text{g m}^{-3}$) | 20.1 | 114 | 14.7 | 15.9 | 25 | 400 |
| Desviación estándar ($\mu\text{g m}^{-3}$) | 0.1 | 18 | 0.0 | 0.1 | 1 | 37 |
| Percentil 10 ($\mu\text{g m}^{-3}$) | 20.0 | 93 | 14.7 | 15.8 | 24 | 355 |
| Percentil 90 ($\mu\text{g m}^{-3}$) | 20.3 | 138 | 14.8 | 16.1 | 26 | 451 |
| Porcentaje que cumple con las guías de la OMS Objetivo intermedio anual – 1 ($35 \mu\text{g m}^{-3}$) | 100% | 0% | 100% | 100% | 100% | 0% |
| Monóxido de Carbono (CO) | | | | | | |
| Promedio (mg m^{-3}) | 1 | 2 | 0 | 0.3 | 1 | 4 |
| Mediana (mg m^{-3}) | 1 | 2 | 0 | 0.3 | 1 | 4 |
| Desviación estándar (mg m^{-3}) | 0 | 0 | 0 | 0.0 | 0 | 0 |
| Percentil 10 (mg m^{-3}) | 1 | 2 | 0 | 0.3 | 1 | 4 |
| Percentil 90 (mg m^{-3}) | 1 | 2 | 0 | 0.3 | 1 | 5 |
| Porcentaje que cumple con las guías de la OMS 24 h AQG (7mg m^{-3}) | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |

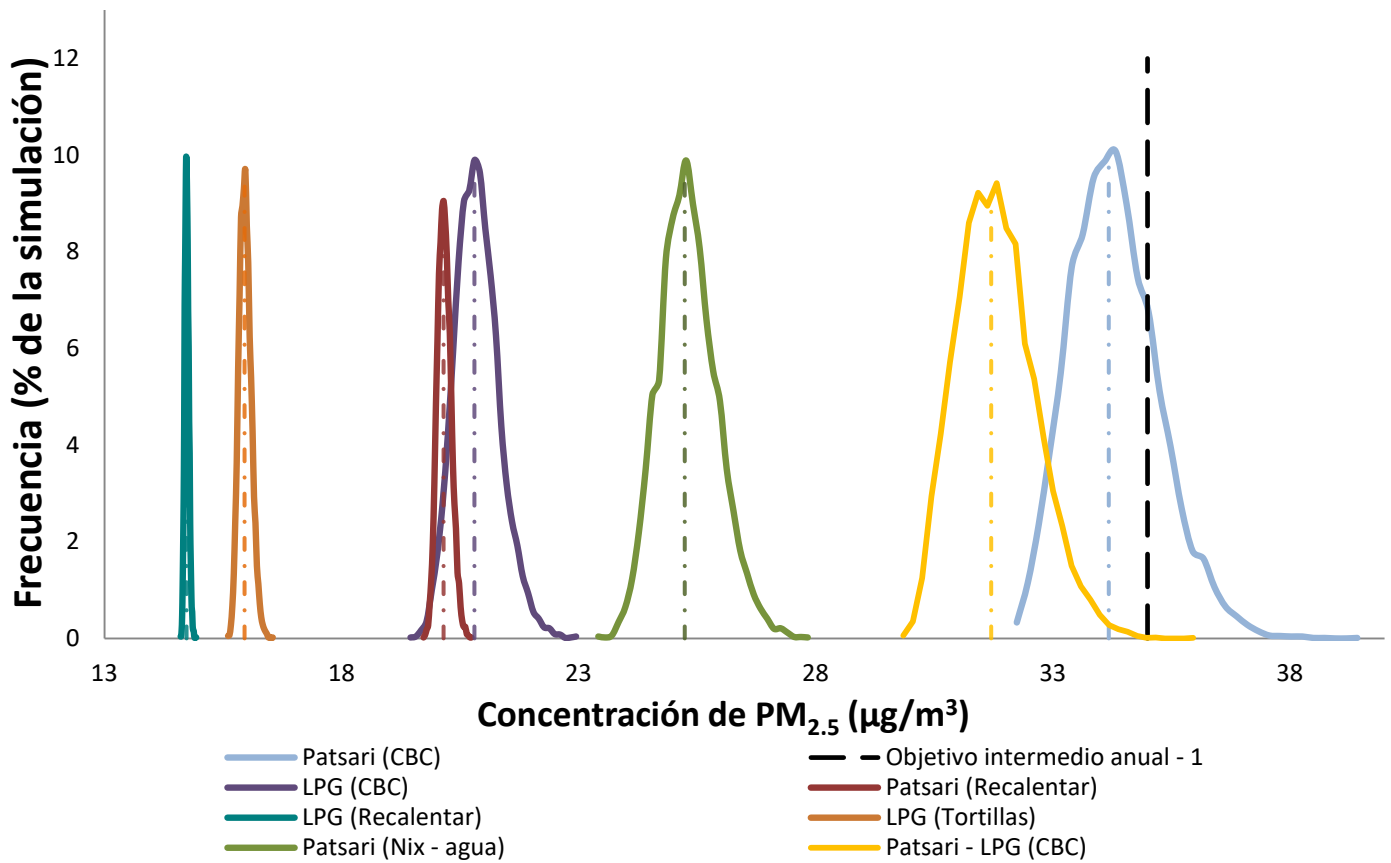


Figura 15. Distribución de las concentraciones a 24 h de PM_{2.5} para la estufa Patsari, la estufa de gas LP y sus combinaciones con otros dispositivos.

Nota: Las líneas punteadas corresponden a la media geométrica.

La Figura 16 nos muestra que las concentraciones de CO para la estufa Patsari, la estufa de gas y sus combinaciones obtenidas mediante la simulación cumplen en su totalidad en relación a lo establecido en las guías de calidad del aire. Las curvas de distribución de esta figura indican desviaciones estándar muy cercanas a cero.

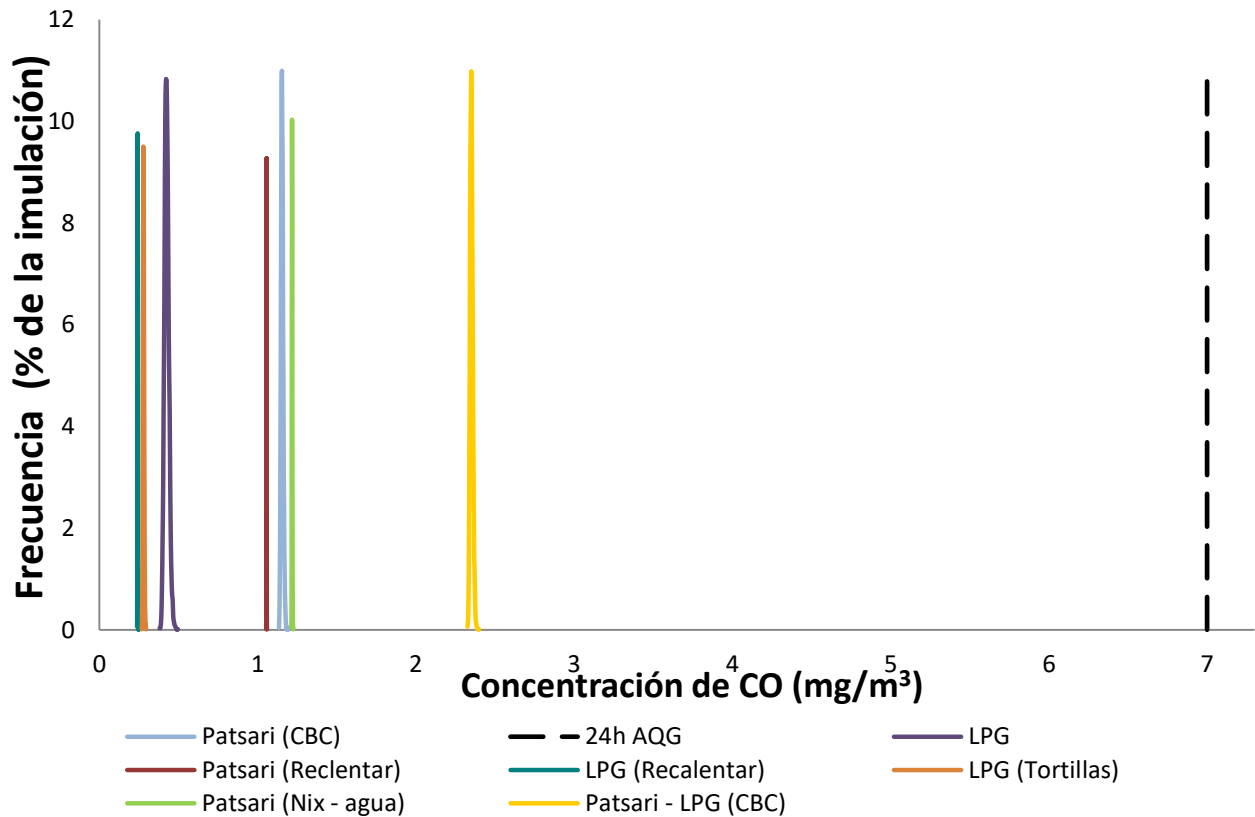


Figura 16. Distribución de las concentraciones a 24 h de CO para la estufa Patsari, la estufa de gas LP y sus combinaciones con otros dispositivos.

Nota: Las líneas punteadas corresponden a la media geométrica.

Como se observa en la Figura 17 las concentraciones obtenidas mediante la simulación para el fogón "U" usado de manera individual y en combinación con otros dispositivos no cumplen con el objetivo intermedio anual para PM_{2.5} (35 µg/m³), esto posiblemente derivado a que comúnmente en las comunidades rurales el fogón es utilizado en tareas de cocción de larga duración como cocer frijoles.

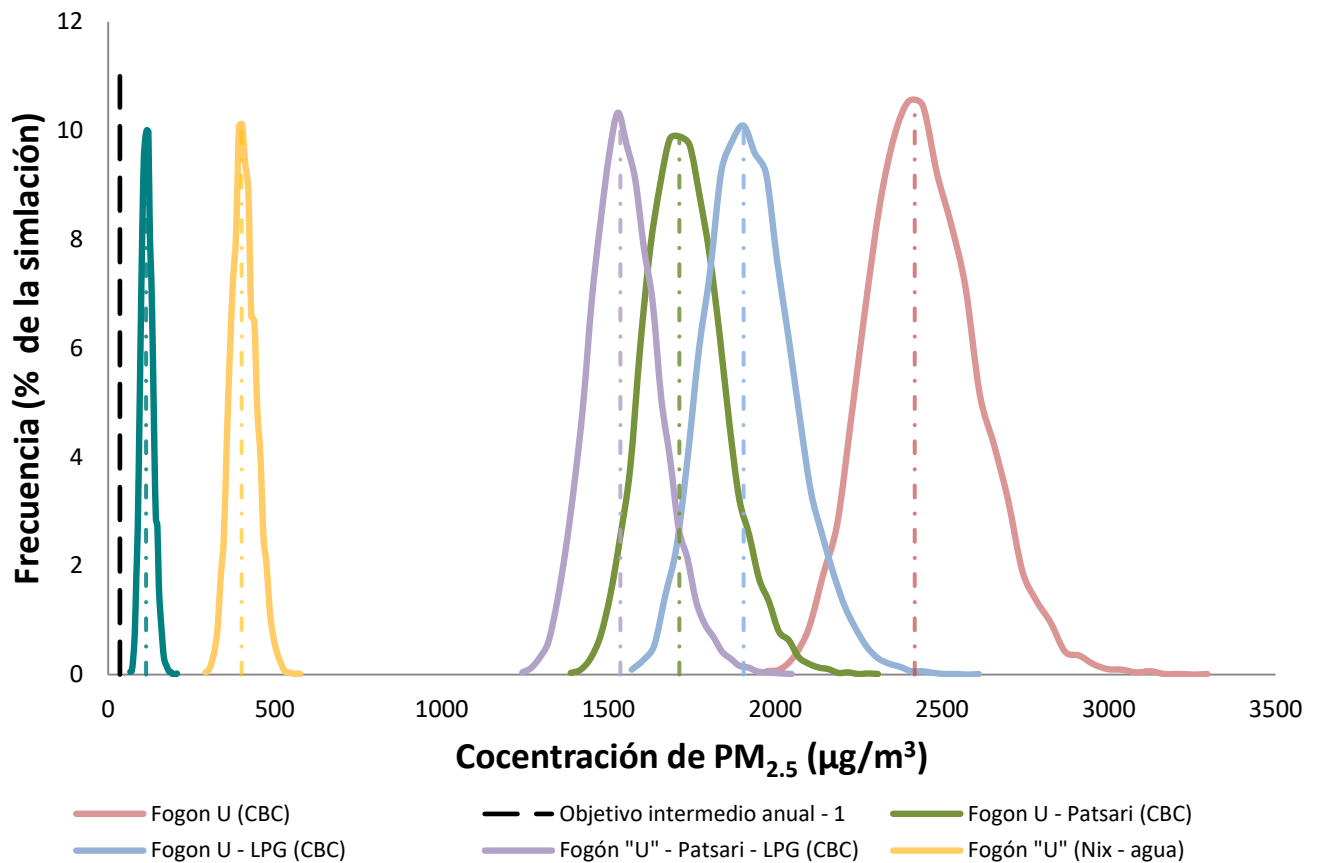


Figura 17. Distribución de las concentraciones a 24 h de PM_{2.5} para el Fogón "U" y sus combinaciones con otros dispositivos.

Nota: Las líneas punteadas corresponden a la media geométrica.

De acuerdo a la figura 18 se observa que el fogón "U" únicamente cumplió con los lineamientos para CO (7 mg/m^3) en tareas de corta duración como recalentar alimentos.

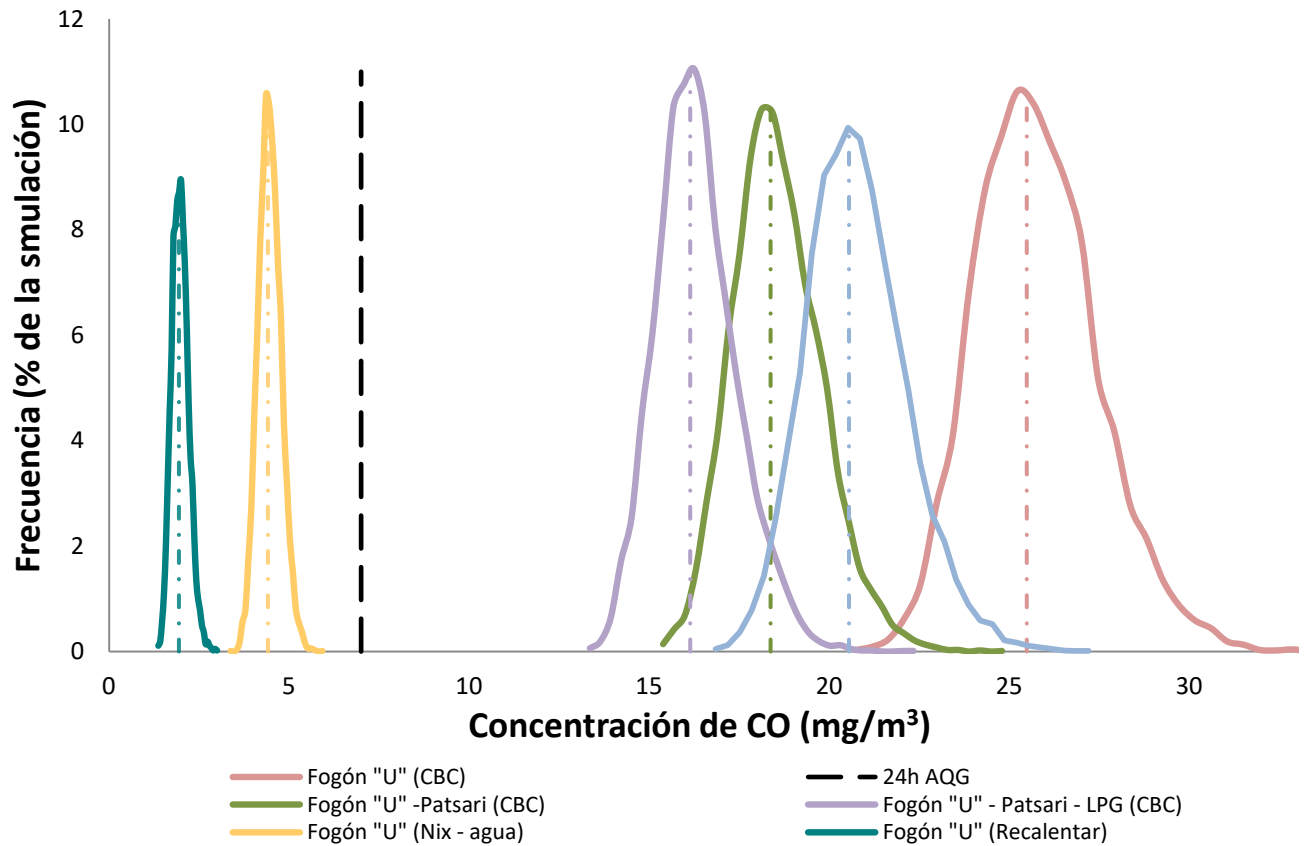


Figura 18. Distribución de las concentraciones a 24 h de CO para el Fogón "U" y sus combinaciones con otros dispositivos.

Nota: Las líneas punteadas corresponden a la media geométrica.

Validación del modelo:

Los resultados propuestos por el modelo mostraron concentraciones de PM_{2.5} y CO cercanos a los obtenidos mediante las pruebas en campo para el caso de la estufa Patsari, estufas de gas LP y la combinación estufa Patsari y estufa de gas LP para el ciclo de cocinado controlado (CBC) y las tareas individuales. De acuerdo a los resultados de la tabla 12 obtenidos mediante la prueba t se observa que las medias obtenidas en campo y en simulación para PM_{2.5} en LPG (CBC), Patsari, LPG (recalentar), LPG (tortillas) y Patsari (Nixtamal – agua) son iguales, en relación al CO, Patsari (CBC), Patsari / LPG (CBC), Patsari (recalentar), LPG (recalentar) y LPG (tortillas) también son iguales por lo que el modelo de zona simple es capaz de predecir concentraciones en dispositivos con bajas tasas de emisión y en tareas de corta duración y se considera validado

También se observó que el uso de estos dos dispositivos, en su uso individual y en combinación, cumplen en su mayoría con las directrices de la OMS (objetivo intermedio-1 35 µg/m³ PM_{2.5} y la directriz de la OMS AQG 7 mg/m³ CO).

Las concentraciones obtenidas mediante el MSZ para el Fogón tipo “U” no se consideran comparables con los lineamientos de la OMS o con los valores obtenidos en el campo. El fogón sobrestima 54 veces las concentraciones intramuros para PM_{2.5} y en 3 veces para CO por lo que se infiere que el modelo muestra deficiencias al estimar concentraciones en dispositivos con altas tasas de emisión como los fogones tradicionales.

Tabla 11. Comparación de la concentración promedio de Material Particulado y Monóxido de Carbono obtenido del modelo de zona simple vs la prueba de campo.

| Tarea | Dispositivo | Resultados de la simulación | | Resultados de las pruebas en campo | |
|---------------------------|-------------|--|-------------------------|--|-------------------------|
| | | PM _{2.5} (µg/m ³) | CO (mg/m ³) | PM _{2.5} (µg/m ³) | CO (mg/m ³) |
| CBC | Patsari | 34 (0) | 1 (0) | 21 (8) | 2 (0.5) |
| | LPG | 20.8 (0) | 0 (0) | 17.7 (5) | 1 (0.2) |
| | Patsari-LPG | 32 (0) | 2 (0) | 24 (5) | 3 (1) |
| Recalentar | Patsari | 20 (0) | 1.1 (0) | 19 (10) | 1.2 (0.2) |
| | LPG | 15 (0) | 0.2 (0) | 14 (5) | 0.3 (0.1) |
| Hacer tortillas | LPG | 16 (0) | 0.3 (0) | 18.6 (4) | 0.4 (0.1) |
| Nixtamal y agua para baño | Patsari | 25 (0) | 1.2 (0) | 22 (7) | 1.5 (0.1) |

Nota: (SD) representa la desviación estándar.

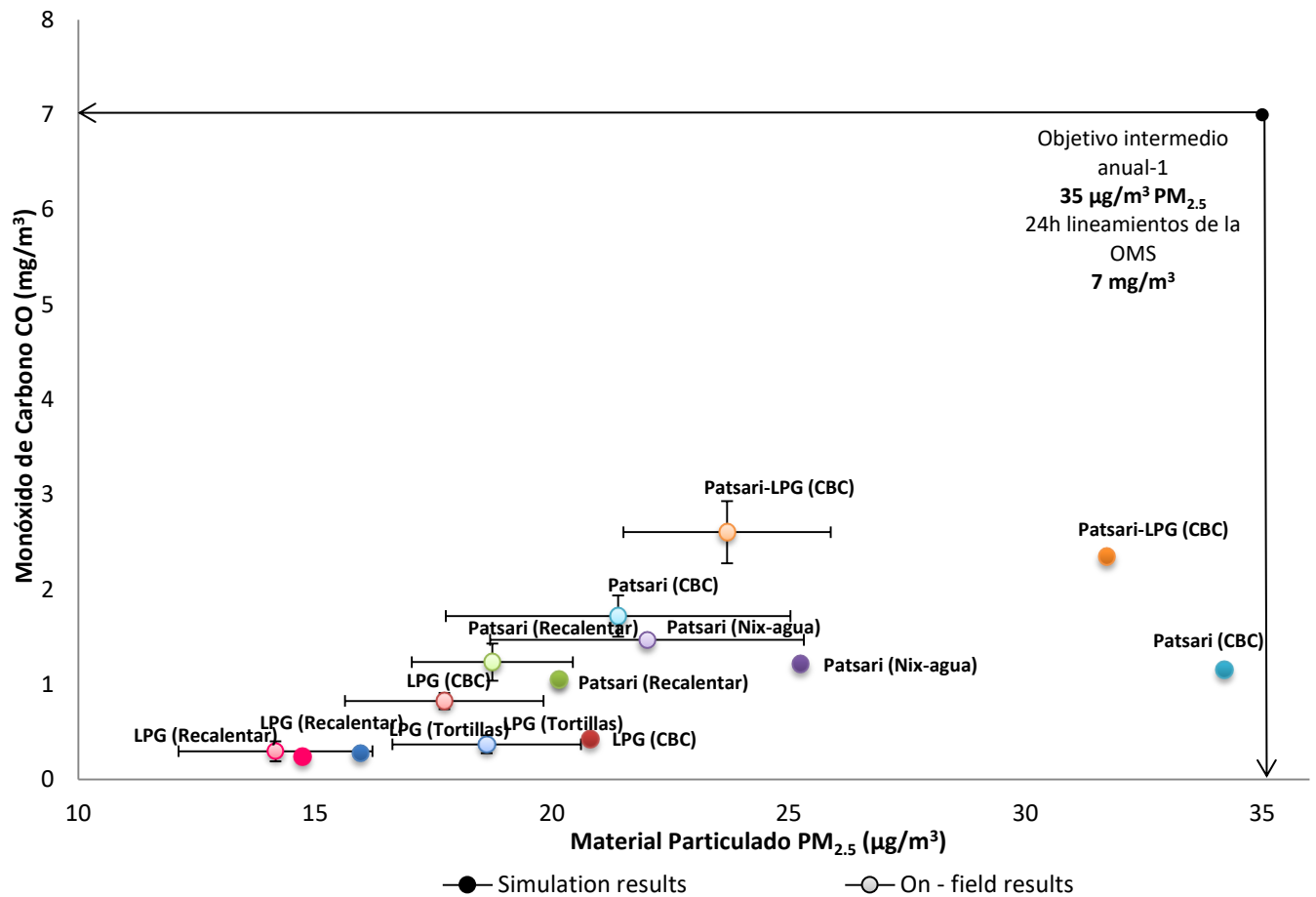


Figura 19. Concentraciones a 24 h de PM_{2.5} y CO obtenida con el modelo de zona simple en mediciones de campo en diferentes tareas de cocción, dispositivos y combustibles.

Nota: Este gráfico no incluye al fogón “U” o sus combinaciones debido a la diferencia significativa en la concentración obtenida mediante el modelo con respecto a las pruebas en campo para la Patsari y la estufa de gas LP.

Prueba t para la diferencia de medias

La Tabla 12 resume los resultados obtenidos a partir de la prueba t para la diferencia de medias de las concentraciones de PM_{2.5} y CO obtenidas en campo y en simulación mediante el programa MINITAB.

El P – valor es una cantidad que permite resumir el resultado del experimento de manera objetiva y corresponde al nivel de significación más pequeño posible que puede escogerse, para el cual se acepta la hipótesis alternativa ($\mu_1 \neq \mu_2$).

Tabla 12. Resultados del P - valor obtenidos mediante la prueba t para la diferencia de medias de las concentraciones de PM_{2.5} y CO en uso de dispositivos de cocción individual y combinado.

| Tarea | Dispositivo / Stacking | P – valor | |
|-----------------|------------------------|-----------|-------|
| | | PM2.5 | CO |
| CBC | Patsari | 0.022 | 0.059 |
| | LPG | 0.061 | 0.017 |
| | Patsari – LPG | 0.017 | 0.472 |
| Recalentar | Patsari | 0.78 | 0.413 |
| | LPG | 0.793 | 0.631 |
| Tortillas | LPG | 0.254 | 0.404 |
| Nixtamal - agua | Patsari | 0.344 | 0.003 |

Nota: Los P – valor indican si las medias son iguales considerando lo siguiente: P - valor > 0.05 las medias son iguales, P - valor < 0.05 las medias son diferentes, con un nivel de confianza del 95%.

De acuerdo a los resultados de las Tabla 12 se observa que las medias obtenidas en campo y en simulación para $PM_{2.5}$ en LPG (CBC), Patsari, LPG (recalentar), LPG (tortillas) y Patsari (Nixtamal – agua) son iguales, al igual que para CO, en los dispositivos Patsari (CBC), Patsari / LPG (CBC), Patsari (recalentar), LPG (recalentar) y LPG (tortillas), el modelo de zona simple es capaz de predecir concentraciones dentro de los lineamientos de la OMS.

Los conjuntos de datos de las concentraciones intramuros de $PM_{2.5}$ en la estufa Patsari (CBC) y Patsari – LPG (CBC), y para CO en la estufa de gas LP (CBC) y Patsari (Nixtamal – Agua) muestran diferencias significativas en sus medias, estos resultados podrían modificarse si se incrementa la variabilidad de los resultados con pruebas en comunidades que involucren la participación de diferentes cocineras y tipos de cocinas (diferentes volúmenes y tasas de intercambio de aire).

CONCLUSIONES

Adopción y patrones de uso de las estufas.

- El uso combinado de dispositivos y combustibles (stacking) es un patrón muy evidente dentro de las comunidades rurales de Michoacán, México. El stacking permite que los usuarios distribuyan sus principales prácticas de cocinado en estufas eficientes, fogones y estufas de gas LP con diversos propósitos tales como el ahorro de combustible y tiempo de cocinado.
- A pesar de que el gas LP cumple con el objetivo intermedio anual - 1 para $PM_{2.5}$, su uso de forma individual es muy poco frecuente en los hogares posiblemente debido a diversos factores tales como el precio y acceso del combustible.
- El elevado uso del fogón de forma individual dentro de la población sugiere que existen factores tales como la falta de monitoreo y seguimiento en los hogares los cuales llevan al abandono de tecnologías eficientes como las estufas con plancha y chimenea.
- El stacking dominante dentro de los hogares fue el de Patsari-TSF, sin embargo, el mantener el fogón tradicional dentro de la cocina disminuye la calidad del aire interior, incluso por periodos cortos de uso: no se recomienda el uso de este dispositivo, aunque utilizarlo en exteriores puede mejorar la calidad de vida de los usuarios.

Impactos en salud.

- Los resultados muestran que las estufas mejoradas de tipo plancha bien diseñadas como la Patsari cumplen con los lineamientos establecidos por la OMS con lo cual se pueden considerar dispositivos limpios los cuales mejoran la calidad del aire interior de las cocinas de las comunidades rurales.

- Patsari-LPG resultó ser el único tipo de stacking que cumplió con los niveles de PM_{2.5} y CO establecidos con lo cual se puede concluir que el uso combinado de dispositivos eficientes es una opción viable para la reducción significativa de contaminantes intramuros.
- La concentración del aire ambiente de la región donde se lleve a cabo el estudio, es una de las variables cruciales para cumplir con los estándares de la OMS.
- La estufa Patsari presenta una concentración promedio de 21 ± 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{2.5} a 24 h y durante el ciclo de cocinado constante lo cual permite que esté dentro del objetivo intermedio anual - 1 de 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Simulación mediante Modelo de Zona Simple

- El modelo es capaz de predecir concentraciones intramuros dentro de los lineamientos de la OMS para PM_{2.5} y CO y no así para concentraciones producidas por fogones tradicionales y su combinación con otras tecnologías (Patsari y LPG).
- La variabilidad de los resultados podría mostrar medias iguales en los conjuntos de datos de campo y simulación. Incrementar el número de cocineras y el tipo de cocinas.

RECOMENDACIONES

1. Se debe considerar la posibilidad de realizar experimentos empleando diferentes dispositivos como gasificadores, estufas tipo Rocket, otros tipos de estufa tipo plancha además de la Patsari y diferentes tipos de stacking que los evaluados en este estudio, de igual manera se podrían incluir en pruebas futuras el uso de otros combustibles tales como carbón vegetal, pellets, briquetas y biomasa residual (residuos agrícolas y forestales) además de la leña y el gas LP.
2. Los experimentos en cocinas simuladas y en laboratorio contienen un grado de variabilidad con respecto a las condiciones reales dentro de una cocina típica por lo que se recomienda realizar campañas de medición de emisiones IAP en comunidades rurales, es decir dentro de cocinas reales, delimitar un región de estudio y evaluar un número definido de hogares, lo cual se verá reflejado en variables determinantes como volumen de las cocinas, tasa de intercambio de aire, tiempos de cocción y hasta un grado de variabilidad con respecto a las prácticas de cocinado de acuerdo a la usuaria. Estas nuevas campañas podrán validar los resultados de este trabajo de investigación tanto en mediciones reales como en la parte de simulación.
3. Explorar los patrones de uso en otras regiones del país para determinar ciclos de cocción, prácticas de cocinado, tiempos y secuencias que sean útiles para el diseño de investigaciones futuras.
4. Realizar simulaciones empleando otros modelos por ejemplo el modelo de CFD (modelo computacional de dinámica de fluido) el cual involucra ecuaciones que incorporan otras variables tales como el impulso, la energía térmica y la conservación de la masa además del volumen, tasa de intercambio de aire, tasas de emisión y tiempos de cocción para determinar las concentraciones de contaminantes atmosféricos resultantes.

BIBLIOGRAFÍA

- Aprovecho Research Center. (2013). *Instructions for Use of the Indoor Air Pollution Meter (IAP Meter) 5000 Series*. Obtenido de <http://aprovecho.org/wp-content/uploads/2016/03/iap-meter-5000-series-instruction-manual.pdf>
- Armendáriz , C., Edwards, R., Johnson, M., Zuk, M., Rojas, L., Díaz, R., . . . Masera, O. (2008). *Reduction of a Patsari improved cook stove in Michoacan Mexico*. *Indoor Air*, 18: 93-105.
- Armendáriz-Arnez, C., Edwards, R., Johnson, M., Rosas, I., Díaz, R., Riojas-Rodriguez, & Masera, O. (2010). *Indoor particle size distributions in homes with open fires and improved Patsari cook stoves*. *Atmospheric Environment* 44, 2881-2886.
- Berrueta, B., Serrano-Medrano, M., García-Bustamante, C., Astier, M., & Masera, O. (2017). *Promoting sustainable local development of rural communities and mitigating climate change: the case of Mexico's Patsari improved cookstove Project*. *Climate Change*, 140, 63-77.
- Berrueta, V. M., Edwards, R. D., & Masera, O. R. (2008). *Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico*. *Renewable Energy* 33, 859–870.
- Berrueta, V., Serrano-Medrano, M., García Bustamante, C., Astier, M., & Masera, O. (2017). *Promoting sustainable local development of rural communities and mitigating climate change: the case of Mexico's Patsari improved cookstove project*. *Climatic Change*, 140(1), 63-77.
- Cui, S., Cohen, M., Stabat, P., & Marchio, D. (2015). *CO2 tracer gas concentration decay method for measuring air change*. *Building and Environment* 84, 162e169.
- Cumana, I., Gutiérrez, J. P., Miranda, M., Masera, O., & Tavera, A. (2013). *Estufas eficientes de leña*. México, D.F: Terracota .

- Delgado, G. (2009). *Cálculo de la incertidumbre por simulación de Monte Carlo en la determinación de aflatoxina B1 en maní de exportación por HPLC-FD. Aplicación a la evaluación de la conformidad Parte II. Revista Científica de la UNAN, 16 - 26.*
- Díaz, R. (2000). *Consumo de leña en el sector residencial de México. UNAM.*
- Díaz, R., & Masera, O. (2003). *Uso de la leña en México: situación actual, retos y oportunidades. Balance Nacional de Energía.*
- Field, C., Campbell, J., & Lobell, D. (2008). "Biomass energy: the scale of the potential resource". *Trends in Ecology and Evolution, 23(2),65-72, doi:10.1016/j.tree.2007.12.001.*
- García Bustamante, C. A., & Masera Cerutti, O. (2016). *Estado del arte de la bioenergía en México. Guadalajara: Imagia Comunicación S. de RL. de CV.*
- ISO CD 19867-1. (2015). *Clean cookstoves and clean Cooking solutions-Guidance on field testing methods for cookstoves.*
- Johnson, M., Edwards, R., Alatorre, C., & Masera, O. (2008). *In-field greenhouse gas emissions from cookstoves in rural Mexican households. Atmos- Environ., 42, 1206-1222.*
- Johnson, M., Edwards, R., Berrueta, V., & Masera, O. (2010). *New approaches to performance testing of improved cookstoves. Environ. Sci. Technol., 44, 368 - 374.*
- Johnson, M., Lam, N., Brant, S., Gray, C., & Pennise, D. (2011). *Modeling indoor air pollution from cookstove emissions in developing. Atmospheric Environment, 3237-3243.*
- Koppejan, J., & Loo, S. (2008). *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing. London : Earthscan.*

- Masera, O., Arias, T., Ghilardi, A., Guerrero, G., & Patiño, P. (2010). *Estudio sobre la evolución nacional del consumo de leña y carbón vegetal en México 1990 - 2024*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), DF, México.
- Masera, O., 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.
- McKendry, P. (2002). *Energy production from biomass (part 1): overview of biomass*. *Bioresource Technology* 83, 37-46.
- Medina, M. P. (Marzo de 2017). *Tesis de Doctorado. "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"*. División de estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.
- Medina, M. P. (Marzo de 2017). *Tesis de Doctorado. "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"*. División de estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.
- Medina, P., Berrueta, V., Martínez, M., Ruíz, V., R. D., E., & Masera, O. (2017). *Comparative performance of five Mexican plancha-type cookstoves using water boiling tests*. *Development Engineering*, 2, 20-28.
- Medina, P., Berrueta, V., Martínez, M., Ruíz, V., R. D., E., & Masera, O. (2017). *Comparative performance of five Mexican plancha-type cookstoves using water boiling tests*. *Development Engineering*, 2, 20-28.

- OMS. (2006). *Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide.*
- OMS. (2010). *WHO guidelines for indoor air quality selected pollutants.*
- OMS. (2014). *WHO guidelines for indoor air quality: household fuel combustion.*
- Quiroz Carranza, J., & Cantú, G. C. (2012). *El fogón abierto de tres piedras en la península de Yucatán: tradición y transferencia tecnológica. Revista Pueblos y fronteras digital 7(13).*
- REMBIO. (2011). *Cuaderno Temático No. 4. LA BIOENERGÍA EN MÉXICO, Situación Actual y perspectivas.*
- REN21. (2014). *Global Status Report, Paris: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.*
- Rincón Martínez, J. M., & Silva Lora, E. E. (2015). *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad. José María Rincón Martínez, Electo Eduardo Silva Lora.*
- Roth, C. (2014). *Micro-gasification: cooking with gas from dry biomass. An introduction to concepts and applications of wood - gas burning technologies for cooking 2nd revised edition. Deutsche Gesellschaft fur Internatonale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.*
- Ruíz García, V. M. (Junio de 2018). *Tesis de Doctorado. "Evaluación comparativa del desempeño energético, emisiones intramuros y a la atmósfera en diferentes modelos de estufas eficientes de leña". Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.*
- Ruiz, V., & Masera, O. (2018). *Estimating Kitchen PM2.5 and CO Concentrations out of Stove Emissions: The case of Mexican Plancha-type Stoves.*
- Ruíz-García , V., Edwards, R., Ghasemian , M., Berrueta, V., Princevac , M., Vázquez , J., . . . Masera, O. (2018). *Fugitive Emissions and Healt*

- Implications of Plancha-Type Stoves. Environ. Sci. Technol. 52, 10848-10855.*
- Ruiz-Mercado, I., & Masera, O. (2015). Patterns of Stove Use in the Context of Fuel-Device Stacking: Rationale and Implications. Ecohealth, 12(1):42-56.*
- Ruiz-Mercado, I., & Masera, O. (2015). Patterns of Stove Use in the Context of Fuel-Device Stacking: Rationale and Implications. Ecohealth, 12(1):42-56.*
- Ruiz-Mercado, I., Masera Cerutti, O., Zamora, H., & Smith, K. (2011). Adoption and sustained use of improved cookstoves. Energy Policy 39, no. 12, 7557-7566.*
- Ruiz-Mercado, I., Masera, O., Zamora, H., & Smith, K. (2011). Adoption and sustained use of improved cookstoves. Energy policy, 39(12), 7557-7566.*
- SENER . (2014). Balance Nacional de Energía 2013. México: Secretaría de Energía.*
- Serrano-Medrano, M., Arias-Chalico, T., Guilardi, A., & Masera, O. (2014). Spatial and temporal projection of fuelwood and charcoal consumption in Mexico. Energy for Sustainable Development, 19(1), 39-46.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.11.007>.*
- SKC. (2019). SKC Aluminium Cylone. Recuperado el Abril de 2019, de https://www.skcinc.com/catalog/blob_includes/Javapages/225-01-01_Chart.html*
- Smith, K., Dutta, K., Chenappa, C., Gusain, P., Masera, O., Berrueta, V., . . . Naumoff Shields, K. (2007). Monitoring and evaluation of improved biomass cookstove programs for indoor air quality and stove performance: conclusions from the Household Energy and Health Project. Energy for Sustainable Development, 11(2), 5-18.*
- Tinoco, J. C. (2017). Tesis de Maestría. "Determinación de las emisiones intradomiciliarias de los contaminantes CO y PM2.5 por el uso de la estufa*

Patsari, mediante la prueba de ebullición de agua WBT". Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán , México.

University of California-Berkeley. (2005). Standard Operating Procedure. Installing Indoor Air Pollution Instruments in a Home. Obtenido de <http://berkeleyair.com/wp-content/publications/guidelines-for-instrument-placement.pdf>

Winter, J. (2013). Using the Student's t-test with extremely small sample sizes. Practical Assessment Research & Evaluation. 18(10), 1-12.

Yadavar, S. (Abril de 2019). Why A Village In Rajasthan Is Still Using 'Chulha' Over LPG Cylinder. Recuperado el 16 de Junio de 2019, de Bloomberg Quint: <https://www.bloombergquint.com/elections/why-a-village-in-rajasthan-is-still-using-chulha-over-lpg-cylinder>

APÉNDICES

APÉNDICE A

En este Apéndice se hace una descripción completa del protocolo CBC (por sus siglas en inglés), el cual se utilizó para determinar las concentraciones de CO y PM2.5 a 24 horas para diferentes escenarios de stacking y combustibles.

En este estudio se consideró como ciclo de cocinado la práctica de cocinar varios alimentos de manera simultánea y secuencial durante un episodio de encendido y operación de la estufa.

Equipo y material necesario:

- Alimentos y agua: Antes de llevarse a cabo el protocolo se debe asegurar que se cuenta con la cantidad suficiente de alimentos y agua para poder completar el ciclo sin interrupciones.
- Combustible: La cantidad de combustible debe ser la suficiente para realizar todas las tareas comprendidas en el CBC, para ello se consultó con la cocinera la cantidad de leña que típicamente se emplea para la cocción de cada alimento, implícitamente también se considera la estufa a evaluar.
- Medidor de humedad; Protimeter Timbermaster Wood Moisture Meter®.
- Ollas y cacerolas para la cocción: se deben emplear las mismas ollas y cacerolas para la evaluación en cada una de las estufas para evitar errores asociados a las dimensiones, peso y material de las mismas.
- Báscula: Báscula Rhino Ig (sensibilidad de 1g y un pesaje máximo de 10 kg y un mínimo de 20 g) para el pesaje de los alimentos, la leña y el carbón residual. Báscula Tor Rey (sensibilidad de 10 g y un pesaje

máximo de 50 kg y un mínimo de 200g) para el pesaje del agua y del gas LP.

- Cronómetro.
- Guantes resistentes al calor.
- Termómetro digital: para registrar la temperatura ambiente y la temperatura del agua.
- Bandeja de metal para realizar el pesaje del carbón residual.
- Recogedor para hacer posible la transferencia del carbón residual.
- Pala de metal para poder remover la aberturas del comal principal.
- Mascarilla de protección.

Procedimiento:

1. Primeramente se deben de definir las tareas a realizar considerando el tipo de alimentos que se consumen con regularidad en la comunidad rural. Se pueden incluir uno o más platillos evitando alimentos con grado de complejidad por cuestiones de tiempo, posteriormente los probadores y la cocinera define la cantidad de comida que es representativa de la comida de una familia típica en un día normal, todo esto con el fin de lograr pruebas uniformes y evitar interrupciones debido a insuficiencias en la cantidad de alimentos.
2. Una vez seleccionadas las tareas, el procedimiento debe ser descrito de manera que sea entendible y claro para probadores como para la cocinera, esto con el fin de que cada prueba se lleve a cabo de forma idéntica en cada estufa. Una vez que se ha obtenido la cantidad de combustible y alimentos necesarios y está perfectamente claro para todos los participantes la prueba puede comenzar. Los alimentos

deben de ser preparados por una cocinera local la cual debe estar familiarizada con la comida que se preparará y con la estufa a evaluar. Si la estufa es un nuevo diseño que difiere significativamente con el procedimiento tradicional de cocinado será necesario efectuar algún entrenamiento o prueba piloto para la familiarización de la cocinera y la estufa.

3. Registrar las condiciones locales (temperatura y velocidad del viento) de acuerdo al formato de registro de datos.
4. Realizar todas las preparaciones previas (lavado, pelad, corte, etc.) y pesar todos los alimentos y registrar en el formato de datos.
5. Iniciar con un pre-pesado de combustible que es aproximadamente el doble de la cantidad que las personas locales consideran necesario para completar la tarea de cocina. Posteriormente medir la humedad seleccionando tres leños al azar. Registrar en el formato de datos.
6. El tiempo de la prueba inicial en el momento en el cual la cocinera enciende el fuego de manera que lo hace regularmente y enciende la estufa. Se inicia el cronómetro y se registra el tiempo en el formato de datos.
7. Mientras la cocinera realiza la tarea correspondiente el probador registra las observaciones, el procedimiento de la cocinera y comentarios relevantes.
8. Cada vez que finaliza una tarea, se registra en el formato de datos.
9. Retirar la olla(s) de la comida de la estufa y pesar cada olla con su comida en la báscula. Registrar el peso en gramos en el formato de datos.

10. Retirar la madera quemada por el fuego y extinguirlo de ser necesario. Eliminar el carbón en los extremos de la madera no quemada. Pesar la madera no quemada con la madera restante del paquete inicial. Colocar todo el carbón en la bandeja designada y pesarla. Registrar todas las mediciones en el formato de datos.
11. La prueba está completa (cada estufa debe ser probada al menos 3 veces).

APÉNDICE B

En este apéndice se explica el procedimiento de elaboración de cada una de las tareas de cocinado comprendidas dentro del CBC de este trabajo de tesis.

Hervir 1 kg de frijoles: *Ingredientes:* 1 kg de frijoles crudos previamente remojados, 6 l de agua y sal. *Procedimiento:* Los frijoles se cocieron en una olla de aluminio, la cocinera agregó agua y dejó hervir y posteriormente añadió el frijol, siguió añadiendo agua cuando lo consideró necesario y la cocción terminó de acuerdo a la textura del frijol. El frijol se cocina después de ~ 3.5 horas.

Sopa de arroz: *Ingredientes:* 0.5 kg de arroz, 0.5 l de agua y una mezcla de jitomates, cebolla, ajo y sal previamente molidos. *Procedimiento:* Freír el arroz en una cacerola con aceite aproximadamente 10 minutos a alta potencia, posteriormente la cocinera agrega la mezcla y agua cuando considera necesario, toda la mezcla comienza a hervir y la potencia de cocción se reduce para mantener la ebullición. La sopa de cocina después de ~ 1 hora.

Tortillas: *Ingredientes:* 3 kg de masa para tortillas. *Procedimiento:* Se debe hervir previamente el maíz para posteriormente molerlo y obtener la masa. Se emplea un metate (piedra cuadrada que se usa en zonas rurales de México para moler maíz) para el amasado y la elaboración de las tortillas.

Freír 5 piezas de huevo: *Ingredientes:* 5 piezas de huevo, aceite y sal. *Procedimiento:* Calentar aceite sobre una cacerola durante 5 minutos y posteriormente verter el huevo para que se cocine añadiendo sal al gusto de la cocinera.

Freír 0.5 kg de frijol: *Ingredientes:* 0.5 kg de frijol previamente hervido y aceite. *Procedimiento:* Calentar aceite sobre una cacerola durante 15 minutos en potencia alta y posteriormente verter frijol para que se cocine hasta alcanzar la textura deseada.

Hervir 1 l de agua: *Ingredientes:* 1 l de agua. *Procedimiento:* El agua se coloca dentro de un recipiente de aluminio a alta potencia y culmina cuando se alcanza el punto de ebullición.

Preparar nixtamal: *Ingredientes:* 2 kg de nixtamal, 0.05 kg de cal y agua. *Procedimiento:* La mezcla de agua y cal se coloca dentro de la cacerola de aluminio hasta lograr la ebullición a alta potencia, posteriormente se agrega el nixtamal, en esta parte se cocina a baja potencia. El nixtamal se cocina después de ~ 45 minutos.

Agua para baño: *Ingredientes:* 20 l de agua. *Procedimiento:* Colocar el agua dentro de una cacerola, calentar a alta potencia hasta llegar a los 35° C.



Figura 20. Alimentos tradicionales realizados en el CBC.

APÉNDICE C

En este Apéndice se hace una descripción completa del Procedimiento de Operación Estándar (University of California-Berkeley, 2005) el cual se utilizó para la colocación de los IAP y los trenes de muestreo dentro de la cocina simulada.

Para la instalación de los instrumentos que miden la contaminación del aire interior (IAP) se deben considerar diversos factores:

- Habitaciones de forma irregular
- Materiales de construcción
- Diferentes tipos de estufas y su ubicación
- Seguridad dentro del hogar

Debido a esto se deben colocar los equipos de forma estandarizada, es decir usar pautas de instalación durante las pruebas de medición, se debe recordar que los contaminantes se estratifican verticalmente por lo que las concentraciones aumentan considerablemente al aumentar la altura en una habitación. El seguimiento de los procedimientos estándar permite la comparación de mediciones dentro y entre los hogares y la presentación de resultados de manera científicamente creíble.

ESTANDARIZACIÓN DE LA ALTURA DE LOS MUESTREADORES IAP

En los siguientes apartados se proporcionan las pautas específicas de la instalación de los IAP, se recomienda instalar los instrumentos en una pared de la sala interior debido a la facilidad y practicidad en comparación con colgarlos en medio o en el techo (el cual no es un área representativa de las zonas de respiración de los miembros de la familia).

Pautas generales de colocación

1. Colocar los instrumentos IAP aproximadamente a **1 m** de la zona de combustión de la estufa donde se lleva a cabo la cocción principal. Ésta distancia debe ser medida como la línea horizontal más corta posible (es decir paralela al piso, desde el borde más cercano de la zona de combustión a la pared debajo de donde el monitor debe ser colocado).
 - 1.1 Registre la distancia real en el formato de datos de muestreo.
 - 1.2 Colocar los instrumentos demasiado cerca del fuego puede ser perjudicial ya que los equipos no toleran temperaturas extremas.
 - 1.3 Ésta distancia de la estufa se aproxima al borde del área de cocinado activa.
2. Coloque los instrumentos a **1.45 m** sobre el suelo.
 - 2.1 Registre la distancia real en el formato de datos de muestreo.
 - 2.2 Ésta altura se relaciona con la altura de respiración del usuario.
 - 2.3 El piso se define como el punto más bajo predominante de la cocina.
 - 2.4 Es necesaria una altura estándar para la colocación del monitor debido a la estratificación vertical de los contaminantes al interior.
3. Coloque los instrumentos IAP a una distancia de al menos **1.5 m** (horizontalmente) de puertas y ventanas que se pueden abrir.
4. Todos los instrumentos deben colocarse en un lugar relativamente seguro para minimizar el riesgo de interrumpir las actividades domésticas.

5. Realice un bosquejo detallado de la cocina donde se muestren las posiciones de los IAP, la estufa, puertas y ventanas principales, esto es importante en caso de efectuarse la medición más de una vez. El boceto debe contener los detalles suficientes para detectar algún cambio en la posición del lugar de cocción (estufa) dentro de la cocina durante el periodo.

5.1 Si se realiza un estudio de “antes y después”, es decir si la posición de la estufa ha cambiado dentro, y se han producido cambios importantes en la habitación, los criterios originales deben aplicarse para elegir una nueva posición para los instrumentos y realizar la anotación correspondiente al formato de muestreo.

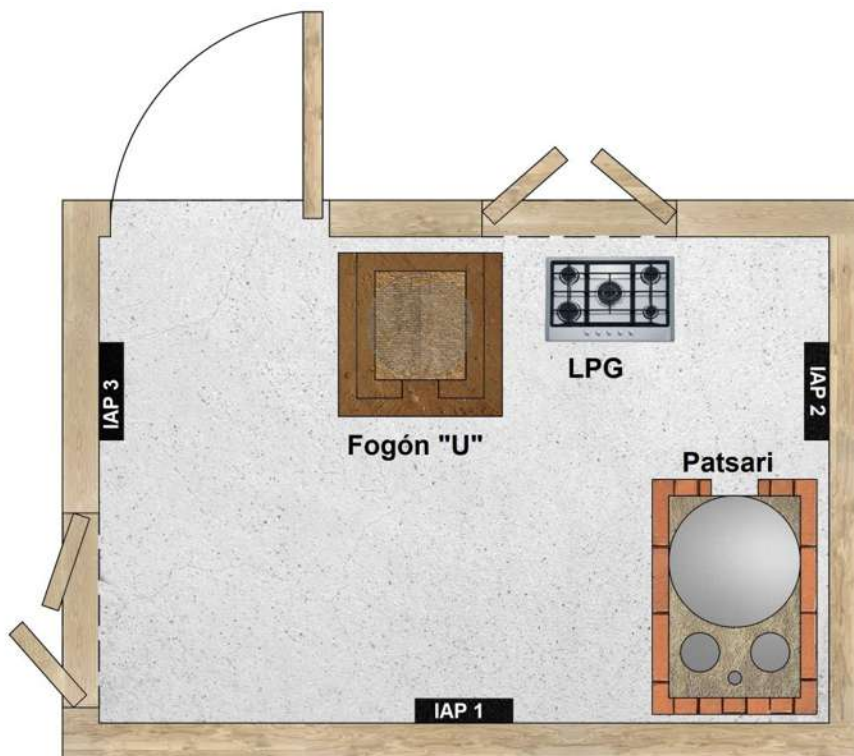


Figura 21. Bosquejo de la distribución de los IAP dentro de la cocina.

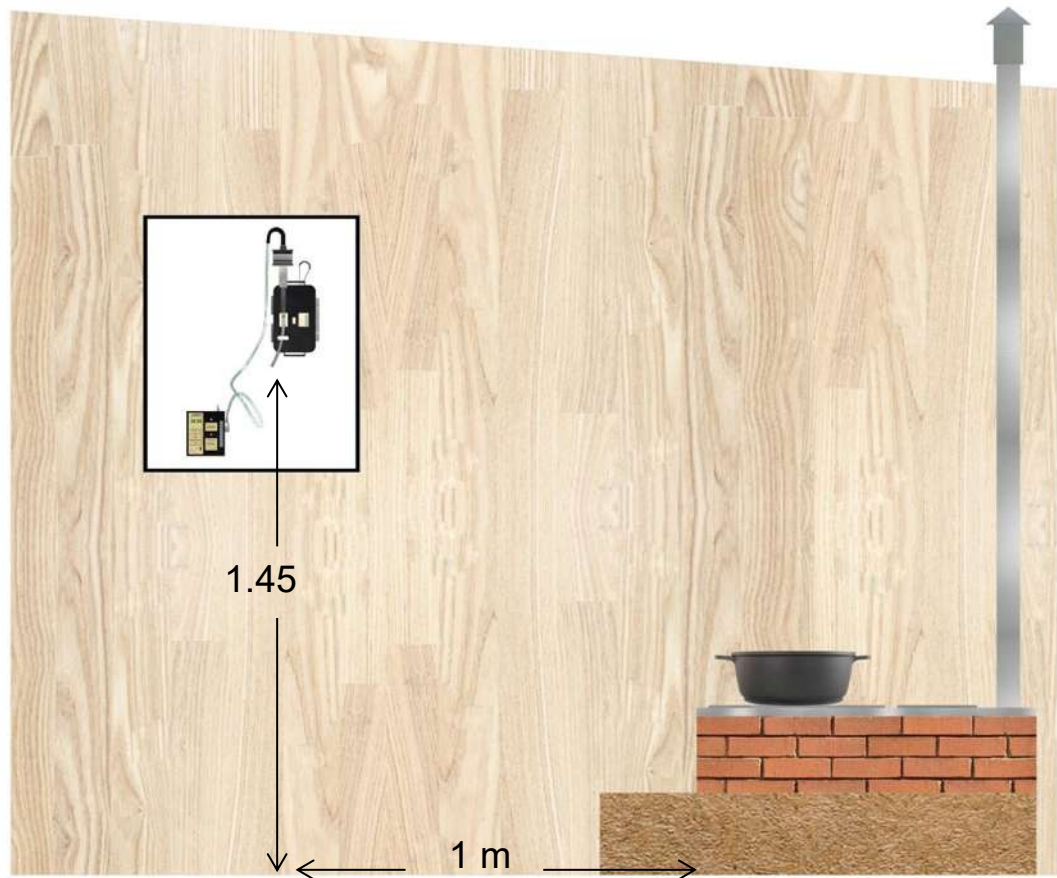


Figura 22. Adecuación del protocolo de Berkeley 2005.

APÉNDICE D

En este Apéndice se describe el procedimiento que establece los criterios con los cuales debe de efectuarse el manejo y pesado de filtros para la determinación de Material Particulado con diámetro aerodinámico igual a $2.5 \mu\text{m}$ en emisiones generadas durante la combustión de biomasa en dispositivos de cocción para determinar su ganancia neta de peso (masa), así como los equipos e instrumentos necesarios para efectuar el presente procedimiento, señalando los cuidados necesarios que se deben tomar desde el inicio hasta el término del mismo. Cada filtro es pesado en el laboratorio bajo condiciones de humedad y temperatura controladas, antes y después de la recolección de la muestra. La determinación gravimétrica de $\text{PM}_{2.5}$ se realiza para emisiones en chimenea que van al ambiente y emisiones que se mantienen en el área del dispositivo (intramuros) producidas por dispositivos de cocción que utilizan biocombustibles sólidos.

Material y reactivos:

- Patrones de masa para verificación con una clase de exactitud E2 según la OIML R111 marca Sartorius YCS011-352-00 de 1mg a 5 g.



Figura 23. Masas estándar.

▪

- Filtros de fibra de vidrio o teflón con diámetro de 37 mm y tamaño de poro de 1 μ m.



Figura 24. Filtros de 37 mm.

- Cassettes porta filtros.
- Cámara de acondicionamiento y equilibrio de filtros.
- Pinzas no dentadas.
- Guantes libres de polvo.
- Toallas desechables para laboratorio.
- Metanol

Equipo:

- Micro balanza electrónica Mettler – Toledo XPR10 con una resolución máxima de 10.1 g, resolución mínima de 0.001 mg (i.e; 1 μ g) y precisión de \pm 0.001 mg.



Figura 25. Micro balanza electrónica.

- Neutralizador antiestática Sartorius-pen YSTP01.



Figura 26. Neutralizador antiestática.

Blanco de laboratorio: Son filtros de referencia no expuestos y limpios, que se utilizan para determinar la estabilidad del peso del filtro durante largos períodos de tiempo, los cuales pueden ser afectados por la volatilización del material del filtro o la absorción de materiales gaseosos de la atmosfera. Se acondicionan durante 24 h y se pesan semanalmente y se almacenan en la cámara de acondicionamiento.

Calibración y verificación de los equipos: La calibración de la microbalanza se verificará durante cada sesión de pesaje. Las masas estándares de referencia (50 y 100 mg debido a que el peso típico de los filtros de 57mm es de entre 60 y 70 mg) se pesarán rutinariamente en cada sesión de pesaje.

METODOLOGÍA

Generalidades

- Condiciones del área de pesado: se debe de mantener una temperatura entre $20 - 23 \pm 2$ °C por lo menos 24 h antes del pesado de filtros y una humedad relativa entre $30 - 40 \pm 5\%$. Los valores de humedad pueden subir, pero nunca deben de ser menos del 20%.
- Limpieza: el laboratorio debe mantenerse limpio y libre de polvo, la mesa donde se encuentra la balanza debe limpiarse con una toalla húmeda, las pinzas para el manipuleo de filtros deben ser limpiadas con metanol y durante el pesado se deben usar guantes para evitar que la grasa presente en los dedos sea transferida a las pinzas y posteriormente al filtro.
- Inspección y acondicionamiento de los filtros: verificar defectos o irregularidades (manchas, agujeros etc.), los filtros deben ser acondicionados en la sala pesado dentro de la cámara libre de humedad durante al menos 24 h antes de ser pesados tanto para el pesaje inicial como final. Para evitar desestabilizaciones debidas a la

acumulación de cargas eléctricas superficiales en el filtro, cada filtro debe pasar a través de la unidad des-ionizante, la cual elimina la carga estática y evita que éstos no se estabilicen durante el pesado. Los mismos filtros deben ser pesados por el mismo operador que realizó el pesado inicial (filtros limpios). Debido a que el peso de los filtros puede variar según el operador analista.

- Manejo de los filtros: Una vez que los casetes portafiltro salen del cuarto de pesado no deben ser abiertos hasta el momento de realizar el muestreo, una vez que las muestras se han recogido, se deben almacenar con el lado de las partículas (hollín) hacia arriba. Para el transporte y manejo de filtros en campo se deben seguir las siguientes recomendaciones: su transporte no debe exceder las 24 h, los operadores de campo suministrarán de contenedores de transporte aislado y bolsas de gel como sustituto de hielo para mantener la temperatura de filtros a menor de 25 °C durante el envío de nuevo al laboratorio de pesado.

Pasos generales a seguir para el pesado de filtros

1. Calibre la balanza con las masas estándar para obtener resultados de pesaje precisos.
2. Lleve la balanza a cero.
3. Pase el filtro cerca del des-ionizador durante 30 – 60 segundos inmediatamente antes del pesaje.
4. Pese el filtro operando la balanza de acuerdo a las instrucciones del fabricante. (cada filtro debe ser pesado 5 veces). Registre los valores, acepte los pesos si los valores pesados están dentro de 2 microgramos (0.0000020); De lo contrario, pese el filtro una vez más y acepte las mediciones más cercanas Si los valores no se

encuentran dentro de rango tome las medidas correctivas adecuadas.

5. Entre cada pesaje vuelva a cero.

APÉNDICE E

En este apéndice se presentan los parámetros de entrada al MZS para tareas individuales.

Tabla 13. Parámetros de entrada al MZS para estufas de gas LP durante la tarea de hacer tortillas.

| Dispositivo | Parámetros | Unidad | Promedio | SD | Min | Max |
|-------------|--------------------------------------|--------|----------|------|-----|------|
| LPG | Tasa de emisión (CO) | mg/min | 34 | 1.83 | 32 | 35.6 |
| | Tasa de emisión (PM _{2.5}) | mg/min | 1.2 | 0.1 | 1.1 | 1.2 |
| | Tiempo | min | 53 | 3 | 50 | 58 |

Tabla 14. Parámetros de entrada al modelo para Patsari y Fogón "U" durante la tarea de Nixtamal y calentar agua para baño.

| Dispositivo | Parámetros | Unidad | Promedio | SD | Min | Max |
|-------------|-------------------------------------|--------|----------|--------|------|------|
| Patsari | Emissions rate (CO) | mg/min | 11 | 1 | 10 | 12 |
| | Emissions rate (PM _{2.5}) | mg/min | 4.5 | 0.1 | 4.4 | 4.6 |
| | Time | min | 57 | 8 | 46 | 66 |
| Fogón "U" | Emissions rate (CO) | mg/min | 2066 | 123.57 | 1915 | 2160 |
| | Emissions rate (PM _{2.5}) | mg/min | 246 | 8 | 240 | 255 |
| | Time | min | 54 | 12 | 34 | 64 |

APÉNDICE F

En este apéndice se presentan los valores promedio de concentración obtenidos en campo y en simulación los cuales fueron comparados estadísticamente mediante la prueba t para la validación del MZS.

Tabla 15. Concentración promedio de PM_{2.5} y CO obtenidos en campo y simulación durante el CBC, empleados para la prueba t

| Tarea | Dispositivo / Stacking | PM _{2.5} (µg/m ³) | | CO (mg/m ³) | |
|-------|------------------------|--|------------|-------------------------|------------|
| | | Campo | Simulación | Campo | Simulación |
| CBC | Patsari | 17 | 34.8 | 2.3 | 1.2 |
| | | 21 | 34.8 | 1.9 | 1.1 |
| | | 14 | 33.2 | 2.0 | 1.2 |
| | | 35 | 34.8 | 1.1 | 1.1 |
| | | 20 | 35.1 | 1.3 | 1.1 |
| | LPG | 11 | 22.8 | 0.8 | 0.5 |
| | | 20 | 23.0 | 0.8 | 0.5 |
| | | 22 | 22.6 | 0.6 | 0.5 |
| | | 21 | 23.1 | 0.7 | 0.5 |
| | | 15 | 24.3 | 1.1 | 0.5 |
| | Patsari / LPG | 29 | 32.8 | 2.9 | 2.4 |
| | | 19 | 32.2 | 2.9 | 2.3 |
| | | 24 | 32.5 | 2.7 | 2.3 |
| | | 28 | 31.8 | 3.2 | 2.3 |
| | | 19 | 32.2 | 1.3 | 2.3 |

Tabla 16. Concentración promedio de PM_{2.5} y CO obtenidos en campo y simulación durante tareas individuales, empleados para la prueba t

| Tarea | Dispositivo / Stacking | PM _{2.5} (µg/m ³) | | CO (mg/m ³) | |
|-----------------|------------------------|--|------------|-------------------------|------------|
| | | Campo | Simulación | Campo | Simulación |
| Recalentar | Patsari | 16 | 19.9 | 1.3 | 1.1 |
| | | 23 | 20.0 | 1.6 | 1.1 |
| | | 8 | 20.4 | 1.7 | 1.1 |
| | | 35 | 20.3 | 0.7 | 1.1 |
| | | 13 | 20.1 | 0.9 | 1.1 |
| | LPG | 7 | 14.7 | 0.2 | 0.2 |
| | | 18 | 14.7 | 0.2 | 0.2 |
| | | 17 | 14.8 | 0.1 | 0.2 |
| | | 17 | 14.7 | 0.2 | 0.2 |
| | | 11 | 14.8 | 0.7 | 0.2 |
| Tortillas | LPG | 12 | 15.8 | 0.3 | 0.3 |
| | | 21 | 16.0 | 0.3 | 0.3 |
| | | 21 | 16.1 | 0.2 | 0.3 |
| | | 23 | 15.9 | 0.3 | 0.3 |
| | | 16 | 16.1 | 0.7 | 0.3 |
| Nixtamal - agua | Patsari | 20 | 25.8 | 1.4 | 1.2 |
| | | 35 | 25.9 | 1.5 | 1.2 |
| | | 21 | 24.6 | 1.6 | 1.2 |
| | | 18 | 25.9 | 1.4 | 1.2 |
| | | 16 | 25.7 | 1.4 | 1.2 |