



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

TEMA
EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO, EMISIONES
INTRAMUROS Y A LA ATMOSFERA DE DIFERENTES MODELOS DE ESTUFAS
EFICIENTES DE LEÑA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
VÍCTOR MANUEL RUIZ GARCÍA

TUTOR PRINCIPAL
OMAR RAÚL MASERA CERUTTI, INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS
Y SUSTENTABILIDAD

COMITÉ TUTOR
VÍCTOR MANUEL BERRUETA SORIANO, ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS
SUPERIORES
CARLOS ALBERTO GARCÍA BUSTAMANTE, ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS
SUPERIORES
JOSÉ NÚÑEZ GONZÁLEZ, ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES
ALBERTO BELTRÁN MORALES, INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

MÉXICO, CDMX JUNIO 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Víctor Manuel Berrueta Soriano

Secretario: Dr. Carlos Alberto García Bustamante

Vocal: Dr. Omar Raúl Masera Cerutti

1^{er} suplente: Dr. José Núñez González

2do suplente: Dr. Alberto Beltrán Morales

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad de México

TUTOR DE TESIS

Dr. Omar Raúl Masera Cerutti

FIRMA

Dedicatoria

A mi madre, Laura.

Agradecimientos

Institucionales

Agradezco en primer lugar a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), así como a la Facultad de Ingeniería (FI) 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, al Laboratorio de Innovación y Evaluación de Estufas de Biomasa (LINEB) y al Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada (GIRA) por el apoyo para realizar la experimentación que sustenta esta tesis. También agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero brindado a lo largo de mi formación académica para obtener el grado de doctor, y agradezco el apoyo del Fondo de Sustentabilidad Energética a través del proyecto SENER CONACYT 2014 246911 Clúster de Biocombustibles Sólidos para la Generación Térmica y Eléctrica por las facilidades otorgadas.

Quiero agradecer particularmente al Dr. Omar Masera 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 diversos proyectos que fortalecieron mi formación académica. Así como a los miembros de comité de revisión, al Dr. Víctor Berrueta, al Dr. Alberto Beltrán, al Dr. Carlos García y al Dr. José Núñez por aceptar ser parte del proceso de evaluación.

Agradezco al personal del Laboratorio de Bioenergía y de la Unidad de Ecotecnologías, especialmente a los técnicos académicos M. en C. René D. Martínez Bravo y M. I. Alfredo F. Fuentes Gutiérrez por el soporte técnico para el desarrollo de la experimentación, insumo necesario para llevar a cabo esta tesis. También agradezco al personal del IIES especialmente al equipo de la unidad de Tecnologías de la Información y Comunicaciones integrado por la Ing. Atzimba López Maldonado, el M. I. Alberto Valencia García y el Dr. Heberto Ferreira Medina por todo el apoyo técnico y la infraestructura otorgada. También quiero agradecer a los técnicos académicos M. en C. Yolanda García Rodríguez y a la M. en C. Maribel Nava Mendoza, por la ayuda en logísticas relacionadas con pruebas experimentales en laboratorio. Así mismo, agradezco al personal administrativo del IIES por su disposición y apoyo en la parte administrativa.

Personales

Agradezco a mi esposa Laura por todo el apoyo brindado durante este proceso, por alentarme en cada momento, por comprender mis ausencias, y por estar incondicionalmente siempre a mi lado.

También agradezco a mis hijos Diego y Víctor, que son una motivación y una inspiración en mi vida, y que de una manera tan inocente e ingenua siempre me alegran cada día.

A todas aquellas personas con las que inicié una relación profesional y que ahora considero mis amigos: Alfredo, René, Vanesa, Sarai, Dante, Juan Carlos, Paulo, Minerva, Myriam, Marcela, Belén, Raúl, Montserrat, Emilio, Ana Laura, Carlos, Alberto, José, Cynthia y muchos otros. Agradezco adicionalmente a Sara, Juan Carlos, Dante y Minerva por su apoyo en la fase final de mi formación.

A Omar y Víctor, quienes han compartido sus conocimientos en el tema y quienes han sido pilares fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

A mí madre Laura y a mi hermana Lizbeth, por estar siempre al pendiente de mis avances y por su motivación.

A mí padre Víctor y a mi abuela Guadalupe, quienes dejaron inculcados en mí muchos valores que me han llevado hasta aquí.

CONTENIDO

Dedicatoria	3
Agradecimientos	4
Lista de Figuras	9
Resumen	11
Introducción	13
OBJETIVOS	18
1 MARCO TEÓRICO	19
1.1 Uso de la biomasa a nivel internacional y nacional	19
1.2 Estándares internacionales para la evaluación de estufas de biomasa	19
1.3 Estimación de concentraciones intramuros	21
2 METODOLOGÍA	22
2.1 Descripción de las estufas evaluadas	22
2.2 Protocolos de evaluación	23
2.2.1 Prueba de ebullición de agua (WBT, por sus siglas en inglés)	23
2.2.2 Prueba de Cocinado Controlado (CCT, por sus siglas en inglés)	25
2.2.3 Protocolo de Perfil de Temperatura (PPT)	26
2.3 Desempeño energético en estufas con plancha que funcionan con leña	27
2.3.1 Determinación de la distribución de calor en la plancha	27
2.3.2 Determinación de la temperatura, oxígeno y monóxido de carbono en el interior de la estufa	28
2.3.3 Determinación de la eficiencia térmica	30
2.4 Medición de emisiones de estufas de leña en laboratorio	33
2.4.1 Captura de gases y aerosoles: doble campana	33
2.4.2 Medición de emisiones en la chimenea	36
2.4.3 Medición de emisiones Intramuros	40
2.4.4 Emisiones totales	41
2.4.5 Estimaciones de las concentraciones intramuros mediante el uso del modelo de zona simple	42
3 RESULTADOS	47
3.1 Desempeño energético en estufas de leña	47

3.1.1	Distribución de calor en la plancha de la estufa	47
3.1.2	Determinación de la temperatura, oxígeno y monóxido de carbono en el interior de la estufa	52
3.1.3	Eficiencia térmica	56
3.2	Emisiones de estufas de leña en laboratorio	58
3.2.1	Factores de emisión en la chimenea	58
3.2.2	Factores de emisión Intramuros	61
3.2.3	Factores de emisiones totales	65
3.3	Estimaciones de concentraciones intramuros mediante el modelo de zona simple	66
4	CONCLUSIONES	71
5	REFERENCIA	73
6	ANEXOS	80
	ANEXO A. Procedimiento técnico para medición de emisiones en dispositivos de generación de calor de baja potencia para tareas de cocción que funcionan con biomasa	80
1.	OBJETIVO	80
2.	DEFINICIONES Y ABREVIATURAS	80
3.	FUNDAMENTO/GENERALIDADES	81
4.	MATERIALES, EQUIPOS Y REACTIVOS	82
4.1	Materiales y equipos	82
4.2	Sistema de medición de emisiones	84
5.	DESARROLLO DEL MÉTODO	87
6.	DIAGRAMA DE FLUJO	93
	ANEXO C. Comparative performance of five Mexican plancha-type cookstoves using water boiling tests	122
	ANEXO D. Closing the gap between lab and field cookstove test: Benefits of multi-pot sequencing cooking tasks through controlled burning cycles	131

Lista de Tablas

Tabla 1. Indicadores (Tiers) y parámetros del IWA.	20
Tabla 2. Temperaturas en comales y chimenea de la estufa Patsari medidas mediante la cámara termográfica.	48
Tabla 3. Validación de temperaturas medidas en el comal principal de la estufa Patsari.	49
Tabla 4. Secuencia termográfica en la estufa Patsari, incluyendo el comal principal, los comales secundarios y la chimenea.	51
Tabla 5. Secuencia termográfica del comal principal en la estufa Patsari.	52
Tabla 6. Eficiencia Térmica (%) usando diferentes tipos de recipientes y áreas de transferencia de calor, en una prueba WBT utilizando la estufa Patsari.....	57
Tabla 7. Tasas de emisión PM _{2.5} en la chimenea para diferentes modelos de estufas..	58
Tabla 8. Concentraciones de aerosoles carbonosos (EC, OC y CN) en pruebas WBT y CCT en la estufa Patsari.	59
Tabla 9. Tasas de emisión CO en la chimenea para diferentes modelos de estufas.....	60
Tabla 10. Factores de emisiones de Metano e hidrocarburos en una prueba WBT y CCT en la estufa Patsari	61
Tabla 11. Tasas de emisión PM _{2.5} intramuros para diferentes modelos de estufas.	62
Tabla 12. Tasas de emisión CO intramuros para diferentes modelos de estufas.	63
Tabla 13. Indicadores (Tiers) para las tasas de emisiones intramuros de monóxido de carbono (CO) y material particulado (PM _{2.5}) en cuatro modelos de estufas con chimeneas.....	63
Tabla 14. Factores de emisiones de cuatro modelos de estufas en la prueba WBT.	64
Tabla 15. Tasas de emisión PM _{2.5} (mg min ⁻¹) totales para diferentes modelos de estufas.	65
Tabla 16. Tasas de emisión CO (mg min ⁻¹) totales para diferentes modelos de estufas.	66
Tabla 17. Fracciones de contaminantes intramuros (CO y PM _{2.5}) respecto a las emisiones totales de los diferentes modelos de estufas.	67
Tabla 18. Parámetros de entrada al modelo de zona simple.....	67

Tabla 19. Resumen de las concentraciones en el cuarto de cocinado estimadas con el modelo de zona simple, así como el porcentaje de simulaciones que cumplen con las directrices de la OMS sobre calidad del aire para cuatro modelos de estufas. 69

Lista de Figuras

Figura 1. Estufas evaluadas: Ecostufa (a), Mera-Mera (b), ONIL (c) y Patsari (d). Créditos de la Figura: Paulo Medina.....	23
Figura 2. Diagrama WBT 4.2.4 (Elaboración propia).....	24
Figura 3. Diagrama prueba de cocinado controlado (Elaboración propia).....	26
Figura 4. Diagrama del perfil de temperatura, usando un comal redondo como ejemplo (Elaboración propia).	27
Figura 5. Medición de temperatura en la superficie de los comales de una estufa con chimenea (Elaboración propia).	28
Figura 6. Medición de temperatura y concentraciones (monóxido de carbono y oxígeno) en el gas exhausto de una estufa con plancha y chimenea (Elaboración propia). 30	
Figura 7. Diferentes recipientes utilizados en la prueba WBT para maximizar la transferencia de calor y determinar la máxima eficiencia térmica que presenta una estufa de leña con plancha. Ollas de aluminio (a), Comal-olla (b) y Ollas de Mylar (c). Créditos de figura: Víctor Ruiz.	31
Figura 8. Diagrama de medición de emisiones totales (izquierda) y diagrama de medición de emisiones en la chimenea (derecha), (Elaboración propia).....	34
Figura 9. Diagrama de la doble campana (Elaboración propia).....	35
Figura 10. Ciclón PM _{2.5} y CN a una misma bomba (modificada de Aprovecho Research).	37
Figura 11. Cocina Simulada. Créditos de la Figura: Víctor Ruiz.....	44
Figura 12. Temperaturas en comales y chimenea de la estufa Patsari.	49
Figura 13. Validación de temperaturas medidas en el comal principal de la estufa Patsari.	50
Figura 14. Medición de la temperatura (°C) y del oxígeno (%) en diferentes puntos internos de la estufa Patsari.....	55

Figura 15. Mediciones de monóxido de carbono (ppm) y oxígeno (%) en la chimenea de la estufa Patsari.....	56
Figura 16. Indicadores (Tiers) de eficiencia térmica (%) en alta y baja potencia, Estufa Patsari.....	57
Figura 17. Indicadores (Tiers) de material particulado (PM _{2.5}) y monóxido de carbono (CO) intramuros de cuatro modelos de estufa con chimenea. Nota: Los círculos negros representan el promedio de la fase de inicio frío y caliente en alto poder de la prueba de ebullición de agua, mientras que los círculos blancos representan bajo poder.	64
Figura 19. Distribución de las concentraciones de Material Particulado (PM _{2.5}).....	70
Figura 20. Distribución de las concentraciones de Monóxido de Carbono (CO).....	71

Resumen

El uso de biocombustibles sólidos (BCS) para satisfacer necesidades energéticas como cocción, y calefacción representa el 87% de la bioenergía usada en el mundo. El uso sustentable de la biomasa contribuye para alcanzar las metas nacionales y globales de mitigación del cambio climático y de transición energética. El uso de BCS en dispositivos más eficientes busca mejorar su desempeño energético e incrementar los beneficios a la salud mientras disminuye los impactos al ambiente. En esta investigación se muestran resultados sobre mediciones de eficiencia térmica, emisiones intramuros y totales, evaluados en dispositivos de generación de calor de baja potencia para aplicaciones residenciales, específicamente en tareas de cocción. Por otro lado, también se contribuye a robustecer protocolos internacionales de evaluación que metodológicamente presentan huecos, tales como la prueba de ebullición de agua que no contempla estufas con plancha (comal) y, el apartado de emisiones (contemplado en pruebas de ebullición de agua, cocinado controlado y no controlado) que no involucra la medición de emisiones fugitivas (intramuros) de estufas con chimenea. Respecto al tema de emisiones, anteriormente no existían evaluaciones en diversos dispositivos que mostraran contaminantes diferentes al monóxido y bióxido de carbono, y que además desglosaran las emisiones en fugitivas, chimenea y totales. Esta investigación propone una prueba de evaluación del perfil de temperatura interno y externo que incluya monitoreo de emisiones en uno o varios puntos del gas exhausto al interior del dispositivo (cámara de combustión hasta chimenea). Para el caso de la estufa Patsari se muestra que la concentración de oxígeno decrece (en ocasiones hasta 10%) mientras que la de monóxido de carbono aumenta (con picos de hasta 5000 ppm). Estos parámetros muestran los instantes en que la combustión tiene una entrada de aire primario tan pobre que no alcanza la cantidad de oxígeno teórico para realizar una reacción de combustión completa.

Para el caso de la evaluación de desempeño energético, la transferencia de calor en una prueba de ebullición de agua incrementa mediante el uso de los recipientes Mylar y comal-olla. Lo anterior provoca que la eficiencia térmica incrementa 3 magnitudes (35%) respecto al uso de recipientes convencionales usados en estufas con plancha (con desempeños muy pobres, ~10%), cuyo diseño está enfocado a cocinar tortillas y otros alimentos, y no a hervir agua.

Respecto a evaluación de emisiones, esta investigación muestra los trenes de muestreo diseñados para poder capturar y medir en paralelo emisiones fugitivas y en la chimenea. Las tasas de emisión fugitivas estimadas con el método convencional, colocan a las estufas con chimenea en indicadores (Tier) muy bajos (cero). Las emisiones fugitivas medidas representan 5% para $PM_{2.5}$ and 1% para CO de las emisiones totales. Las estufas con chimenea evaluadas tienen una tasa de emisión intramuros con indicadores de 3 y 4 (estufas consideradas como limpias). Lo anterior evidencia que la recomendación de que, el $25 \pm 10\%$ de las emisiones totales entran al cuarto de cocinado (OMS, 2014) esta sobrestimada, y no refleja el desempeño real de este tipo de estufas. Por otro lado, las tasas de emisión medidas, se estima que producen una concentración promedio en la cocina por debajo de las concentraciones de $PM_{2.5}$ (concentraciones promedio anuales, Objetivo Intermedio 1) y CO (AQG 24-h) de las Guías de Calidad del Aire (AQG) de la OMS. El uso combinado de estufas con chimeneas que utilizan leña y de las estufas que utilizan gas podría evitar la contaminación en el interior de los cuartos de cocinado.

El metano es el principal hidrocarburo presente en las reacciones de combustión realizadas en la estufa Patsari. Sus contribuciones son mayores en la fase de alta potencia (WBT, inicio caliente) que en fases de media potencia (CCT). Las tasas de emisión medidas son de 78(56) y 13(9) $mg\ min^{-1}$ en una prueba WBT y CCT, respectivamente. Para el caso de los aerosoles (CN, OC, y EC) que producen efectos en el calentamiento global, se observó que la contribución del OC es mayor que la del EC. Las tasas de emisión de OC respecto al EC son de un orden de magnitud de tres veces mayor en la prueba WBT, y un orden de magnitud dos veces mayor en una prueba CCT.

Introducción

La bioenergía constituye aproximadamente el 10% del consumo mundial de energía y 70% del uso de energías renovables. A su vez, el 87% de la bioenergía consumida a nivel mundial se utiliza en forma de combustibles sólidos (Chum et al., 2011), de la cual, 74% se consume en el sector residencial de las zonas rurales y peri-urbanas, principalmente países en vías de desarrollo. Actualmente, entre 2.8 y 3 billones de personas en el mundo dependen de la biomasa como combustible primario para la cocción de alimentos (Martin et al., 2011; Anenberg, 2012; ISO, 2018) utilizando fogones abiertos rústicos de muy baja eficiencia y altas emisiones de gases contaminantes (Johnson, et al., 2008; Blanco et al., 2012; Jetter et al., 2012; Medina et al., 2017).

América Latina tiene 160 millones de usuarios de combustibles leñosos (RLCCL, 2014) mientras que México tiene 22.5 millones (Serrano-Medrano, 2016; RLCCL, 2014), lo que representa aproximadamente el 20% y 25 % de la población total, respectivamente. Aproximadamente 60 millones de usuarios se concentran en México y América Central, sobre todo en las zonas rurales y peri-urbanas. Al igual que a nivel global, la leña en Latinoamérica se utiliza en fogones abiertos que provocan graves impactos ambientales y daños a la salud de los usuarios (Diaz et al., 2000; Masera et al., 2005 y Berrueta et al., 2008). Para México, los 22.5 millones de usuarios dependen de la biomasa para satisfacer necesidades de cocción de alimentos, calefacción y otras tareas domésticas; también mediante fogones tradicionales (Serrano-Medrano et al., 2014). La leña es todavía el principal combustible residencial en México para tareas de cocinado y calefacción, con aproximadamente el 40% de la energía total utilizada. De igual manera, aporta el 80% de la energía usada en los hogares rurales (Diaz et al., 2000; Díaz et al., 2003). Por razones económicas y culturales, no se espera una disminución considerable del uso de leña en México para el año 2030, con diferencias importantes entre regiones (Serrano-Medrano et al., 2014 y 2016). El acceso al GLP sigue siendo limitado en las zonas rurales y las familias que lo adoptan continúan utilizando la leña (combinación de combustibles “fuel stacking”) para sus prácticas de cocción mediante fogones o estufas mejoradas (Ruiz-Mercado y Masera, 2015; Calzada y Sanz, 2018; Han y Wu, 2018).

El uso tradicional de la biomasa está asociado con bajas eficiencias térmicas (15% aproximadamente) y bajas eficiencias de combustión que representan contaminación atmosférica e intramuros (IEA, 2012). Se estima que entre 24 y 27% del consumo de biocombustibles tradicionales es no renovable y contribuye el 2% de las emisiones globales de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Bailis et al., 2015). A nivel global, se espera que el uso tradicional de la biomasa se siga incrementando en las próximas décadas, lo que podría ocasionar mayores problemas por la generación de contaminantes si no existen innovaciones tecnológicas en dispositivos de uso final y biocombustibles sólidos (SENER, 2010; Berrueta et al., 2015; SENER, 2017).

Los países de Centroamérica tienen mayoritariamente donantes de índole privados y financiamiento gubernamental para mejorar los programas de estufas dentro de América Latina. Guatemala planea difundir 65 000 cocinas por año en entre el 2012 y el 2024, mientras que Perú ha distribuido 287 000 cocinas en los últimos 6 años y tiene un programa de GLP fuerte para llegar a las zonas rurales. En México, dentro del Programa Nacional de Estufas (de leña) se instalaron 600 mil estufas mejoradas entre 2007 y 2012 como parte del Plan Nacional contra el Cambio Climático (RLCCL, 2014). Se estima que más de 500 fabricantes de estufas en su mayoría de carácter local, aunque cada vez más de carácter internacional operan en América Latina y consecuentemente cientos de modelos de estufas se difunden en la Región. Los modelos más comunes son las estufas con chimenea, usualmente estufas fijas. A pesar de toda esta actividad de implementación y distribución de estufas de biomasa, la mayoría de las estufas difundidas en Latinoamérica no han sido evaluadas en laboratorio ni campo para conocer su desempeño energético y la contribución de contaminantes climáticos de vida corta (SLCP), carbono negro (BC) y los potenciales beneficios o daños para la salud (Griehop et al., 2011; RLCCL, 2014; RLCCL, 2016; Medina et al., 2017 y 2017b; SENER, 2017).

Específicamente para México, existe un creciente mercado de estufas eficientes de biomasa (Díaz et al., 2011), promovidas mayormente por el Programa Nacional de Estufas Rurales. Se han documentado más de 50 fabricantes de este tipo de estufas, la mayoría de pequeña escala y recientemente con participación de grupos industriales importantes. Actualmente no existe conocimiento de los fabricantes sobre las necesidades de evaluación de estos

dispositivos de cocción que entran al mercado. La evaluación de estufas ayudará a construir estándares mínimos que pueden asegurar la calidad de estufas manufacturadas o construidas *in situ* (RLCCL, 2016).

Se han estimado emisiones de CO₂, CO y PM_{2.5} (Material Particulado de 2.5 micras de diámetro) en pocas estufas usadas en regiones de México (Berrueta et al., 2008; Johnson et al., 2008). Es fundamental actualizar y ampliar los inventarios de emisiones de dispositivos de cocción. Gobierno, financiadores y desarrolladores de estufas de biomasa requieren tener herramientas para la toma de decisiones en base a normas nacionales e internacionales y por lo tanto existe la necesidad de estimar BC y SLCP producidos por la combustión de biomasa, que se trata de resolver mediante convocatorias internacionales (Gold Standard, 2014).

Para poder establecer el desempeño de estufas de leña se deben seguir protocolos internacionales. Los cuales cuentan con algunos estándares que deben ser adaptados a las condiciones locales (Wang et al., 2009; IEA, 2012; Medina et al., 2017; Ruiz y Masera, 2018; Ruiz-García et al., 2018), y en algunos casos se recomienda incrementar el número de repeticiones (Lombardi et al., 2018). Un avance en este camino, es la propuesta de parámetros que sirvan para caracterizar las estufas de plancha ampliamente difundidas en México y Centroamérica, incluyendo desempeño termodinámico, de seguridad y de emisiones (IWA11: 2012), diferenciando entre emisiones con impactos a la salud y con impactos al ambiente (Ruiz y Masera, 2018; Ruiz-García et al., 2018). Se han establecido asimismo Centros Internacionales de Referencia para la Evaluación de Estufas de Biomasa (RKTC, por sus siglas en inglés) (Simon et al., 2014 y Jetter et al., 2012) que buscan el aseguramiento de la calidad y desempeño de las estufas. Sin embargo, se necesita modificar y adaptar estos protocolos a las condiciones de uso de las estufas en México (Lombardi et al., 2017; Medina et al., 2017; Ruiz-García et al., 2018)).

En México no existe una norma técnica (NMX) ni oficial (NOM) para cumplir con parámetros mínimos de desempeño. Actualmente se encuentra en desarrollo el Proyecto de Norma de Estufas de Leña que funcionan con leña (DOF, 2017), por lo tanto, el desarrollo de inventarios de emisiones en diferentes tareas de cocinado puede consolidar la normativa en México, incluyendo diferentes tipos de combustibles y tipos de estufas. Sobre las evaluaciones en campo, se desconoce el desempeño de los dispositivos de cocción usados en

zonas rurales y periurbanas del país, además de que gran cantidad de estos dispositivos son de gran difusión en programas gubernamentales y emiten concentraciones de gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático (Medina et al., 2017 y 2017b). La determinación actual de gases de efecto invernadero en estufas de biomasa será la línea base para a futuro conocer si existe o no una mitigación de gases y aerosoles de efecto invernadero a corto y largo plazo en el sector de estufas de biomasa (Gold Standard, 2014; SENER, 2017), y también para contribuir a conocer los consumos actuales de la biomasa y generar un uso sustentable (Bailis et al., 2015). Para el caso de aerosoles de efecto invernadero, actualmente existe la necesidad emergente de conocer parámetros de desempeño del carbono contenido en el hollín (carbono: elemental, orgánico, negro, total) en Latinoamérica (RLCCL, 2016). Este último, aunque no es un GEI, posee un potencial de calentamiento muy elevado y es considerado el segundo agente de cambio climático más potente (680 CO_{2e} en 100 años y 2200 CO_{2e} en 20 años) (Grieshop et al., 2011; Bond et al., 2013). En el sector residencial este aerosol genera el 41% del Carbono Negro (CN), y del cual Latinoamérica genera el 71%. La disminución de contaminantes de vida corta, muestra resultados de mitigación de cambio climático en un corto tiempo, a diferencia de contaminantes clorado que se mantienen inertes por cientos de años en la atmosfera (UNEP and Climate and Clean Air Coalition, 2018).

El desarrollo de una normativa sobre dispositivos de cocción, restringirá el acceso a estufas que no cumplan con parámetros mínimos de desempeño en programas gubernamentales de estufas. Estas implementaciones, reducirán la distribución masiva de dispositivos que puedan causar impactos al ambiente y a la salud de los usuarios. De esta manera cada vez más fabricantes y diseñadores de este tipo de dispositivos incrementarán la calidad tecnológica de sus productos (Berrueta et al., 2015; SENER, 2017).

Actualmente no existe una manera definida de evaluar una estufa, y especialmente existen muchos huecos de evaluación en estufas que tienen una o varias planchas (comales), y en aquellas que cuentan con chimenea. Las estufas con plancha son fabricadas para desarrollar la tarea principal de cocinar tortillas. A diferencia de México y Centroamérica, las estufas de biomasa en otras partes del mundo son diseñadas para hervir agua y freír alimentos (RLCCL, 2016), debido a esto deben existir deficiencias en los métodos para evaluar el desempeño energético de estufas con plancha en términos de la eficiencia térmica. Por otro lado, las

estufas con chimenea están diseñadas para sacar los gases de combustión fuera del cuarto de cocinado lo que disminuye las emisiones intramuros (Ruiz-García et al., 2018). Estas emisiones intramuros aumentarán o disminuirán en función del buen diseño del tiro en la chimenea. Los indicadores usados internacionalmente para evaluar el desempeño energético y las tasas de emisión intramuros (IWA 11: 2012) posicionan a las estufas con plancha y chimenea en desempeños muy pobres, por lo cual, la manera de medir estos parámetros no representa los desempeños reales de estos dispositivos.

Mediante la correcta medición de tasas de emisión en interiores producidas por estufas con chimenea, se podrían estimar concentraciones en el cuarto de cocinado y concentraciones de exposición. Para ello, es necesario conocer la fracción de las emisiones totales que se queda en el cuarto de cocinado. Para estufas que no poseen chimenea el 100% de las emisiones totales son consideradas como emisiones intramuros, mientras que teóricamente un buen diseño de una estufa con chimenea logra ventilar al exterior la totalidad de los gases de combustión, disminuyendo los efectos adversos a la salud de los usuarios. La OMS (2005 y 2010) recomienda concentraciones máximas anuales y 24-h, aunque en México no existe una base de datos que muestre los desempeños de los dispositivos de mayor distribución en el país respecto a estas concentraciones.

OBJETIVOS

General

El objetivo general de la investigación es desarrollar una evaluación en laboratorio para determinar el desempeño energético, de emisiones a la atmósfera e intramuros de estufas eficientes de leña.

En lo particular, se van a desarrollar las bases de evaluación que permitan determinar el desempeño real de estufas con plancha y chimenea usadas en México y Centroamérica.

Específicos

- 1) Determinar el máximo desempeño energético de una estufa de plancha.
- 2) Evaluar las tasas de emisión de contaminantes totales e intramuros de diferentes estufas de leña (CO_2 , CO y $\text{PM}_{2.5}$).
- 3) Parametrizar con datos locales y de laboratorio el modelo de zona simple propuesto por OMS para estimar las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y CO producidas en el cuarto de cocinado por estufas con chimenea.
- 4) Evaluar las emisiones de carbono negro (CN), carbono elemental (EC), carbono orgánico (OC), metano (CH_4) e hidrocarburos (HC) producidas por diferentes estufas de leña.

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Uso de la biomasa a nivel internacional y nacional

La IEA (2010) reporta que la energía usada en países en desarrollo aporta el 22% de la energía total y hay países donde se incrementa al 80%. (Serrano-Medrano, 2016) explica como el uso de la leña es vista como un problema, pero debido a que las implicaciones de su uso son referidas al uso tradicional del recurso. Actualmente existen iniciativas y proyectos a nivel internacional para detonar el uso de biocombustibles sólidos (BCS) de una manera eficiente y sustentable (CYTED, 2018; UNF, 2018; ISN, 2018). La transición energética en conjunto con la mitigación del cambio climático, forman parte de las metas globales a corto y largo plazo (Gold Standard, 2014; COP-21, 2015; IPCC, 2014).

Las iniciativas nacionales contemplan al Clúster de BCS (ProyectoFSE, 2014) que es un proyecto de innovación tecnológica del Centro Mexicano de Innovación en Bioenergía (CEMIE-Bio) que contribuye a lograr la transición energética en México. Esto involucra el uso de biomasa para cocción de alimentos como una necesidad de 22.5 millones de usuarios (Serrano-Medrano et al., 2014), así como calefacción, calentamiento de agua (Masera et al., 2005) más otros potenciales que podrían generarse de la micro y pequeña industria restaurantera y de alimentos.

No se espera que en México el uso de la biomasa se reduzca (Serrano-Medrano, 2016). La SENER (2010) reportó que la leña aportó el 28.5% de la energía consumida en el sector residencial solo detrás del gas LP con 38.4%. El uso de combustibles fósiles es finito e incrementa su costo e impactos al ambiente con el paso del tiempo (Ferrari y Gasca, 2012; Ferrari, 2013a y 2013b), es por eso que el uso de biomasa es cada vez más atractivo, además de cuestiones culturales (aspectos culinarios) y geográficas (donde no hay acceso a otro tipo de energía).

1.2 Estándares internacionales para la evaluación de estufas de biomasa

Internacionalmente existen documentos publicados por la ISO como acuerdos (International Workshop Agreements IWA) que plantean estándares de evaluación para estufas de biomasa (IWA 11: 2012; ISO, 2018). Estos protocolos de evaluación involucran áreas de evaluación

como: seguridad, Ebullición de Agua (WBT) en varias versiones, Cocinado Controlado (CCT) y no Controlado (UCT), Durabilidad, Desempeño de Cocina (KPT); internacionalmente solo se acepta los protocolos de evaluación WBT 4.2.3 y seguridad, ambos con huecos en las metodologías de evaluación que buscan satisfacer las necesidades de evaluación en materia de: consumo de energía, emisiones intramuros, métricas de gases de efecto invernadero y seguridad del usuario. Ambos protocolos presentan indicadores de evaluación como los que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Indicadores (Tiers) y parámetros del IWA.

Categoría	Indicadores IWA Tier	Unidades	Tier 0	Tier 1	Tier 2	Tier 3	Tier 4
Energía	Eficiencia térmica alta potencia	%	<15	≥15	≥25	≥35	≥45
	Consumo específico bajo potencia	MJ/min/L	>0.05	≤0.05	≤0.039	≤0.028	≤0.017
Emisiones totales	Emisiones CO alta potencia	g/MJd	>16	≤16	≤11	≤9	≤8
	Emisiones CO bajo poder	g/min/L	>0.20	≤0.20	≤0.13	≤0.10	≤0.09
	Emisiones PM _{2.5} alta potencia	mg/MJd	>979	≤979	≤386	≤168	≤41
	Emisiones PM _{2.5} bajo poder	mg/min/L	>8	≤8	≤4	≤2	≤1
Emisiones intramuros	Emisiones al interior de CO	g/min	>0.97	≤0.97	≤0.62	≤0.49	≤0.42
	Emisiones al interior de PM _{2.5}	mg/min	>40	≤40	≤17	≤8	≤2
Seguridad	Seguridad	-	<45	≥45	≥75	≥88	≥95

Fuente: WBT 4.2.3

Estos parámetros fueron diseñados para estufas que no tienen chimenea, ni plancha para cocinar. Uno de los alimentos típicos de México y Centroamérica son las tortillas, donde existen dispositivos creados exclusivamente para realizar esta tarea, y no para cocinar alimentos por hervor. Por otro lado, para las estufas sin chimenea las tasas de emisión totales e intramuros son iguales. Si esta suposición se hace para estufas con chimenea los resultados de los indicadores de evaluación de emisiones intramuros son muy pobres (Tier 0). Los métodos para capturar y medir tasas de emisión intramuros no están plasmados en los protocolos actualmente usados, por lo tanto, estufas con chimenea utilizadas en Latinoamérica no se contemplan.

Por otro lado, actualmente no existe una prueba estándar que determine la distribución de calor en la superficie de estufas plancha y su relación con los gases de la combustión (CO y O₂). Estas evaluaciones podrían proporcionar información para mejorar los diseños de estufas actualmente usadas. La adecuada entrada de aire primario en la cámara de combustión

disminuye contaminantes sin afectar la distribución homogénea de calor en las superficies de cocinado.

Los estándares internacionales no contemplan aerosoles y gases de efecto invernadero en sus métricas, existe una iniciativa de la ISO (2018) para empezar a construir estándares mínimos de carbono negro y metano. Para la construcción de indicadores que representen estos parámetros es necesario contar con métricas que muestren el desempeño de dispositivos usados para cocción alrededor de todo el mundo. El construir valores de referencia con resultados de regiones particulares se puede sobrestimar y/o subestimar estos parámetros (RLCCL, 2016; ISO, 2018).

1.3 Estimación de concentraciones intramuros

Existen esfuerzos por la OMS (2014) para desarrollar un modelo que prediga concentraciones intramuros en espacios donde se encuentran dispositivos que emitan contaminantes. Estos modelos involucran dispositivos que no tienen chimeneas para ventilar contaminantes, y en los que se asume que las emisiones totales son emisiones intramuros. Los modelos de simulación involucran desde un modelo de zona simple en el que se asume que la concentración en los diferentes puntos de un volumen (cuarto o cocina) son homogéneos, pero también existen modelos más complejos que involucran simulación en tres dimensiones (3D) y simulación computacional de dinámica de fluidos (Villi et al., 2009; L'Orange, 2009; Debnath et al., 2016). Ambos tipos de modelos se encuentran en desarrollo, y no han sido validados mediante datos experimentales, incluso existen pocas simulaciones que representen condiciones locales. Johnson et al. (2011) realizó simulaciones que involucraban parámetros (tiempo, volumen de cocina y tiempo de uso) de distintas localidades y diversos dispositivos (sin chimenea) que no necesariamente representaban las condiciones de alguna localidad en particular.

2 METODOLOGÍA

2.1 Descripción de las estufas evaluadas

A continuación, se describen las estufas de mayor distribución en México que fueron evaluadas en esta investigación: Patsari, ONIL, Mera-Mera y Ecostufa (ver Figura 1).

- **Patsari:** La estufa Patsari está construida (*in situ*) con tabique y cemento, tiene una cámara de combustión de barro con entrada de aire primario (mejorado por una rejilla) y un comal principal de 54 cm y dos secundarios de 21 cm. Las dimensiones exteriores de la estufa son: 80 cm de ancho por 100 cm de longitud y una altura de 27 cm. La estufa Patsari actual tiene ligeras diferencias de las evaluaciones realizadas por Berrueta et al (2008), Johnson et al (2008) y Straffon (2009) y más similar a la evaluada por Medina et al (2017a y 2017b).
- **ONIL:** La estufa ONIL está construida con tres módulos de concreto, la cámara de combustión (metal y ladrillo) tiene entrada de aire primario mediante un orificio y no cuenta con rejilla. En el interior tiene arena que funciona como aislante. El comal principal es una plancha de 34 x 70.5 cm con discos removibles para cocinar a fuego directo.
- **Mera-Mera:** La estufa Mera-Mera está construida en su mayoría de metal. Tiene dos cámaras de combustión con material refractario de 14 x 8 cm. El comal principal tiene dos discos removibles, uno en cada cámara de combustión.
- **Ecostufa:** Esta estufa esta ensamblada en su totalidad de metal. Tiene una cámara de combustión (18.5 x 14 cm) con una rejilla para la entrada de aire primario y un comal plancha de 40 x 60.5 cm.



Figura 1. Estufas evaluadas: Ecostufa (a), Mera-Mera (b), ONIL (c) y Patsari (d). Créditos de la Figura: Paulo Medina.

2.2 Protocolos de evaluación

2.2.1 Prueba de ebullición de agua (WBT, por sus siglas en inglés)

El protocolo de ebullición de agua versión 4.2.4 (WBT, 2014) se utilizó para determinar la caracterización de las emisiones de 4 estufas tipo plancha con chimenea. Esta prueba consta de tres fases (Ver Figura 2):

1. Alta potencia: inicio en frío.
2. Alta potencia: inicio caliente.

3. Baja potencia: fuego lento.

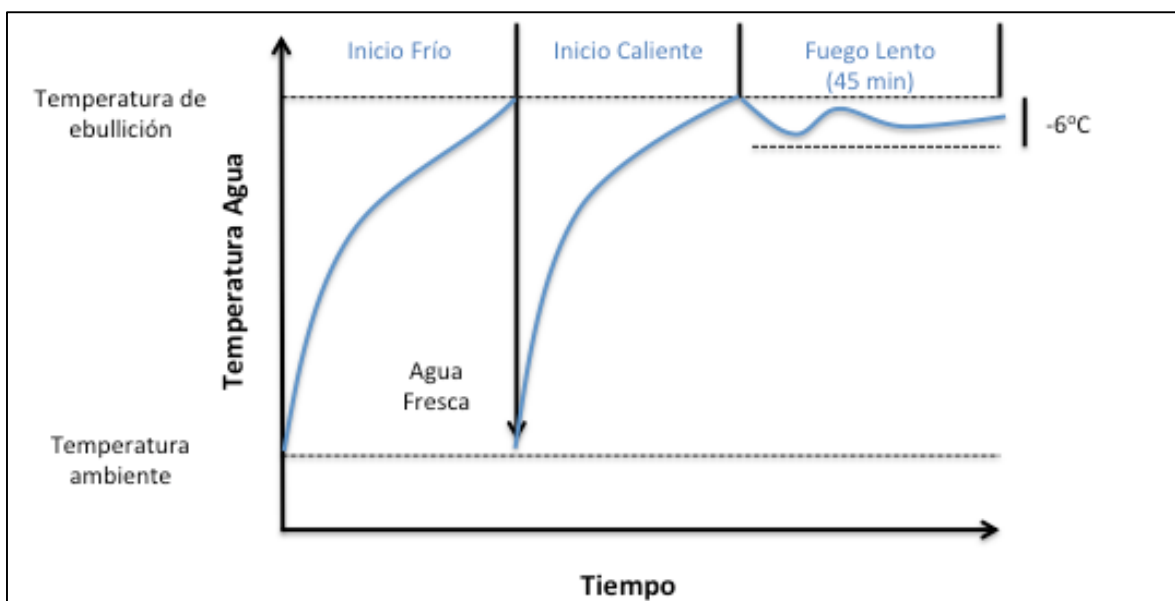


Figura 2. Diagrama WBT 4.2.4 (Elaboración propia).

Medina et al. (2017) muestra un resumen del protocolo WBT 4.1.2, el cual se adaptó para esta investigación con la más reciente versión del protocolo (WBT, 2014). En las fases de alta potencia inicio frío y caliente se utilizan 5 litros de agua, los cuales se colocan en la olla (recipiente) principal y el objetivo de ambas fases es alcanzar el punto de ebullición registrando el tiempo. En el inicio frío la estufa se encuentra fría (al menos 24 horas previas a la prueba) y en la fase caliente la estufa se encuentra caliente (posterior a la fase fría). En la tercera fase, la olla principal contiene el volumen de agua proveniente del inicio caliente y se mantiene durante 45 minutos a 3°C abajo del punto de ebullición. Antes del inicio de la prueba se tienen que registrar los siguientes parámetros: temperatura ambiente, contenido de humedad, peso de la olla(s) vacías, temperatura local de ebullición y el tipo de combustible que se va a utilizar. Al inicio de cada fase se tiene que registrar: tiempos de inicio, cantidad de combustible, temperatura del recipiente(s) y peso del recipiente(s) contemplando el agua. Al final de cada una de las fases se cuantifica: cantidad de leña restante, temperatura del agua, peso del recipiente(s) con el agua y la cantidad de carbón residual.

Para todas las pruebas de ebullición de agua se utilizó alcohol isopropílico 95% como iniciador de llama (30 g) y encino blanco (*Quercus Bicolor*) como combustible el cual es

comúnmente utilizado en la mayoría de las comunidades rurales y periurbanas de México para la cocción de alimentos tradicionales. Las dimensiones de la leña usada durante todas las pruebas de ebullición fueron 2 cm x 4 cm x 40 cm y se utilizó una balanza digital con 1 g de precisión para cuantificar las mediciones de combustible. El contenido de humedad en el combustible se determinó utilizando un dispositivo que determina la humedad en base seca de la leña (Protimeter Timbermaster Wood Moisture Meter®). Previo a las pruebas se tomaron 9 mediciones de la humedad en base seca para cada estufa según lo reportado por (Johnson et al., 2008). Sin embargo, para la obtención de los parámetros de desempeño es necesario obtener la humedad en base húmeda la cual se obtuvo mediante la (Ecuación 1), la cual se reporta en el protocolo WBT versión 4.2.4. El promedio del contenido de humedad en el combustible fue de $7.0 \pm 0.6\%$ con un rango de 6.1-8.2%.

$$\% \text{ Humedad en base húmeda} = \left(\frac{\text{humedad base seca}}{1 + \text{humedad base seca}} \right) * 100$$

(Ecuación 1)

La Eficiencia Modificada de Combustión se calcula con la (Ecuación 2), productos secundarios en la reacción de combustión como lo es el Monóxido de Carbono (CO) se pretende que tiendan a cero.

$$\% \text{ Eficiencia Modificada de Combustión (MCE)} = \left(\frac{\text{moles CO}_2}{\text{moles CO} + \text{moles CO}_2} \right) * 100$$

(Ecuación 2)

2.2.2 Prueba de Cocinado Controlado (CCT, por sus siglas en inglés)

El protocolo CCT versión 2.0 (CCT, 2004) se utilizará para determinar la caracterización de las emisiones de 4 estufas tipo plancha con chimenea. La prueba CCT consta de una fase. Este protocolo es útil para determinar el consumo energético y la contribución de emisiones por la cocción de alimentos típicos (uno a la vez) de la región de interés (ver Figura 3).

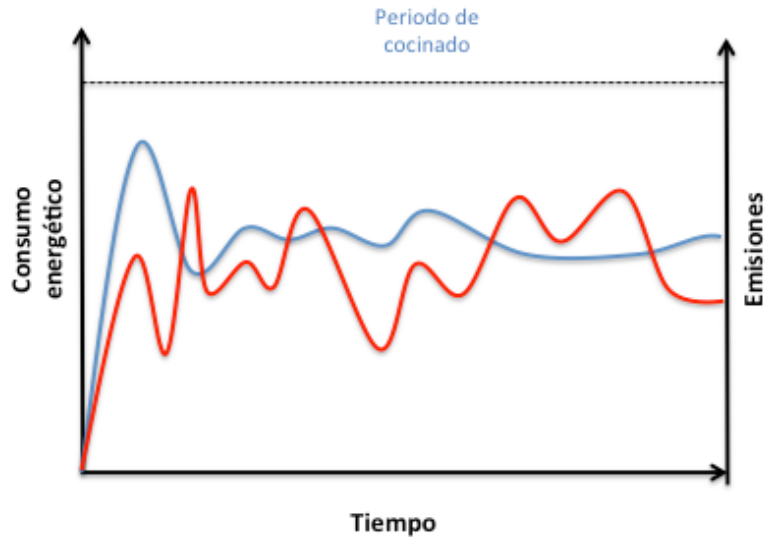


Figura 3. Diagrama prueba de cocinado controlado (Elaboración propia).

Las características de la leña (humedad y dimensiones de leña) y la eficiencia modificada de combustión se miden y calculan como se indica en la sección 2.2.1.

2.2.3 *Protocolo de Perfil de Temperatura (PPT)*

Este protocolo ayuda a determinar la temperatura en diferentes puntos de la plancha (comal) de una estufa. Este no es un protocolo internacional, pero muy útil en la zona de México y Centroamérica donde existen estufas con plancha. Esta evaluación ayuda a mejorar el diseño de la cámara de combustión de una estufa para aumentar la transferencia de calor mediante una distribución homogénea en la superficie del comal, y así evitar superficies frías y sin uso. Esta prueba consiste en medir en diferentes puntos del comal de la estufa la temperatura en función del tiempo (ver Figura 4). El objetivo es tener temperaturas adecuadas para cocción rápidamente y con una distribución de calor homogénea en el comal. Los puntos de muestreo son variables debido a que el tamaño de los comales que existen en el mercado también es variable. Los intervalos de tiempo involucran mediciones de temperatura cada 5 min en todos los puntos (incluyendo un punto en la chimenea). La medición en la chimenea es un indicador de la cantidad de energía que está saliendo sin ser utilizada. La estufa funciona en máxima potencia y usa el mismo iniciador de fuego con las características de la leña (humedad y

dimensiones de leña) que se indican en la sección 2.2.1. La Figura 4 muestra el diagrama de un perfil de temperatura usando solo un comal, redondo, donde la flecha indica la entrada en la cámara de combustión y el círculo arriba indica la chimenea. La Figura 4 puede modificarse para comales con otra forma geométrica y para estufas que tengan más de un comal.

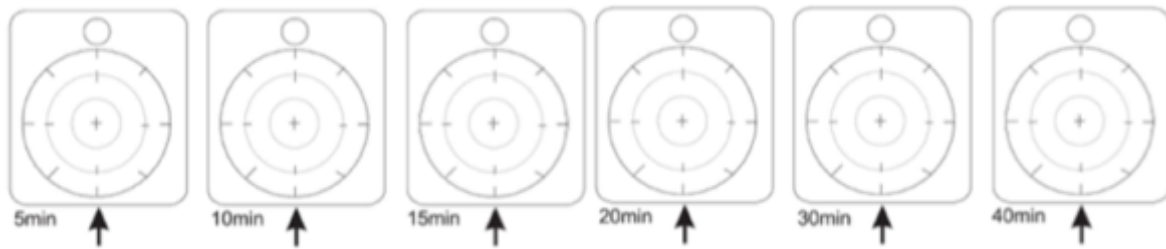


Figura 4. Diagrama del perfil de temperatura, usando un comal redondo como ejemplo (Elaboración propia).

2.3 Desempeño energético en estufas con plancha que funcionan con leña

2.3.1 Determinación de la distribución de calor en la plancha

Para la determinación de la distribución de calor en la plancha de una estufa se usa el Protocolo de Perfil de Temperatura. La estufa evaluada es la estufa Patsari (ver Figura 1), la evaluación consiste en medir temperaturas en los tres comales (uno principal y dos secundarios). Las temperaturas son registradas con una cámara termográfica que utiliza un índice de emisividad para estimar la temperatura de diferentes cuerpos (ver Figura 5). El índice de emisividad tiende a cero (0) cuando los materiales son brillosos y tiende a uno (1) cuando estos son opacos. Las mediciones de temperatura de la cámara (FLUKE, modelo TI400) son validadas mediante un termómetro de contacto (FLUKE 51 II) con un termopar tipo “K” debido a que los materiales pueden cambiar ligeramente sus propiedades (oxidación, tipo de pulido, entre otras). Las mediciones de la temperatura pueden registrarse mediante un registrador de datos (data logger) conectado al termopar tipo “K” para guardar información en tiempo real e intervalos de tiempo definidos, usualmente segundos.

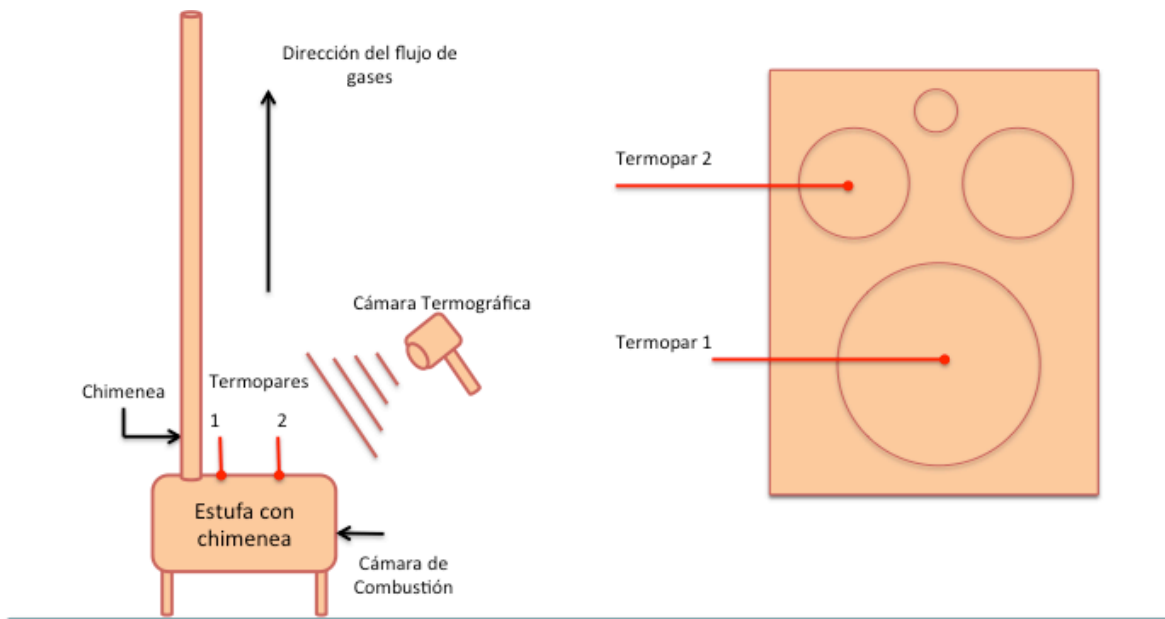


Figura 5. Medición de temperatura en la superficie de los comales de una estufa con chimenea (Elaboración propia).

Nota: Este esquema muestra un tipo de estufa con diversos comales.

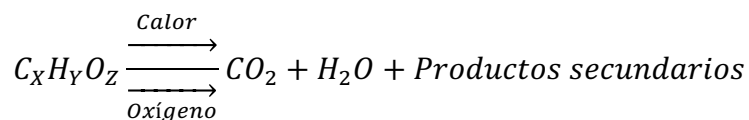
2.3.2 Determinación de la temperatura, oxígeno y monóxido de carbono en el interior de la estufa

Para la determinación de oxígeno y monóxido de carbono se utilizó el equipo TESTO (modelo 340), este equipo cuenta con sensores para la medición de estos gases en altas concentraciones. Para la medición de CO el equipo funciona en rangos de 0-50,000 ppm, con una resolución de 1 ppm arriba de 500 ppm y 0.1 debajo de 500 ppm con un tiempo de respuesta <40 segundos en ambos casos. Para el O₂ tiene un rango de 0-25% con una resolución de 0.01 Vol. % y un tiempo de respuesta <20 segundos.

La temperatura fue medida también con el TESTO (modelo 340) mediante una sonda con termopar tipo “K” (NiCr-Ni) que opera en un rango de -40 a 1200°C, y una resolución de 0.1°C (TESTO, 2012). Por otro lado, mediante un equipo que cuenta con 6 termopares (cada uno con data logger), se midió la temperatura en tiempo real en diversos puntos de la estufa,

el equipo es versátil y funcionan con cualquier tipo de termopar, el tipo de termopar elegido se calibra mediante la elaboración de una curva de calibración construida con un equipo comercial. Para el desarrollo de estas mediciones se utilizaron termopares tipo “K”. El equipo cuenta con amplificadores operacionales LM747, y una señal amplificada de 100 veces que es leída mediante un micro-controlador (micro-controlador ATME1328P-PU con tarjeta Arduino uno), el equipo está programado con un algoritmo de lenguaje C++ y Visual Studio que permiten la recepción de las señales eléctricas que posteriormente se convierten en mediciones de temperatura. Este equipo puede sustituir o complementar las mediciones de temperatura en la superficie de cocinado mencionados en la sección 2.3.1.

En la Figura 6 se muestra el tren de medición para emisiones y temperaturas en diferentes puntos de la estufa. Los equipos TESTO 1 y TESTO 2 miden temperaturas y concentración de gases directamente en el flujo (cámara de combustión y chimenea), mientras que los medidores Termopar 1 y Termopar 2 son un complemento (no necesario) para medir temperatura en los flujos de gases calientes en la hornilla primaria y secundarias de la estufa. Esta prueba tiene por objeto monitorear en tiempo real temperaturas y contaminantes secundarios provenientes de la reacción de combustión de la estufa (ver Ecuación 3). Los productos secundarios involucran al monóxido de carbono (CO), material particulado (PM), metano (CH₄), hidrocarburos de cadena corta (C1-C5), compuestos aromáticos, nitrógeno, azufre, entre otros. Para el caso de este protocolo solo se medirán concentraciones de CO y O₂ en el gas exhausto.



Ecuación 3

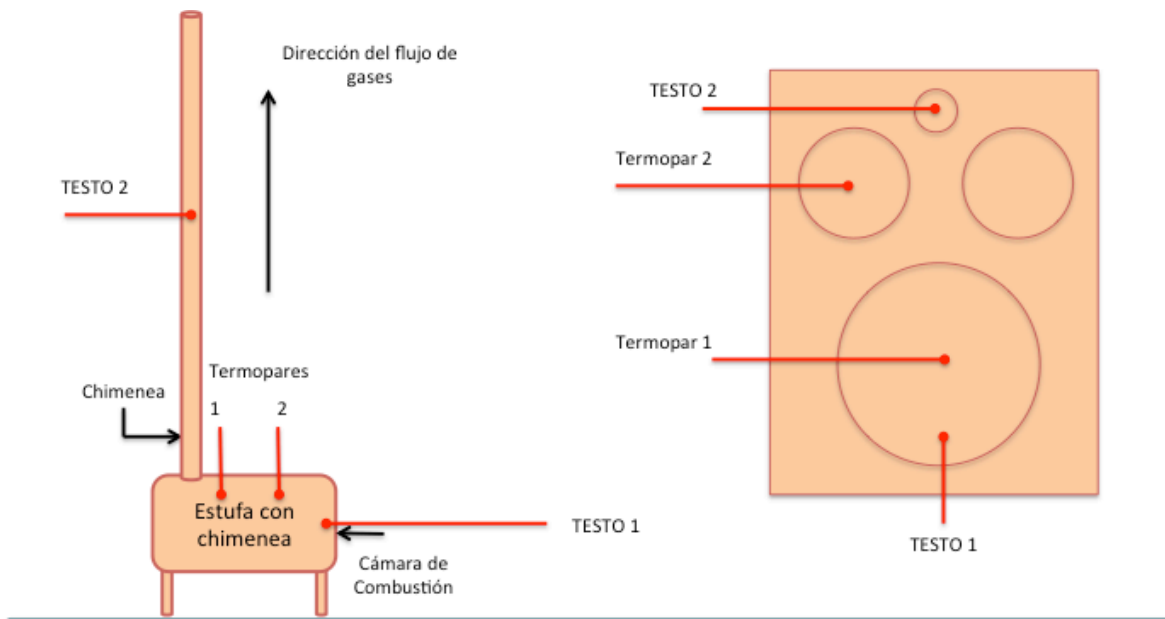


Figura 6. Medición de temperatura y concentraciones (monóxido de carbono y oxígeno) en el gas exhausto de una estufa con plancha y chimenea (Elaboración propia).

Nota: Este esquema muestra un tipo de estufa con varios comales. Las mediciones podrían realizarse en ambas hornillas secundarias.

2.3.3 Determinación de la eficiencia térmica

La eficiencia térmica se calcula para la estufa Patsari en la prueba de ebullición de agua (WBT) como se describe en la sección 2.2.1. El protocolo internacional actual no está adaptado a estufas de leña que tienen plancha, para lo cual se propone adecuar el método que permita conocer la máxima transferencia de calor desde la cámara de combustión hacia el recipiente que contiene agua y que tiene por objetivo llegar al punto de ebullición. Los recipientes utilizados se muestran en la Figura 7 y se describen a continuación:

Ollas de metal: Son recipientes de aluminio, la olla principal tiene un diámetro de 25 cm para contener 5 L de agua, mientras que la olla secundaria tiene un diámetro de 18 cm para contener 3.5 L de agua. Estas ollas se colocan sobre los comales.

Comal-olla: Es un recipiente creado con el comal de cada estufa, consiste en soldar un faldón en el perímetro del comal para crear una olla (comal-olla), en la cual se vierte directamente el agua. El área útil para la transferencia de calor de la estufa se optimiza y tiene la ventaja de que el comal-olla tiene un mejor desempeño energético funcionando a fuego directo.

Ollas de Mylar: Son recipientes de una película de poliéster resistente a altas temperaturas con espesor de 0.127 mm. Este tipo de ollas tienen un soporte en la parte superior, hecho con una hoja de metal. El área de contacto entre el comal y este tipo de ollas es del 60% del comal, recomendado no formalmente por el ISO TC 285/WG 2 (2018) aunque no hay estudios que demuestren que es el área óptima. El Mylar es un material flexible que elimina aire que puede quedar atrapado entre el Mylar y el comal optimizando el área útil de transferencia de calor, pero puede romperse y causar quemaduras a los operadores.



Figura 7. Diferentes recipientes utilizados en la prueba WBT para maximizar la transferencia de calor y determinar la máxima eficiencia térmica que presenta una estufa de leña con plancha. Ollas de aluminio (a), Comal-olla (b) y Ollas de Mylar (c). Créditos de figura: Víctor Ruiz.

La (Ecuación 4 indica cómo se determina la eficiencia térmica en una prueba de ebullición de agua. La eficiencia térmica (TE) es la relación de la energía útil respecto a la energía total que entra a la estufa. La energía útil se refiere a la energía necesaria para llevar el agua al punto de ebullición, involucrando la evaporación (calor sensible y calor latente). Este parámetro se mide usualmente en la fase de alta poder en una prueba WBT y se reporta el promedio de ambas fases. También puede calcularse la TE en la fase de baja potencia.

$$TE (\%) = \left(\frac{4.186(W_w)(T_f - T_i) + 2260(W_v)}{f_w(LHV_w) - f_{ch}(LHV_{fch})} \right) 100$$

(Ecuación 4)

Donde W_w es la masa de agua que se calienta desde temperatura ambiente hasta el punto de ebullición sin que exista cambio de fase, el calor específico del agua es 4.186 J/g°C y la diferencia de temperatura del agua es $(T_f - T_i)$, W_v es la cantidad de agua evaporada y el calor latente de la evaporación del agua es 2260 J/g supuesto a 100°C. El poder calorífico inferior de la leña LHV_w y del carbón LHV_{ch} (también llamado valor neto de calentamiento), f_w es la masa de leña seca utilizada y f_{ch} es la masa de carbón remanente.

2.4 Medición de emisiones de estufas de leña en laboratorio

2.4.1 Captura de gases y aerosoles: doble campana

Laboratorio

Los métodos convencionales proponen capturar emisiones totales provenientes de estufas que utilizan biomasa (MacCarty et al., 2008; MacCarty et al., 2010). Estos métodos no contemplan la medición de emisiones para estufas que utilizan chimenea como las que se utilizan en México, Centro y Sudamérica. Los métodos para medición de emisiones en estufas de biomasa solo contemplan: a. Emisiones totales, estas emisiones se pueden medir mediante la captura total de los gases provenientes de la combustión y, b. Emisiones en la chimenea, estas emisiones se miden mediante una toma de muestra representativa en la chimenea de la estufa donde se encuentra el gas exhausto. Mediante ambos métodos no es posible diferenciar las emisiones provenientes de la chimenea y las emisiones fugitivas o intramuros (Figura 8). El método para captura de emisiones provenientes de la chimenea debe tener la captura exclusiva de emisiones provenientes de la chimenea y para la captura de emisiones fugitivas o intramuros esta captura debe contemplar solamente emisiones provenientes de fugas que puedan presentar las estufas de biomasa. Esta investigación propone un diseño innovador para la captura de emisiones. El diseño de la doble campana permite capturar mediante la campana más baja las emisiones fugitivas y mediante la campana alta las emisiones de la chimenea (Figura 9). La Figura 9 puede adaptarse para pruebas en campo. Las emisiones fugitivas contemplan las fugas que pueden existir entre los comales y la superficie de la estufa, la salida de emisiones por la entrada de la cámara de combustión y cualquier orificio en el cuerpo de la estufa que permita fugas de aerosoles o gases provenientes de la combustión.

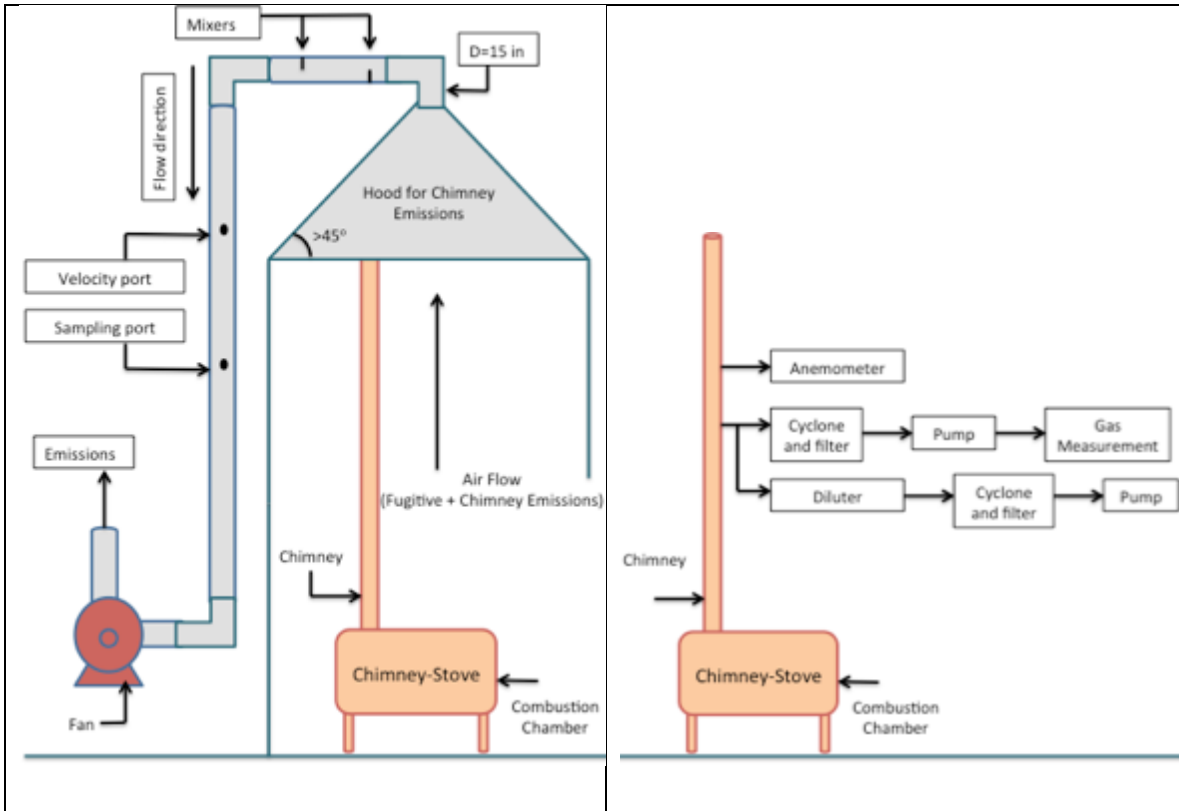


Figura 8. Diagrama de medición de emisiones totales (izquierda) y diagrama de medición de emisiones en la chimenea (derecha), (Elaboración propia).

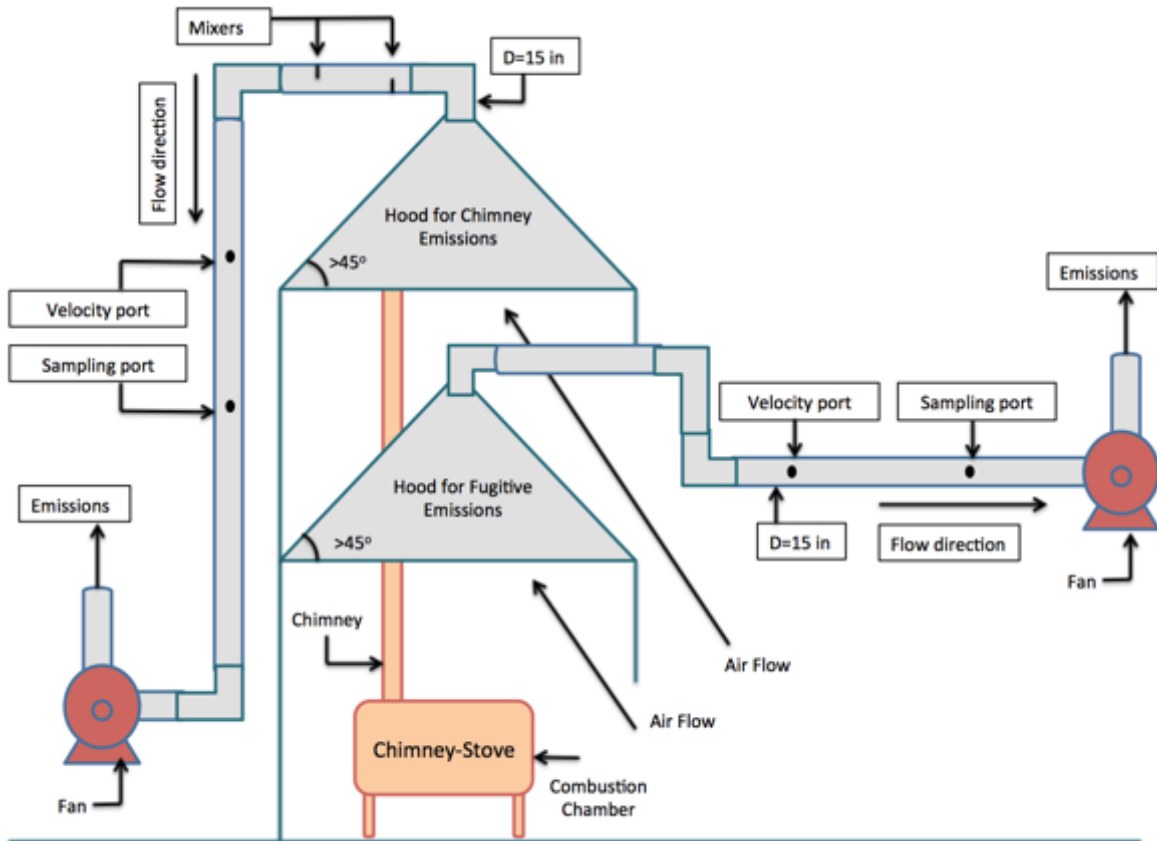


Figura 9. Diagrama de la doble campana (Elaboración propia).

La doble campana está construida de acero galvanizado que es inerte a las temperaturas de captura. Cada campana cuenta con un tren de medición para aerosoles y gases provenientes de la combustión. Los ángulos de diseño son $>45^\circ$ para ayudar a un flujo laminar en la captura. Los trenes de medición de cada campana operan en paralelo lo que optimiza el tiempo durante las pruebas de evaluación. Los gases colectados dentro de cada campana tienen un flujo laminar para conseguir un flujo unidireccional por una tubería de acero galvanizado donde se encuentran los mezcladores y puertos de muestreo. Al final de estas tuberías se encuentran unos sopladores que producen un tiro inducido para la extracción de los gases.

2.4.2 *Medición de emisiones en la chimenea*

Aerosoles:

Material particulado (2.5 micras)

La medición de material particulado se realiza con accesorios del sistema de medición (LEMS) propuesto por Aprovecho Research Center (Oregon USA) y adaptados para este estudio por el Laboratorio de Innovación y Evaluación de Estufas de Biomasa (LINEB) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) específicamente en la recolección y toma de muestra.

Este equipo permite la determinación de material particulado con un diámetro aerodinámico de 2.5 micras ($PM_{2.5}$) mediante los métodos óptico y gravimétrico. El uso del método óptico permite la determinación del $PM_{2.5}$ en tiempo real con mediciones cada 2 segundos mediante un sensor de dispersión de luz. Por otro lado, el método gravimétrico que es un método más robusto permite conocer la masa acumulada de $PM_{2.5}$. Para la colección del $PM_{2.5}$ se requiere de un ciclón cuyo flujo de operación homogéneo y laminar es de 16.7 LPM (LEMS, 2013). Ambos métodos se llevan a cabo mediante muestreos isocinéticos, esto permite que la velocidad de los aerosoles muestreados sea similar a la toma de muestra. Los flujos hacia los ciclones son calibrados previo y posteriormente a cada evaluación mediante el medidor de flujos Defender 510.

La determinación de la masa de $PM_{2.5}$ en la muestra proveniente de la chimenea se realiza con la balanza analítica (Citizen CX 265) localizada sobre una barra de concreto que eliminar vibraciones y se estabiliza horizontalmente con ayuda de la burbuja, esta balanza tiene una capacidad máxima de 10 g, capacidad mínima de 10 μ g y exactitud de 10 μ g. La balanza se calibra 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, 0.1g, 0.2g, 0.5g, 1g, 2g y 5g. Los filtros utilizados son de fibra de vidrio con un diámetro 4 in y un tamaño de poro de 1 micra de diámetro (SKC Inc., USA). Los filtros se secan previa y posteriormente a la toma de muestra, el secado se lleva a cabo en desecadores herméticos que contienen gel de sílice, los filtros se deshidratan por al menos 48 h y se asegura la deshidratación de los filtros con pesajes posteriores cada 6 h-8 h

para asegurar la estabilidad de la masa del filtro. En relación al pesaje, se utiliza un desionizador (Sartorius) para eliminar cargas electrostáticas en los filtros que puedan alterar (aumentar o disminuir) las masas registradas por la balanza analítica. El desionizador es utilizado en los filtros previo a cada pesaje.

Carbono negro

La recolección de CN está basada en la recolección de material particulado con un diámetro aerodinámico de 2.5 micras ($PM_{2.5}$), se usó el sistema gravimétrico diseñado por Aprovecho Research Center (Oregon USA) para coleccionar $PM_{2.5}$ mediante un ciclón con flujo de operación de 3 LPM (manteniendo el muestreo isocinético) y filtros de 47 mm. Este flujo permite no saturar los filtros y tiene la ventaja de poder conectar en paralelo en el mismo sistema gravimétrico otro ciclón que opera a 16.7 LPM el cual fue mencionado anteriormente y se utilizó para la recolección de Material particulado (2.5 micras) en la chimenea con filtros de 4 pulgadas (Figura 10). Los orificios críticos permiten mantener flujos diferentes aun cuando las tomas se conectan a la misma bomba.

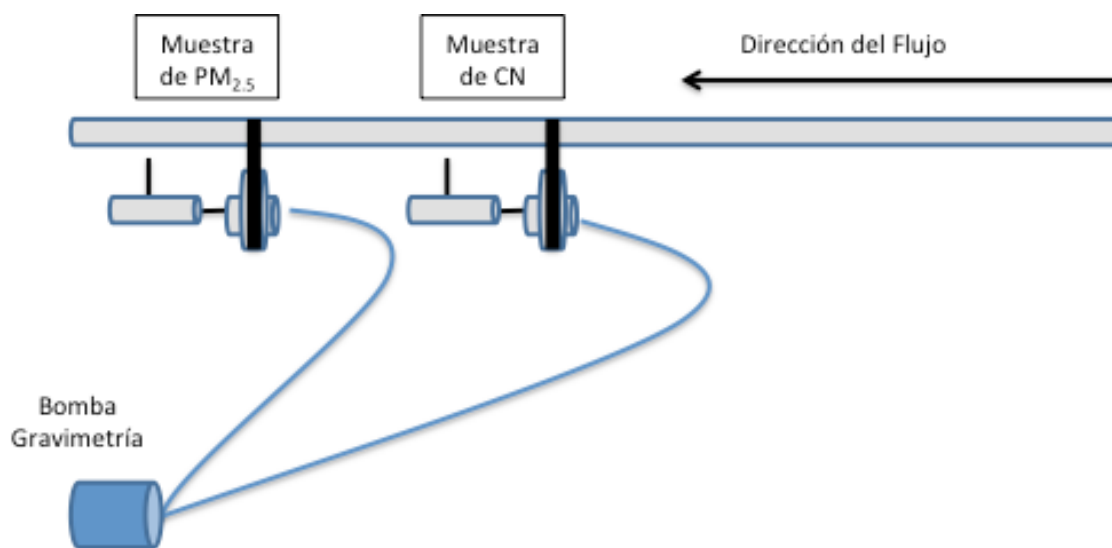


Figura 10. Ciclón $PM_{2.5}$ y CN a una misma bomba (modificada de Aprovecho Research).

La medición de Carbono Negro (CN) se realizó mediante transmitancia con el equipo Magee Scientific (SootScan™ OT219), el cual mide la atenuación de la luz transmitida a través de

un filtro que contiene muestra de CN con respecto a un filtro de referencia. Esta medición se realiza mediante las longitudes de onda de 880 nm en el infrarrojo. Existe una relación de masa de CN por unidad de área del filtro muestra. Para verificar la consistencia del rendimiento del equipo, se usan un conjunto de Discos-Filtros de Densidad Neutra que pueden usarse periódicamente para comprobar la respuesta del analizador. Estos filtros presentan una transmitancia reproducible en las dos longitudes de onda y están certificadas contra una señal fotométrica estándar. Este equipo permite el uso de filtros de fibra de vidrio, cuarzo y teflón en dimensiones de 25mm, 37mm y 47 mm, en los cuales se determina la masa de CN que existe por unidad de área ($0.06 \mu\text{g cm}^{-2}$) mediante la atenuación (ATN) que es la relación entre el filtro blanco y el filtro con muestra (ver (Ecuación 5)).

$$ATN = \left(\ln \frac{I_o}{I} \right) 100$$

(Ecuación 5)

Donde I_o es la transmitancia en el filtro blanco, I la transmitancia en el filtro con muestra y ATN la atenuación.

Carbono elemental, orgánico y total

La recolección del material particulado para determinar Carbono Elemental (CE), Carbono Orgánico (OC) y Total (COT) está enfocado a material particulado con un diámetro aerodinámico de 2.5 micras ($\text{PM}_{2.5}$), el método de captura es el mismo que el mencionado para CN con la diferencia que los filtros deben ser exclusivamente de cuarzo.

El instrumento usado para estas determinaciones es el CM-150 (UIC), para el análisis de carbono utiliza combustión y acidificación para convertir carbono en CO_2 . Se utiliza un gas portador libre de CO_2 para transportar el gas de muestra al detector. Utiliza un detector coulométrico para conocer la detección "absoluta". Esto significa que existe una relación uno a uno entre el número de átomos de carbono en la muestra y la respuesta del detector. Esto proporciona una respuesta lineal del detector que permite que el método de detección coulométrica se considere "libre de calibración". El detector coulométrico realiza una titulación ácido-base para determinar la cantidad de ácido en la solución. En la celda

coulométrica, el CO₂ entra en la solución y reacciona con una amina para formar un ácido. La solución contiene un indicador que es de color azul y a medida que el ácido se forma, el indicador azul comienza a desvanecerse y con un haz de luz se mide el porcentaje de transmitancia (% T) a través de la celda y, a medida que el color azul se desvanece actúa como un interruptor para activar la corriente de la celda. La corriente de la celda se utiliza para generar una base electrolizando agua a H⁺ y OH⁻. El ion OH⁻ reacciona con la solución ácida formada por el CO₂ hasta que la solución se neutraliza. La cantidad de corriente utilizada para generar la base es directamente proporcional a la cantidad de CO₂ que ha entrado en la celda.

Gases:

Monóxido y dióxido de carbono

La medición de monóxido (CO) y dióxido de carbono (CO₂) se realizó con una caja de sensores (LEMS) propuesto por Aprovecho Research Center (Oregon USA) y adaptada para este estudio por el LINEB-UNAM específicamente en la recolección y toma de muestra.

La caja de sensores utiliza una celda electroquímica para estimar la concentración de CO, un sensor infrarrojo no dispersivo (NDIR) para determinar las concentraciones de CO₂ (LEMS, 2013). Los flujos hacia los sensores son calibrados previo y posteriormente a cada set de pruebas mediante el medidor de flujos Defender 510. Por otro lado los sensores de CO y CO₂ se calibraron utilizando una mezcla de 5000 ppm de CO₂ y 500 ppm de CO y nitrógeno (N₂) como gas de ajuste como lo reportó (Maccarty et al., 2008). Este equipo permite determinar la temperatura del flujo de los gases con un termopar tipo “K” y la velocidad es calculada mediante la diferencia de presión (ΔP) medida mediante un manómetro.

Metano e hidrocarburos

El equipo usado es el Young Lin (Modelo 6500). Este equipo es un sistema analítico para la cuantificación de Metano e hidrocarburos ligeros (C1- C5). Las muestras gaseosas son tomadas de manera continua (mediante una sonda enchaquetada que cuenta con una resistencia eléctrica para evitar disminución de la temperatura en el gas) o por lotes (bolsas Tedlar alimentadas con un flujo continuo). La toma de muestra continua permite la

determinación en tiempo real dependiendo de la separación de los contaminantes en la columna), por otro lado, la toma de muestra por lotes involucra una sola medición que representa una concentración promedio. Para la separación del metano que es nuestro gas de interés, la muestra de gas exhausto pasa a través de una columna capilar de 30 m que permite la separación de los compuestos en función al tamaño de la molécula (peso molecular) donde los compuestos más ligeros presentan mayor movilidad y son los primeros en abandonar la columna empacada y por lo tanto los primeros en medirse. Para medir las concentraciones de los gases, pasan a través de un detector por ionización de flama (FID). Es necesario el uso de estándares que permiten detectar los picos de los compuestos de interés en la mezcla de los gases. El equipo usa un gas de arrastre que puede ser Helio o Hidrógeno (para evitar el ruido en la señal de salida).

2.4.3 Medición de emisiones Intramuros

Aerosoles:

Material particulado (2.5 micras)

La medición de material particulado se realiza con bombas de succión, ciclones y casetes (SKC Inc., USA) adaptados para este estudio por el LINEB-UNAM, específicamente para la toma de muestra. Este equipo permite la determinación de material particulado con un diámetro aerodinámico de 2.5 micras ($PM_{2.5}$) mediante el método gravimétrico que es un método robusto que permite conocer la masa acumulada de $PM_{2.5}$. Para la recolección del $PM_{2.5}$ se requiere de un ciclón con un flujo de muestra homogéneo de 4 LPM (Johnson et al., 2008). La toma de muestra se lleva a cabo mediante muestreos isocinéticos. Los flujos hacia los ciclones son calibrados previo y posteriormente a cada evaluación mediante el medidor de flujos Defender 510.

La determinación de la masa de $PM_{2.5}$ en la muestra proveniente de la chimenea se realiza con la balanza analítica (Mettler Toledo MT5). Esta balanza tiene una capacidad máxima de 5.1 g, capacidad mínima de 1 μ g y exactitud de 1 μ g. La balanza se ubica, calibra y estabiliza de igual manera como se indica en la sección 2.2.2 con la balanza Citizen CX 265. Los filtros utilizados son de fibra de vidrio con un diámetro 37 mm y un tamaño de poro de 1 micra de

diámetro (SKC Inc., USA). Los filtros se secan de la misma manera que se indica en la sección 2.4.2 con los filtros de fibra de vidrio de 4 in.

Gases:

Monóxido y dióxido de carbono

La medición de monóxido (CO) y dióxido de carbono (CO₂) se realizaron con el equipo Q-Trak y con el Velocicalc (TSI, USA) para monitorear velocidades y temperaturas de los flujos de gases. El tren de muestreo es una propuesta para el desarrollo de esta investigación y que consolida los protocolos internacionales.

El Q-Trak utiliza una celda electroquímica para estimar la concentración de CO, un sensor infrarrojo no dispersivo (NDIR) para determinar las concentraciones de CO₂. Los flujos hacia los sensores, así como los sensores, son calibrados de la misma manera que se indica en la sección 2.4.2 para el monóxido y dióxido de carbono (caja de sensores del LEMS), con la excepción del uso del N₂ como gas de ajuste. Este equipo permite determinar la temperatura de los gases con dos termopares tipo “K” y la velocidad es medida mediante un sensor de presión diferencial.

2.4.4 Emisiones totales

Las emisiones totales para una estufa con chimenea son la suma de las emisiones en la chimenea y de las emisiones fugitivas. El balance de carbono es usado en la determinación de las emisiones totales. El balance carbono incluye el carbono de entrada y el carbono de salida (donde la mayor cantidad está representada por el CO₂). Se recomienda que el carbono de salida sea el 100 ± 20% respecto el carbono de entrada (Ver (Ecuación 6, (Ecuación 7) y (Ecuación 8).

$$\mathbf{Balance\ de\ carbono} = \left(\frac{\mathbf{Carbono\ de\ salida}}{\mathbf{Carbono\ de\ entrada}} \right) * 100$$

(Ecuación 6)

Carbono de entrada

$$\begin{aligned} &= (\text{madera húmeda consumida}) \\ &* (1 - \text{humedad de la leña en base húmeda}) \\ &* (\text{contenido de carbono en la madera}) \\ &- (\text{cantidad de carbón producido durante la prueba}) \\ &* (\text{contenido de carbón en el carbón residual}) \end{aligned}$$

(Ecuación 7)

$$\text{Carbono de salida} = g(c)C_{CO_2} + g(c)C_{CO} + g(c)C_{PM_{2.5}}$$

(Ecuación 8)

2.4.5 Estimaciones de las concentraciones intramuros mediante el uso del modelo de zona simple

Modelo de zona simple

El modelo predice las concentraciones en el cuarto de cocinado mediante las emisiones de la estufa y las características de la cocina (Johnson et al., 2011). El modelo adecuado para estufas de leña con chimenea se describe matemáticamente como (Ver (Ecuación 9), (Ecuación 10) y (Ecuación 11):

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

(Ecuación 9)

$$f = \frac{g_{In}}{g_{In} + g_{Ch}}$$

(Ecuación 10)

$$G = g_{In} + g_{Ch}$$

(Ecuación 11)

Donde,

C_t = Concentración del contaminante dentro de la cocina al tiempo t (mg m^{-3});

C_{t-1} = Concentración del contaminante dentro de la cocina que precede al tiempo t (mg m^{-3});

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} or g min^{-1});

f = Fracción de emisiones intramuros (fugitivas) como fracción de las emisiones totales);

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

V = Volumen de la cocina o cuarto de cocinado (m^3).

Parámetros de entrada

Se obtuvieron los parámetros de entrada al modelo, los cuales son representativos de las comunidades mexicanas ubicadas dentro de la región Purépecha de Michoacán. A continuación, se detalla cada parámetro. **Volumen:** El volumen de la cocina se midió para 627 casas típicas, el área de cocina promedio es la misma que informó (Armendáriz-Arnez et al., 2010). **Tasa nominal de intercambio de aire:** El decaimiento del trazador se midió con monóxido de carbono (CO) a 30 ppm (Cowlin, 2005) en una cocina simulada con el mismo volumen de una cocina típica de Michoacán (Armendáriz-Arnez et al., 2010) para determinar el intercambio de aire ($n=31$) (ver Figura 11). Las mediciones se tomaron en días diferentes, una medición cada hora, y asumiendo las velocidades anuales de viento más bajas para representar el peor escenario (cabe mencionar que las velocidades en cada estación del año son muy similares). Una de las limitaciones de hacer mediciones ($n=31$) en la misma cocina en lugar de medir las tasas de intercambio aire en diferentes casas de las comunidades es que la variabilidad se reduce. **Tiempo:** El tiempo de cocción representa el período de tiempo en que la estufa es utilizada ($n = 30$) y se mide en minutos por día. Existen periodos

de cocinado por día en las comunidades, estos periodos son largos y comienzan muy temprano antes del desayuno y terminan hasta después de la comida, durante este periodo los usuarios cocinan tortillas para un consumo familiar de uno o dos días, el desayuno, el almuerzo de los hombres que salen a trabajar y, la comida.

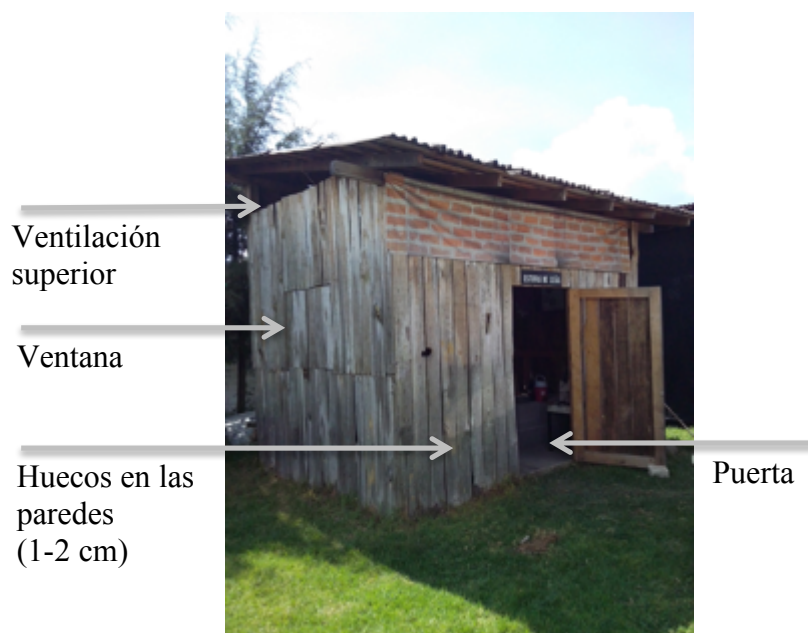


Figura 11. Cocina Simulada. Créditos de la Figura: Víctor Ruiz.

Tasas de emisión total e intramuros

A continuación, se detalla cada parámetro. **Tasa de emisión total:** representa las tasas de emisión determinadas mediante la prueba de ebullición de agua (ver sección 2.2.1) con $n=15$ para cada estufa y $n=60$ para el conjunto de estufas para el conjunto de estufas con chimenea. Las emisiones totales involucran las emisiones en la chimenea y las emisiones fugitivas o intramuros (ver sección 2.4.4). **Tasas de emisión intramuros:** Estas tasas de emisión contemplan solamente las emisiones fugitivas o intramuros para el mismo número de repeticiones y en la misma prueba en que se determinaron las emisiones totales (ver sección 2.4.3).

Fracción de emisiones intramuros

Esta fracción se calcula como se especifica en la (Ecuación 10 y (Ecuación 11 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. Respecto a este parámetro se tiene un conjunto de datos de $n=15$ para cada estufa y $n=60$ para el conjunto de estufas para el conjunto de estufas con chimenea.

Parámetros de salida

Convencionalmente, la concentración de contaminantes de la cocina " C_t " se expresa como la suma de las emisiones interiores ($g_{in} = G \cdot f$) de la estufa más la re-infiltración de contaminantes ambientales. Sin embargo, en esta investigación no se incluye el término de re-infiltración, el objetivo es medir la contribución específica de las estufas. El método de Monte Carlo se utilizó para predecir las distribuciones de $PM_{2.5}$ y las concentraciones de CO. La (Ecuación 9 (con las sustituciones previas de la (Ecuación 10 y (Ecuación 11) se utilizó para ejecutar 10,000 simulaciones que representan las concentraciones dentro de las cocinas en un día de típico de cocinado. Las distribuciones de probabilidad de cada variable fueron seleccionadas antes de ejecutar la simulación de Monte Carlo y la concentración inicial de la cocina se consideró cero. L'Orange et al (2015) también a través de simulación Monte Carlo intenta predecir las concentraciones intramuros con parámetros de entrada similares, pero exclusivamente para el CO con tasas de emisión que se encuentran en niveles (Tiers) 3 y 4 y para estufas que no tienen chimenea.

En el modelo, se considera que la extracción de los 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. Otras fuentes de re-infiltración que involucran fuentes externas (como humo de casas vecinas, estufas adicionales, quema de desechos orgánicos o residuos agrícolas, etc.) son casos muy específicos y por lo tanto tendrán que ser estimados caso por caso. Sutar et al. (2015) muestran las concentraciones ambientales de cualquier fuente en USA y China, donde en ambos lugares estas están por debajo de la meta provisional 1 (Interim Target-1) sugerida por la OMS ($35 \mu\text{g m}^{-3}$ Anual y $75 \mu\text{g m}^{-3}$ durante 24 h), pero

superior a la Guía Final de Calidad del Aire (Final AQG) ($10 \mu\text{g m}^{-3}$ Anual y $25 \mu\text{g m}^{-3}$ durante 24 h). Incluso Naehrer et al (2000) reporta mediciones de concentraciones ambientales de material particulado superiores a estufas de gas LP.

3 RESULTADOS

3.1 Desempeño energético en estufas de leña

3.1.1 Distribución de calor en la plancha de la estufa

La Tabla 2 y Figura 12. Temperaturas en comales y chimenea de la estufa Patsari. muestran las temperaturas en los comales y chimenea de la estufa Patsari. A los 45 min la temperatura en cualquier comal no alcanza un estado estacionario, y es el mismo caso para la chimenea. Las máximas temperaturas se midieron en el comal primario con 475°C y para los comales secundarios 1 y 2 se determinaron en 240 y 179°C respectivamente. Es evidente que las temperaturas en las hornillas secundarias difieren entre sí, esto es debido a que la estufa Patsari es construida *in situ* y su diseño puede sufrir ligeras modificaciones debido a la experiencia de cada constructor (técnico capacitado por GIRA, quien implementa la estufa mediante el Proyecto Patsari). La construcción puede presentar diferentes áreas de estrangulamiento de los gases, lo que aumenta o disminuye su velocidad, el ángulo de inclinación de los ductos puede generar mayor flujo en alguna de las hornillas secundarias lo que puede reflejarse en ganancias en la temperatura en algún comal secundario y bajas en el otro. El comal principal a los 10 min presenta temperaturas adecuadas para cocinar alimentos que requieren mediana potencia (>250°C) y a partir de los 25 min alcanza prácticamente la máxima temperatura (~500°C). Los incrementos en la pendiente de la curva de la chimenea son graduales y nunca superan los 100°C, en contrario a lo que pasa en la curva de temperatura del comal principal donde existe la mayor fluctuación debido a la posición de la flama por debajo del comal (cámaras de combustión grandes pueden presentar este efecto).

Para tiempos mayores a 45 minutos puede encontrarse el estado estacionario de la estufa, aunque pueden generarse pequeños movimientos oscilantes en los valores de la temperatura registrados debido a que es la estufa es un sistema abierto, no adiabático y si dinámico.

Por otro lado, la

Tiempo (min)	Temperatura en el Comal Primario (°C)		Diferencia (°C)	Cambio (%)
	Cámara termográfica	Termómetro de contacto		

0	33	26	-7	22
5	124	128	3	-3
10	352	355	3	-1
15	406	405	-1	0
20	405	401	-4	1
25	474	472	-2	0
30	475	476	1	0
35	449	458	9	-2
40	404	382	-22	6
45	453	390	-63	14

Tabla 3 y Figura 13 muestran una serie de temperaturas comparando las mediciones con un termómetro de contacto y la cámara termográfica. La máxima diferencia fue de 9°C en el intervalo de temperaturas de 0-35 min, después para el intervalo de 40-45 min existe una diferencia de 63°C que puede ser producida por alguna diferencia (segundos) en la medición con el termómetro de contacto o por algún error en la colocación del termómetro de contacto. La Figura 13 muestra ambas curvas sobrepuestas poco antes de los 40 min. Las mediciones con la cámara termográfica muestran ser certeras respecto a un termómetro de contacto, estas validaciones deben realizarse cada vez que se haga una evaluación ya que las propiedades físicas de los comales pueden modificarse por la oxidación del material.

La Tabla 4 muestra la secuencia de imágenes termográficas de la estufa Patsari en distintos intervalos de tiempo. Estas imágenes muestran una buena distribución de calor en la superficie de los tres comales, y también se muestra mediante la intensidad de los colores, como las temperaturas son diferentes entre uno y otro comal secundario.

Tabla 2. Temperaturas en comales y chimenea de la estufa Patsari medidas mediante la cámara termográfica.

Tiempo (min)	Temperatura Comal Primario (°C)	Temperatura Comal Secundario 1 (°C)	Temperatura Comal Secundario 2 (°C)	Temperatura Chimenea (°C)
0	33	34	33	29
5	124	47	44	30
10	352	112	96	49
15	406	151	110	52
20	405	173	140	63
25	474	240	177	75
30	475	227	179	71
35	449	227	191	70
40	404	287	204	82
45	453	259	218	87

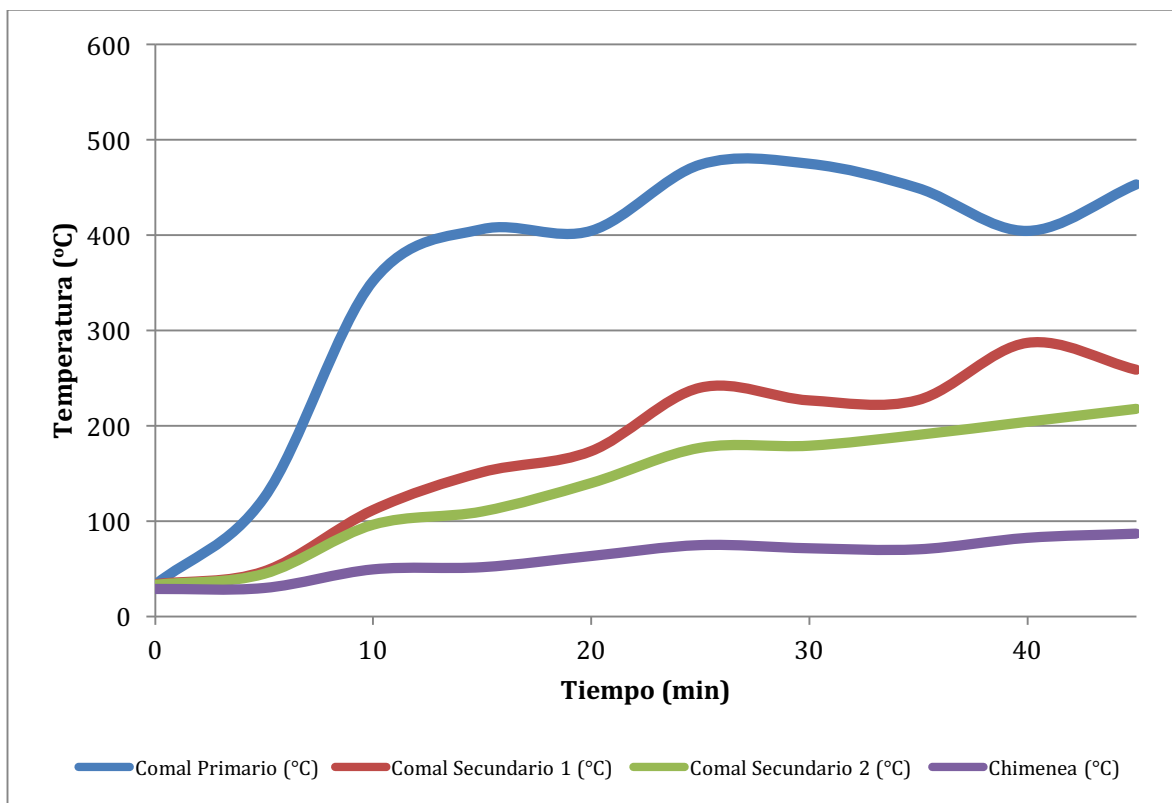


Figura 12. Temperaturas en comales y chimenea de la estufa Patsari.

Tabla 3. Validación de temperaturas medidas en el comal principal de la estufa Patsari.

Tiempo (min)	Temperatura en el Comal Primario (°C)		Diferencia (°C)	Cambio (%)
	Cámara termográfica	Termómetro de contacto		
0	33	26	-7	22
5	124	128	3	-3
10	352	355	3	-1
15	406	405	-1	0
20	405	401	-4	1
25	474	472	-2	0
30	475	476	1	0
35	449	458	9	-2
40	404	382	-22	6
45	453	390	-63	14

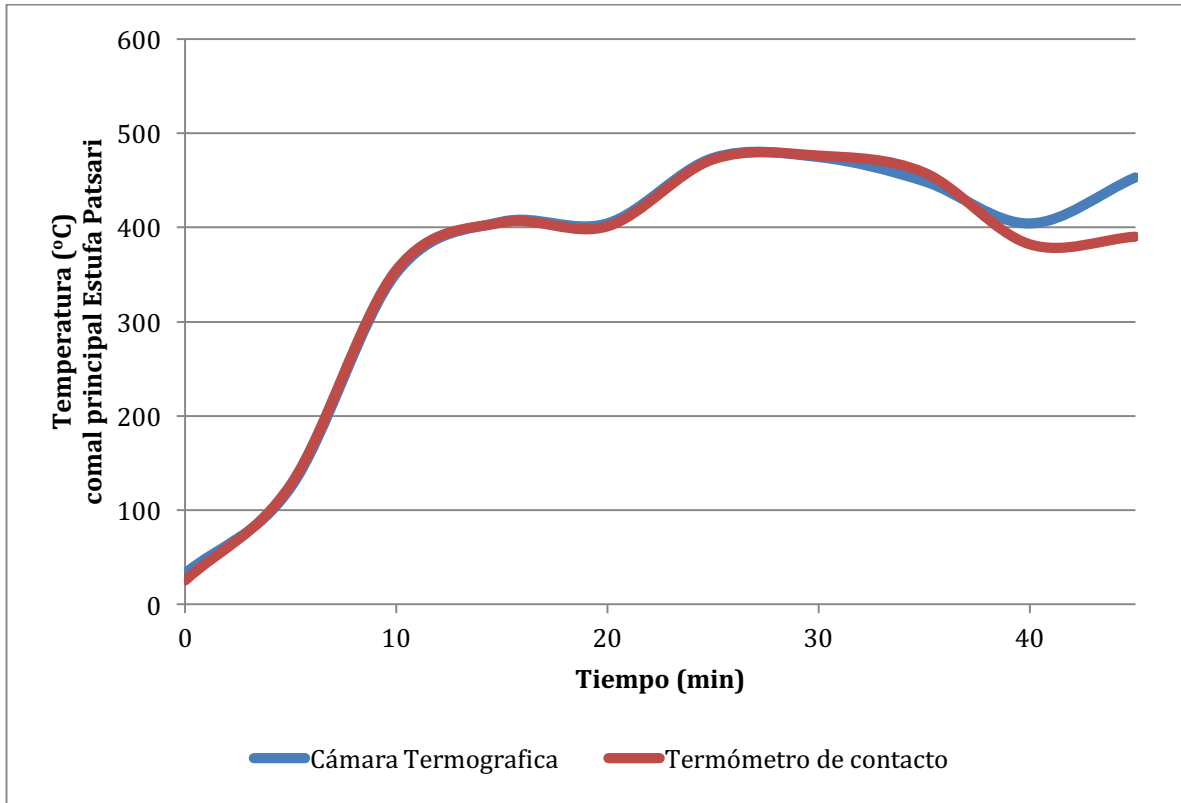
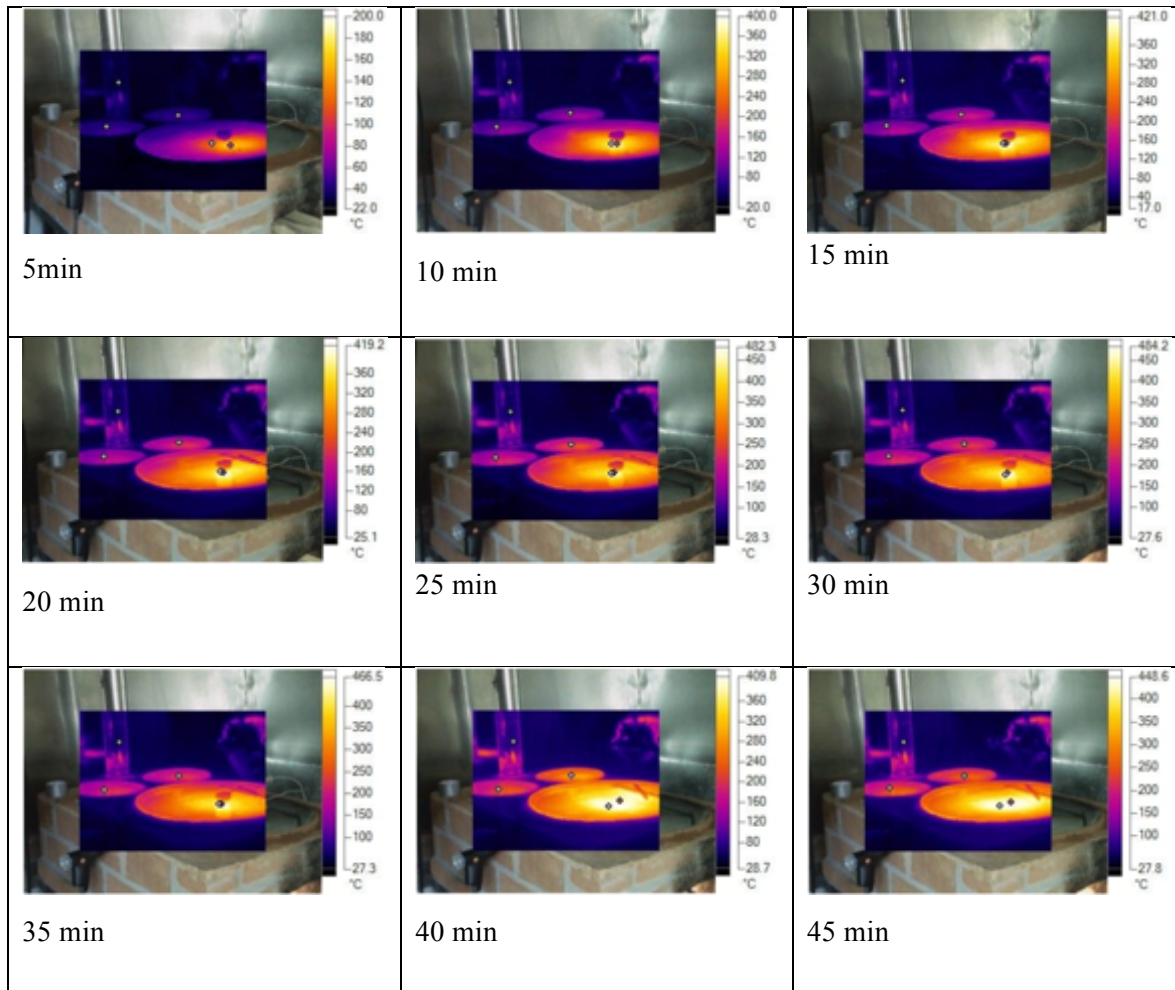


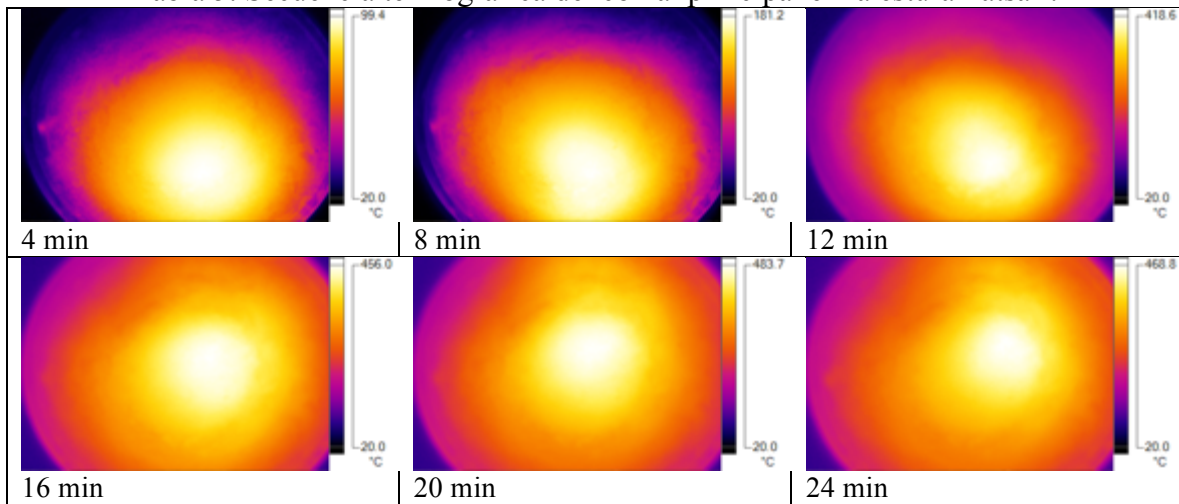
Figura 13. Validación de temperaturas medidas en el comal principal de la estufa Patsari.

Tabla 4. Secuencia termográfica en la estufa Patsari, incluyendo el comal principal, los comales secundarios y la chimenea.



La Tabla 4 muestra la imagen de las temperaturas de los diferentes objetos de interés (comales, chimenea, e incluso superficie), mientras que la Tabla 5, muestra a mayor detalle la imagen del comal principal de la estufa. Se observa que la distribución sobre la superficie es homogénea, y que se crean regiones en forma de anillos donde la temperatura decrece conforme se aleja del centro. Las máximas temperaturas se encuentran al centro de comal y oscilan casi en los 500°C. Por otro lado, la región más fría se encuentra en la parte externa de la superficie del comal con temperaturas entre los 100-150°C. También se observa que la estufa Patsari a los 12 min alcanza temperaturas de 418°C, y se mantienen con una distribución homogénea hasta los 24 min con una temperatura máxima de 483 °C.

Tabla 5. Secuencia termográfica del comal principal en la estufa Patsari.



Nota: La Tabla 4 y la Tabla 5 no corresponden a la misma prueba, Tabla 5 tiene como objetivo mostrar a detalle exclusivamente las mediciones en el comal principal.

3.1.2 Determinación de la temperatura, oxígeno y monóxido de carbono en el interior de la estufa

La

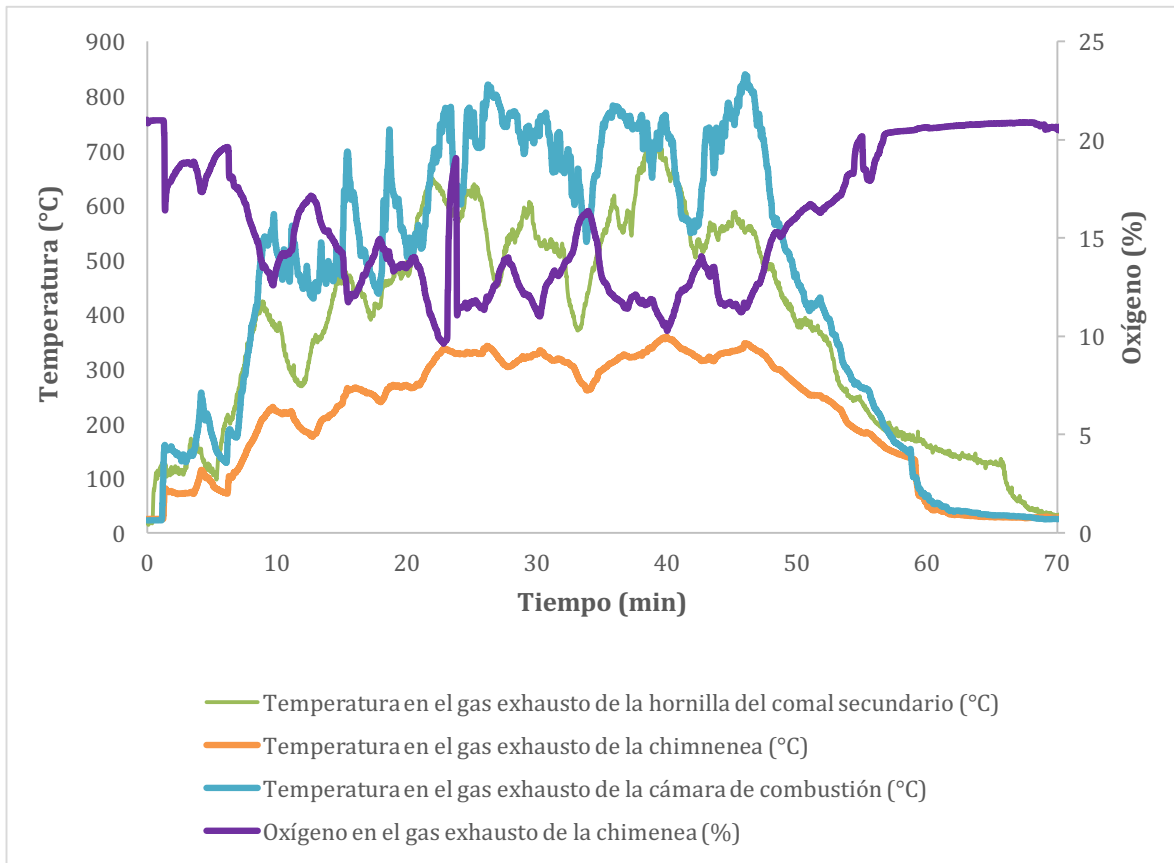


Figura 14 muestra el comportamiento del oxígeno en el interior de la estufa Patsari, así como de la temperatura de los gases en la cámara de combustión, en la chimenea y en una hornilla secundaria. La temperatura máxima en la cámara de combustión es de aproximadamente 800°C (en su periodo más estable, aproximadamente después de los 20 minutos de iniciales de operación de la estufa). El oxígeno en la cámara de combustión no es posible medirlo debido a la fluctuación que presentan las mediciones, ya que la mezcla de gases con el aire primario aún no es homogénea en ese punto. Existe un desempeño similar entre las curvas de temperatura (°C) de la hornilla secundaria y de la cámara de combustión, ambas curvas muestran un comportamiento inverso a la concentración de oxígeno (%); un exceso de oxígeno (aire del ambiente) puede enfriar los gases y generar menores temperaturas en las superficies de los comales. La Figura 15 muestra el comportamiento de los gases de monóxido de carbono y oxígeno en la chimenea de la estufa Patsari, los gases tienen un comportamiento inverso, las concentraciones de CO podrían reducirse si existe mayor tiempo

de residencia de los gases, si se garantiza un mezclado perfecto de los gases o, si se garantizará un ligero exceso de la concentración teórica de oxígeno.

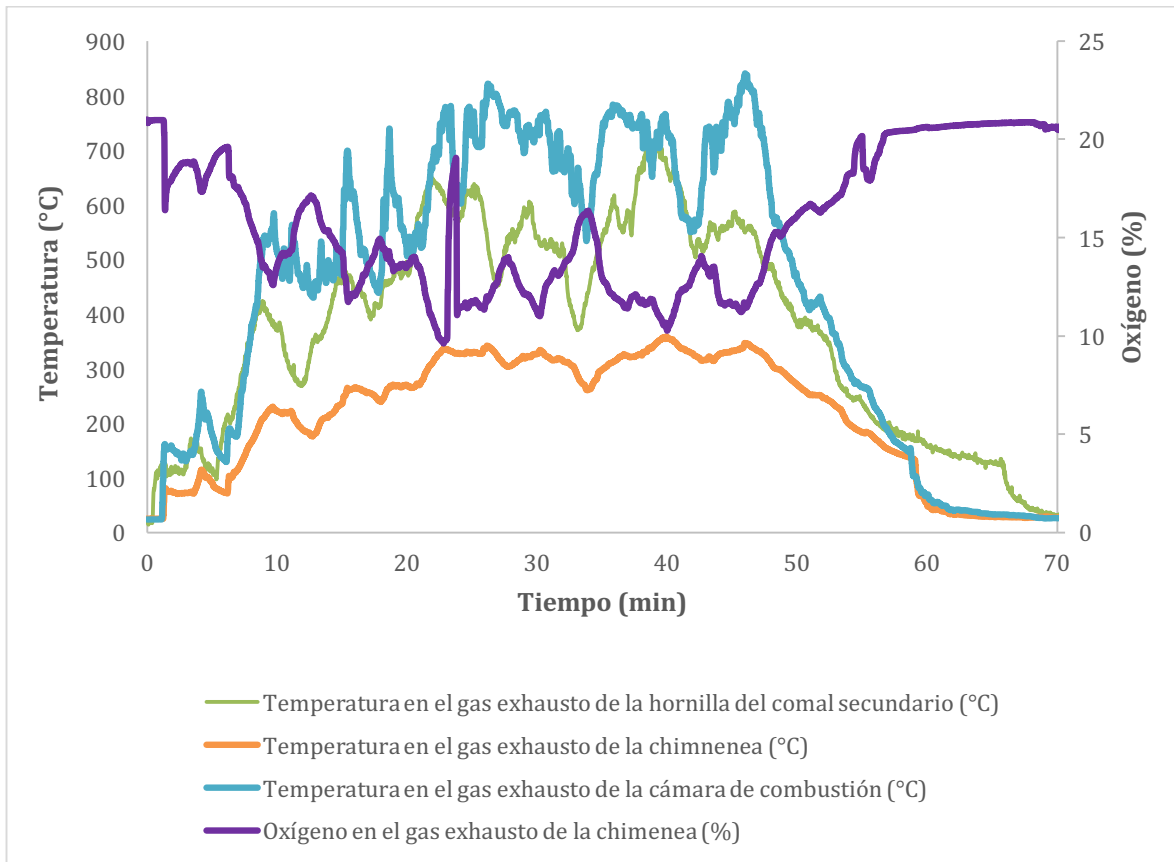


Figura 14. Medición de la temperatura (°C) y del oxígeno (%) en diferentes puntos internos de la estufa Patsari.

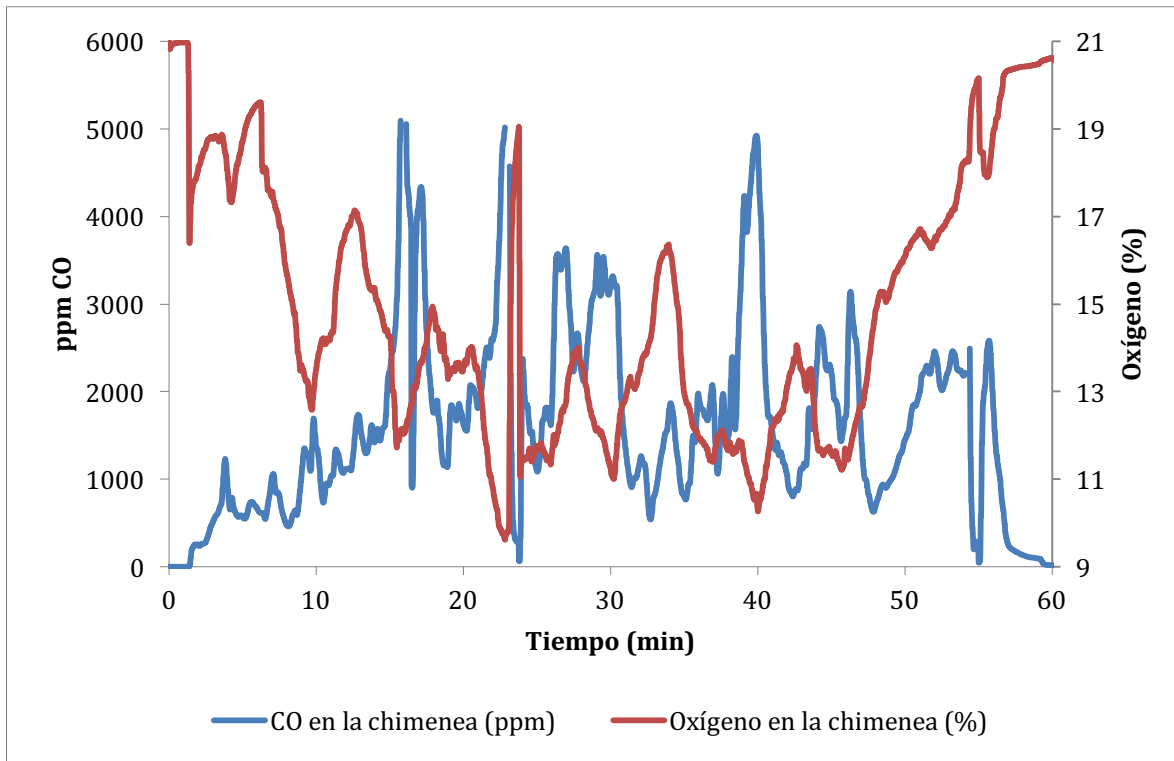


Figura 15. Mediciones de monóxido de carbono (ppm) y oxígeno (%) en la chimenea de la estufa Patsari.

3.1.3 Eficiencia térmica

La Tabla 6 y la Figura 16 muestran los resultados de la Eficiencia Térmica (TE) y el Consumo Específico de Leña (SFC) medidos en la estufa Patsari. El área de transferencia es un parámetro importante en la transferencia de calor tanto en alto poder como en bajo poder. La mayor TE corresponde al Comal-olla (A-70%) con 32(3) %, pero también se muestra que el Comal-olla (A-100%) con 31(2) % no es muy diferente; ambos en alto poder. Por otro lado, la mayor eficiencia reportada es para el Comal-olla (A-100%) con una TE de 38(7) % en baja potencia. El rango de áreas óptimas se encuentra entre 60-100% para tener las mayores ET, al aumentar área, decrece la altura de la columna de agua lo que provoca que mayor cantidad de agua esté en contacto con el área de transferencia de calor.

Tanto el diseño de olla Mylar como el de Comal-olla mejoran la transferencia de calor, pero no logran el desempeño que tiene una estufa que trabaja a fuego directo. Para este último

caso, las llamas que salen de la estufa cubren el área de la base de una olla de aluminio, pero también parte de la superficie de la pared de la olla (la altura que alcanza la llama sobre la pared de la olla es variable y depende del tipo de estufa).

Tabla 6. Eficiencia Térmica (%) usando diferentes tipos de recipientes y áreas de transferencia de calor, en una prueba WBT utilizando la estufa Patsari.

Tipo de recipiente	Parámetro	Promedio ± SD	Sub-Tier	Tier	A (cm ²)	h (cm)
Ollas aluminio (A-22%)	TE-AP%	7(1)	0	0	507	10
	TE-BP%	16(1)	1			
Comal-olla (A-100%)	TE-AP%	31(2)	2	2	2290	2
	TE-BP%	38(7)	3			
Comal-olla (A-70%)	TE-AP%	32(3)	2	2	1603	3
	TE-BP%	29(1)	2			
Comal-olla (A-40%)	TE-AP%	24(2)	1	1	916	5
	TE-BP%	24(2)	1			
Mylar (A-22%)	TE-AP%	22(3)	1	1	507	10
	TE-BP%	17(0)	1			
Mylar (A-60%)	TE-AP%	26(3)	2	1	1374	4
	TE-BP%	18(2)	1			

Nota: TE= eficiencia térmica, AP=alto poder, BP=bajo poder, material (Área en % respecto al total del comal).

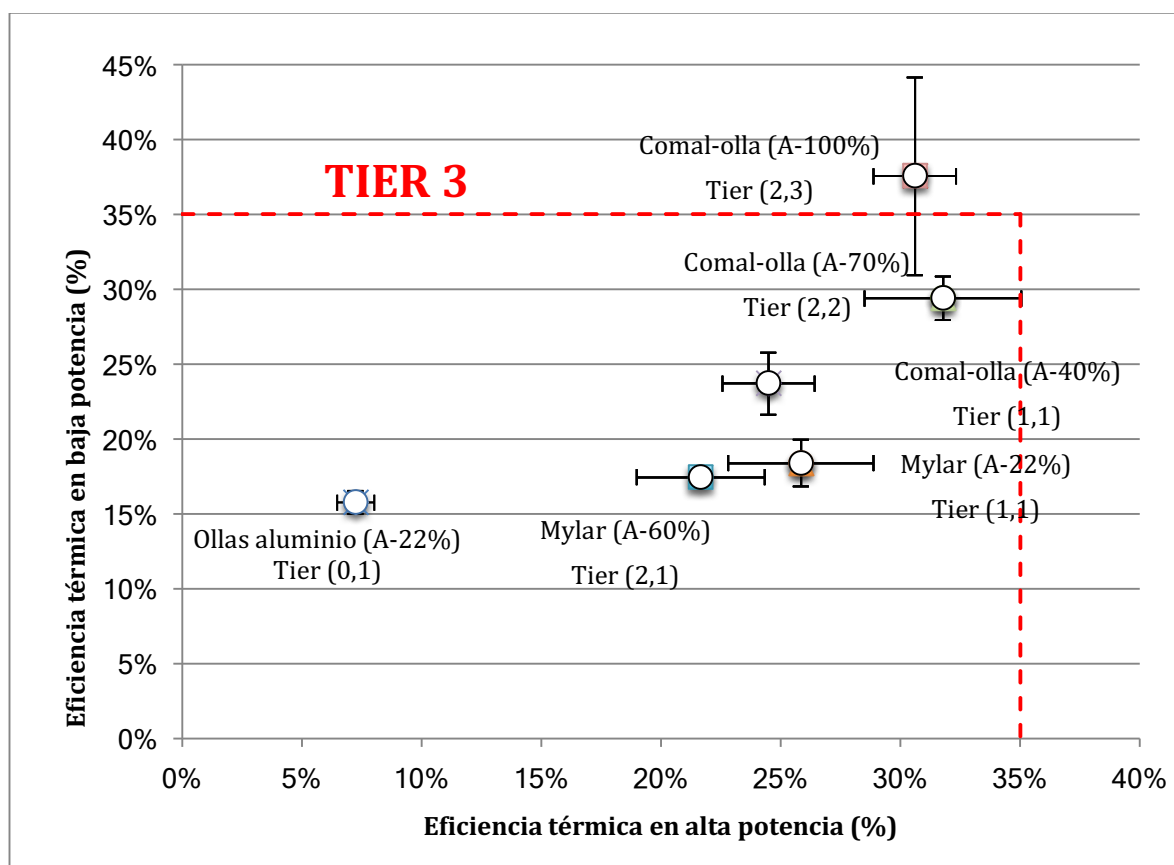


Figura 16. Indicadores (Tiers) de eficiencia térmica (%) en alta y baja potencia, Estufa Patsari.

3.2 Emisiones de estufas de leña en laboratorio

3.2.1 Factores de emisión en la chimenea

Aerosoles:

Material particulado (2.5 micras)

Respecto a la tasa de emisiones en la chimenea de material particulado (PM_{2.5}), la estufa Patsari tiene la tasa de emisión más baja con 52 mg min⁻¹ con un rango de 18-126 mg min⁻¹. Por otra parte, la estufa Mera-Mera presenta la tasa más alta con 76 mg min⁻¹ y un rango de 24-183 mg min⁻¹. La Tabla 7 muestra todos los dispositivos evaluados y el promedio de todas las estufas con chimenea evaluadas, con una tasa de emisión promedio de material particulado (PM_{2.5}) de 63 mg min⁻¹ y un rango de 16-201 mg min⁻¹.

Tabla 7. Tasas de emisión PM_{2.5} en la chimenea para diferentes modelos de estufas.

Estufa	Promedio (SD)	Min	Max
ONIL	52(32)	18	126
Ecostufa	75(52)	16	201
Mera-Mera	76(47)	24	183
Patsari	50(21)	16	87
Estufas con chimenea	63(41)	16	201

Nota: El PM_{2.5} esta expresado en mg min⁻¹, SD=desviación estándar.

Aerosoles carbonosos

Las masas de carbono negro (CN) deben tener una saturación adecuada, si los filtros son demasiado blancos o negros el equipo presenta un error en la lectura. Como el equipo mide la transmitancia de luz infrarroja que pasa a través del filtro, es necesario medir la atenuación (ATN) que es la relación entre un filtro blanco y un filtro con muestra. Siempre es necesario adecuar la dilución de los gases, esta dilución cambiará dependiendo del tipo de estufa. La manera más fácil de no saturar los filtros es disminuir la concentración de contaminantes o reemplazar el filtro una o varias veces durante la prueba de evaluación. Para el caso de OC y EC, la saturación no importa ya que la masa carbonosa de estos compuestos se combustiona para determinar su proporción. La Tabla 8 muestra mediciones de CN, EC y OC. En ambas pruebas, WBT y CCT, se muestra una mayor contribución del OC respecto al EC. Los

factores de emisión de CN, OC y EC son mayores en la prueba WBT respecto a la prueba CCT. Las tasas de emisión de OC respecto al EC son de un orden de magnitud de tres veces mayor en la prueba WBT, y un orden de magnitud dos veces mayor en una prueba CCT.

Tabla 8. Concentraciones de aerosoles carbonosos (EC, OC y CN) en pruebas WBT y CCT en la estufa Patsari.

Contaminante	Parámetro	Unidades	Prueba	
			WBT	CCT
CN	Factor por consumo de leña seca	g/Kg	0.6 (0.1)	0.7(0.1)
EC			0.9 (0.5)	0.9(0.3)
OC			2.6 (0.8)	1.3(0.6)
CN	Factor por energía consumida	mg/MJ	51.2 (12.7)	54.2(10.8)
EC			78.4 (45.8)	69.6(20.2)
OC			224.1 (56.7)	106.5(44.4)
CN	Factor por volumen de agua calentada	mg/L	235.8 (42.2)	NA
EC			375.0 (217.2)	NA
OC			1056.7 (210.3)	NA
CN	Factor por masa de Tortilla	mg/Kg	NA	493.6(102.3)
EC			NA	631.5(177.0)
OC			NA	963.6(384.6)
CN	Tasa de emisión	mg/min	22.4 (12.2)	23.0(6.3)
EC			36.9 (17.2)	29.0(7.8)
OC			106.7 (39.0)	45.5(19.9)

Nota: CN=carbono negro, EC=carbono elemental, OC=carbono orgánico, WBT=prueba de ebullición de agua, CCT=prueba de cocinado controlado. Promedio (desviación estándar). La prueba de WBT contempla inicio en caliente en alta potencia, mientras que la prueba CT contempla 1.5 Kg de masa.

Gases:

Monóxido de carbono

La tasa de emisiones de Monóxido de Carbono (CO) en la chimenea en la estufa ONIL tiene los valores más bajos con 594 mg min^{-1} (133-1161 mg min^{-1}) [media (rango)] mientras que la estufa Patsari presenta los valores más altos con 1645 mg min^{-1} (271 – 3364 mg min^{-1}). Se muestra el promedio de las estufas con chimenea evaluadas con una tasa de emisión de 1104 mg min^{-1} (133-3364 mg min^{-1}) (ver Tabla 9).

Tabla 9. Tasas de emisión CO en la chimenea para diferentes modelos de estufas.

Estufa	Promedio (SD)	Min	Max
ONIL	594(332)	133	1161
Ecostufa	931(588)	147	1809
Mera-Mera	1244(543)	434	2105
Patsari	1645(965)	271	3364
Estufas con chimenea	1104(743)	133	3364

Nota: El CO esta expresado en mg min^{-1} , SD=desviación estándar.

Metano e hidrocarburos

La determinación de emisiones de metano y otros hidrocarburos provenientes de la combustión de leña se muestra en la Tabla 10. Los factores de emisión del metano son mayores que el resto de los contaminantes medidos en las pruebas de ebullición de agua y cocinado controlado, mientras que la menor contribución la tienen el propileno. El metano contribuye con 1745(844) mg/Kg de leña seca en una prueba WBT, y con 348(193) en una prueba CCT, mientras que para el caso del propileno es 98(63) y 30(15), respectivamente. Los parámetros calculados muestran un orden de magnitud cinco veces mayor en la prueba WBT que en la prueba CCT.

Tabla 10. Factores de emisiones de Metano e hidrocarburos en una prueba WBT y CCT en la estufa Patsari

Contaminante	Parámetro	Unidades	Prueba	
			WBT	CCT
Metano	Factor por consumo de leña seca	mg/Kg	1745(844)	348(193)
Etano			115(57)	44(19)
Etileno			891(455)	208(79)
Acetileno			581(261)	136(51)
Propileno			98(63)	30(15)
Metano	Factor por energía consumida	mg/MJ	153(77)	29(17)
Etano			10(5)	4(2)
Etileno			78(41)	17(8)
Acetileno			51(23)	11(5)
Propileno			9(6)	2(1)
Metano	Factor por volumen de agua calentada	mg/L	724(395)	NA
Etano			48(28)	NA
Etileno			369(208)	NA
Acetileno			239(113)	NA
Propileno			41(30)	NA
Metano	Factor por masa de Tortilla	mg/Kg	NA	268(173)
Etano			NA	33(17)
Etileno			NA	159(79)
Acetileno			NA	104(51)
Propileno			NA	23(13)
Metano	Tasa de emisión	mg/min	78(56)	13(9)
Etano			5(4)	2(1)
Etileno			40(29)	8(4)
Acetileno			26(17)	5(3)
Propileno			5(4)	1(1)

Nota: CH₄=metano, HC=hidrocarburos, WBT=prueba de ebullición de agua, CCT=prueba de cocinado controlado. La prueba de WBT contempla inicio en caliente en alta potencia, mientras que la prueba CT contempla 1.5 Kg de masa. Promedio (desviación estándar).

3.2.2 Factores de emisión Intramuros

Aerosoles:

Material particulado (2.5 micras)

Respecto a la tasa de emisiones intramuros de material particulado (PM_{2.5}), la estufa Patsari presenta la tasa de emisión más alta con 3.9 mg min⁻¹ y un rango de 0.0-7.7 mg min⁻¹. Por otra parte, la estufa ONIL presenta la tasa más baja con 2.1 mg min⁻¹ y un rango de 0.4-5.2 mg min⁻¹. Se muestra el promedio de todas las estufas con chimenea evaluadas con una tasa de emisión promedio de material particulado (PM_{2.5}) de 3.0 mg min⁻¹ (0.0-7.7 mg min⁻¹) (ver Tabla 11).

Tabla 11. Tasas de emisión PM_{2.5} intramuros para diferentes modelos de estufas.

Estufa	Promedio (SD)	Min	Max
ONIL	2.1(1.3)	0.4	5.2
Ecostufa	3.5(1.9)	1.0	7.3
Mera-Mera	2.4(1.6)	0.2	6.0
Patsari	3.9(2.1)	0.0	7.7
Estufas con chimenea	3.0(1.8)	0.0	7.7

Nota: El PM_{2.5} esta expresado en mg min⁻¹, SD=desviación estándar.

Gases:

Monóxido de carbono

La tasa de emisiones intramuros de monóxido de carbono (CO) en la estufa Ecostufa tiene los valores más bajos con 5 mg min⁻¹ y un rango de 0-11 mg min⁻¹, mientras que la estufa Mera-Mera presenta los valores más altos con 20 mg min⁻¹ y un rango de 1 – 54 mg min⁻¹. Se muestra el promedio de las estufas con chimenea evaluadas con una tasa de emisión de 12 mg min⁻¹ y un rango de 0-54 mg min⁻¹ (ver Tabla 12).

Una chimenea proporciona un tiro de succión de aire en la estufa para eliminar los gases de combustión de la cocina (Sutar et al., 2015). La Figura 17 muestra la tasa de combustión de carbono de estratificación de las emisiones totales (100%, 35% y 15%) y las emisiones intramuros. Por lo anterior, la tasa de emisiones intramuros debe ser medida para cada tipo de estufa con chimenea usadas en Centroamérica y Sudamérica y no asumir un promedio de 25% con desviación estándar de 10%. Esta suposición muestra tasas de emisión y niveles (TIERS) de emisión intramuros sobreestimados. Las estufas evaluadas muestran diferentes tasas de emisiones intramuros con respecto a los diversos supuestos (ver Tabla 13 y Figura 17). La tasa de emisión en interiores debe ser medida en pruebas de laboratorio. La correcta medición de emisiones en interiores podría estimar la concentración de contaminantes en la cocina utilizando un modelo de zona simple con simulación Monte Carlo.

De acuerdo con las pautas provisionales de desempeño propuestas en el Taller Internacional de Acuerdos ISO (IWA 11: 2012), las estufas que cumplen con el Nivel 3 para emisiones en

interiores son consideradas estufas limpias para la salud (GACC, 2016), por lo que para este estudio las estufas mexicanas más diseminadas se consideran limpias y no afectan la salud de los usuarios (ver Figura 17). La GACC (2016) muestra cómo el uso de cocinas limpias contribuye al logro de los Objetivos Globales (Objetivos 1, 3 y 11); La cocción limpia evita la contaminación del aire ambiente y reduce las emisiones de humo intramuros.

Tabla 12. Tasas de emisión CO intramuros para diferentes modelos de estufas.

Estufa	Promedio (SD)	Min	Max
ONIL	12(12)	0	38
Ecostufa	5(3)	0	11
Mera-Mera	20(16)	1	54
Patsari	11(11)	1	33
Estufas con chimenea	12(12)	0	54

Nota: El CO esta expresado en mg min^{-1} , SD=desviación estándar.

Tabla 13. Indicadores (Tiers) para las tasas de emisiones intramuros de monóxido de carbono (CO) y material particulado ($\text{PM}_{2.5}$) en cuatro modelos de estufas con chimeneas.

Emisión intramuros	Contribución	Patsari	Mera-Mera	Ecostufa	ONIL
CO	100%	0	0	0	1
	35%	1	2	3	4
	15%	4	4	4	4
	Intramuros	4	4	4	4
$\text{PM}_{2.5}$	100%	0	0	0	0
	35%	1	1	1	1
	15%	2	2	2	2
	Intramuros	3	3	3	3

Nota: 100, 35 y 15% representan los porcentajes asumidos respecto a las emisiones totales, intramuros representa la medición directa de las emisiones fugitivas. Cada indicador es un promedio de las fases de la prueba de ebullición de agua.

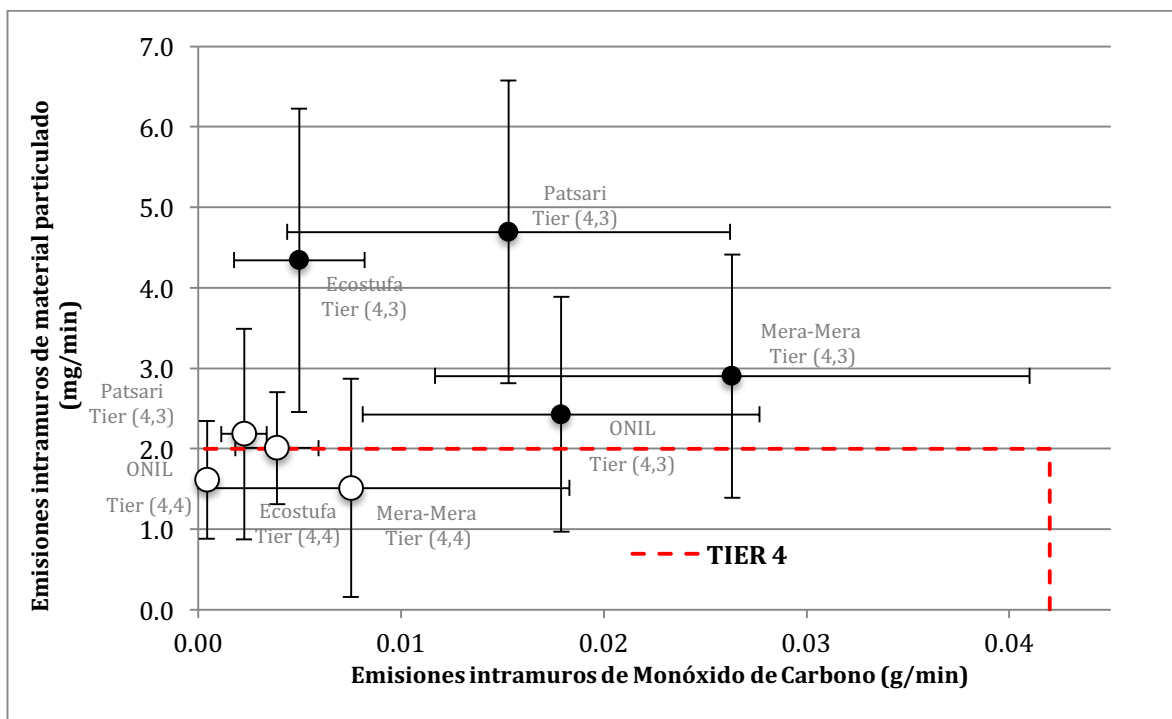


Figura 17. Indicadores (Tiers) de material particulado ($PM_{2.5}$) y monóxido de carbono (CO) intramuros de cuatro modelos de estufa con chimenea. Nota: Los círculos negros representan el promedio de la fase de inicio frío y caliente en alto poder de la prueba de ebullición de agua, mientras que los círculos blancos representan bajo poder.

Tabla 14. Factores de emisiones de cuatro modelos de estufas en la prueba WBT.

Fase	Parámetro	Patsari	Mera-Mera	Ecostufa	ONIL
Alto Poder: Inicio frío y caliente	MCE (%)	97 ± 1	96 ± 1	98 ± 0	98 ± 0
	g(c)CO/kg(c)CO ₂	31 ± 6	40 ± 7	18 ± 3	19 ± 4
	gCO	98 ± 17	65 ± 11	42 ± 9	38 ± 7
	gPM _{2.5}	2.6 ± 0.6	3.8 ± 1.5	3.5 ± 1.2	3.2 ± 1.0
Bajo Poder	MCE (%)	98 ± 1	97 ± 1	99 ± 0	99 ± 0
	g(c)CO/kg(c)CO ₂	20 ± 6	31 ± 6	13 ± 4	14 ± 5
	gCO	20 ± 6	28 ± 9	10 ± 3	11 ± 5
	gPM _{2.5}	1.8 ± 1.0	1.8 ± 1.0	1.1 ± 0.3	1.3 ± 0.3

3.2.3 Factores de emisiones totales

Aerosoles:

Material particulado (2.5 micras)

La tasa total de emisiones de material particulado ($PM_{2.5}$) para las estufas Patsari y ONIL tienen las tasas de emisión más bajas con 57 mg min^{-1} con un rango de $20\text{-}89 \text{ mg min}^{-1}$ y $22\text{-}127 \text{ mg min}^{-1}$ respectivamente. Por otra parte, la estufa Ecostufa presenta la más alta con 82 mg min^{-1} ($18\text{-}203 \text{ mg min}^{-1}$). Se muestra el promedio de todas las estufas con chimenea evaluadas para la tasa de emisión de material particulado ($PM_{2.5}$) es de 69 mg min^{-1} ($18\text{-}203 \text{ mg min}^{-1}$) (ver Tabla 15).

Tabla 15. Tasas de emisión $PM_{2.5}$ (mg min^{-1}) totales para diferentes modelos de estufas.

Estufa	Promedio (SD)	Min	Max
ONIL	55(32)	20	127
Ecostufa	79(52)	18	204
Mera-Mera	78(48)	25	186
Patsari	54(21)	18	88
Estufas con chimenea	66(41)	18	204

Nota: El $PM_{2.5}$ esta expresado en mg min^{-1} , SD=desviación estándar.

Gases:

Monóxido de carbono

La tasa total de emisiones de Monóxido de Carbono (CO) en la estufa ONIL tiene los valores más bajos con 619 mg min^{-1} ($135\text{-}1207 \text{ mg min}^{-1}$) [media (rango)] mientras que la estufa Patsari presenta los valores más altos con 1663 mg min^{-1} ($282\text{-}3425 \text{ mg min}^{-1}$). Se muestra el promedio de las estufas con chimenea evaluadas con una tasa de emisión de 1122 mg min^{-1} ($135\text{-}3425 \text{ mg min}^{-1}$) (ver Tabla 16).

Tabla 16. Tasas de emisión CO (mg min⁻¹) totales para diferentes modelos de estufas.

Estufa	Promedio (SD)	Min	Max
ONIL	606(338)	134	1184
Ecostufa	936(589)	149	1820
Mera-Mera	1264(554)	436	2141
Patsari	1656(973)	273	3397
Estufas con chimenea	1116(749)	134	3397

Nota: El CO esta expresado en mg min⁻¹, SD=desviación estándar.

3.3 Estimaciones de concentraciones intramuros mediante el modelo de zona simple

Parámetros de entrada:

La Tabla 18 muestra los diferentes parámetros de entrada del modelo de zona simple. Incluye, periodos de cocinado y tasas de ventilación. La Tabla 17 muestra las tasas de emisión por contaminante y estufa (ver sección 3.2), así como la fracción de emisiones fugitivas respecto a las emisiones totales del dispositivo.

A continuación, se detallan los resultados de los parámetros de entrada. **Volumen:** El volumen de las cocinas en Michoacán comprende el espacio de la cocina y el comedor con un volumen promedio de 41 m³. **Tiempo:** Las mujeres generalmente comienzan a cocinar desde temprano en la mañana. Para las costumbres mexicanas en las zonas rurales no hay eventos de cocinado (desayuno, comida y cena), sino que hay un período de operación en el que las cocineras cocinan alimentos que incluyen tortillas (tortillas son una guarnición para cualquier plato a cualquier hora del día), desayuno y la cena. El periodo medio de operación diario de las estufas es extenso con un promedio de 259 min y similar al reportado por Armendáriz-Arnez et al. (2010). **Tasa nominal de intercambio de aire:** Los materiales de la cocina, las paredes y los diseños de cocina son diversos (sin paredes, tres paredes, cuatro paredes, paredes de ladrillo, tablas de madera con y sin huecos) que afecta el intercambio de aire entre la cocina y el exterior. Las cocinas típicas mexicanas son de cuatro paredes, paredes con tablones de madera y huecos (1 cm) (Masera et al., 2007; Armendáriz-Arnez et al., 2010) y, con una puerta y una ventana (Figura 11). Armendáriz-Arnez et al. (2010) muestra también

cocinas con tablas de madera separadas por huecos (43% de espacios <1 cm, 33% espacios <1 cm y 19% sin espacios). **Tasa de Emisiones de Contaminantes (CO y PM_{2.5}):** Las emisiones totales se describen en la sección 2.4.4). **Fracción.** El porcentaje promedio de emisiones en interiores respecto a las emisiones totales producidas por estufas con chimeneas se estimó en un 5% (0-15%) para las emisiones de PM_{2.5} y un 1% (0-8%) para las emisiones de CO. Estos valores son muy inferiores a los sugeridos por las directrices de la OMS (2014) con 25 ± 10% para PM_{2.5} y por Smith et al. (2010) con un 10%. El porcentaje de PM_{2.5} tiene un promedio mínimo de 3% (1-8%) para la Mera-Mera y un máximo de 7% (0-13%) para la estufa Patsari, mientras que el porcentaje mínimo de CO es 1% (0-1%) para la estufa Patsari y la mayor con 2% (0-8%) para ONIL (ver Tabla 17).

Tabla 17. Fracciones de contaminantes intramuros (CO y PM_{2.5}) respecto a las emisiones totales de los diferentes modelos de estufas.

Estufa	Contaminante(Unidades)	Promedio(SD)	Min	Max
ONIL	PM _{2.5} (Adimensional)	0.05(0.03)	0.00	0.11
	CO (Adimensional)	0.02(0.02)	0.00	0.08
Ecostufa	PM _{2.5} (Adimensional)	0.06(0.04)	0.01	0.15
	CO (Adimensional)	0.01(0.01)	0.00	0.03
Mera-Mera	PM _{2.5} (Adimensional)	0.03(0.02)	0.01	0.08
	CO (Adimensional)	0.01(0.01)	0.00	0.03
Patsari	PM _{2.5} (Adimensional)	0.07(0.03)	0.00	0.13
	CO (Adimensional)	0.01(0.0)	0.00	0.01
Chimney-Stoves tested	PM _{2.5} (Adimensional)	0.05(0.03)	0.00	0.15
	CO (Adimensional)	0.01(0.01)	0.00	0.08

Tabla 18. Parámetros de entrada al modelo de zona simple.

Parámetro	Unidades	Promedio(SD)	Min	Max
Volumen Cocina (V)	m ³	41(12)	5	97
Tiempo de cocinado (t)	min/día	259()	60	480
Tasa nominal de intercambio de aire (α)	ACH	60(7)	36	90

Parámetros de salida:

Concentración en el cuarto de cocinado

La Tabla 19 presenta un resumen de las concentraciones de salida, así como el porcentaje de simulaciones que cumplen con las respectivas concentraciones de PM_{2.5} (concentraciones medias anuales, Objetivo Intermedio 1) y CO (AQG 24 h) de las AQG de la OMS.

Las concentraciones promedio estimadas de PM_{2.5} oscilaron entre 12 y 24 µg m⁻³ dependiendo del modelo de estufa. Todas las estufas están por debajo de la Propuesta-1 de la WHO (2005) que es 35 µg m⁻³. Por otro lado, las concentraciones medias estimadas de CO (24 h) oscilaron entre 0.04 y 0.06 mg m⁻³ dependiendo de la estufa, lo que muestra que todos están muy por debajo de los 7 mg m⁻³ (AQG) sugeridos por la OMS (2010) (ver

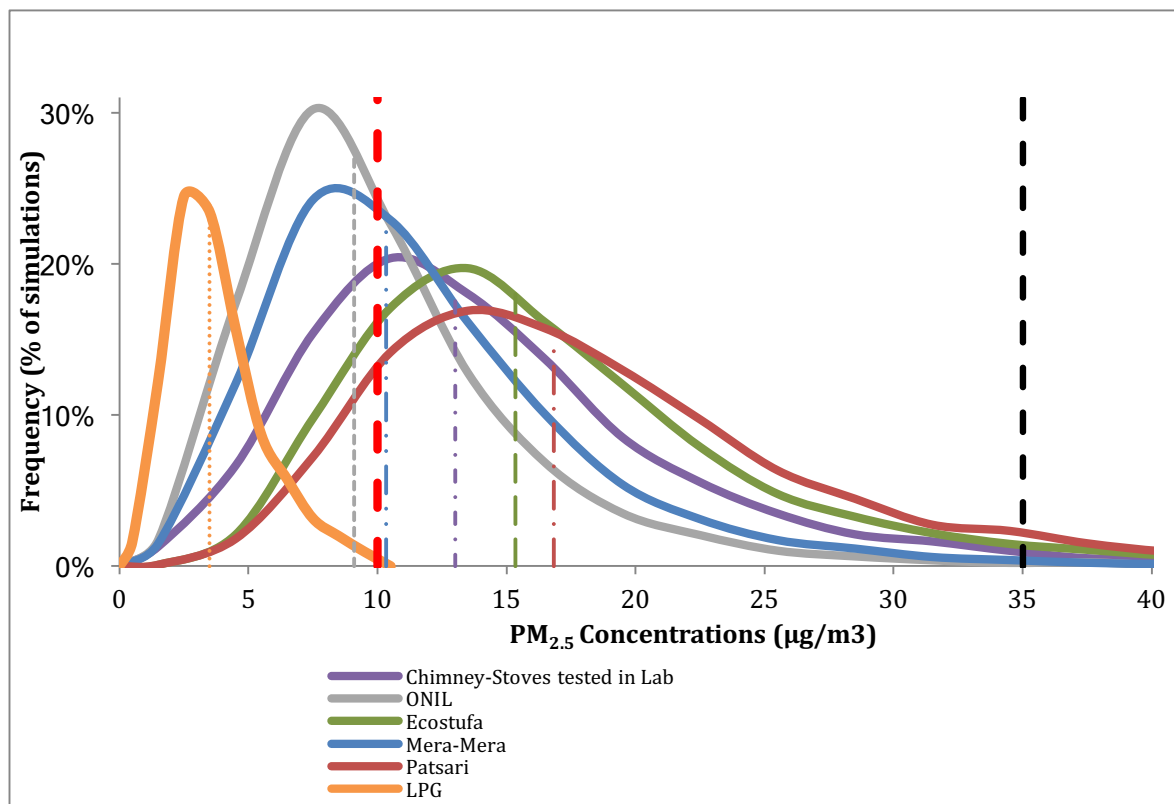


Figura 18 y Figura 19).

El 99% de las cocinas que tienen una estufa ONIL y Mera-Mera muestran concentraciones por debajo de la recomendada por la OMS para PM_{2.5}. Estas primeras estimaciones pueden

reducir los costos de las mediciones de campo, estos costos altos son consecuencia de los grandes tamaños de muestra necesarios para una muestra estadística (L'Orange et al., 2015) con bajos coeficientes de variación (Garland et al., 2016). La validación de la variable de salida del modelo de zona simple puede proporcionar una distribución robusta (n=10,000) y así evitar mediciones de campo y estimaciones irregulares. La contaminación del aire interior está fuertemente afectada por el rendimiento de la combustión y la ventilación (Grieshop et al., 2011). Para estufas con chimenea, la chimenea proporciona la ventilación de la mayoría de los contaminantes.

Como se ha indicado anteriormente, la simulación realizada en el modelo de zona simple no incluye la re-infiltración de fuentes externas. Esto nos permite estimar la contribución de las emisiones interiores que provienen únicamente de la estufa. Además, cabe señalar que en campo, la re-infiltración es muy variable, dependiendo del diseño de la cocina, la altura de la chimenea y la proximidad de las casas dentro de la comunidad o poblado.

También se asumió que las distribuciones de los parámetros de entrada al modelo corresponden a una población grande y que hay un mezclado perfecto de aire, es decir, no hay estratificación de los contaminantes con una concentración uniforme en todo el cuarto de cocinado.

Tabla 19. Resumen de las concentraciones en el cuarto de cocinado estimadas con el modelo de zona simple, así como el porcentaje de simulaciones que cumplen con las directrices de la OMS sobre calidad del aire para cuatro modelos de estufas.

Parámetros de salida	ONIL	Ecostufa	Mera-Mera	Patsari	Estufas con chimenea	LPG*
Material Particulado						
Promedio ($\mu\text{g m}^{-3}$)	10	17	12	19	15	4
Mediana ($\mu\text{g m}^{-3}$)	9	15	10	17	13	3
Desviación estándar	6	10	7	11	9	2
Percentil 10 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	5	9	5	9	7	2
Percentil 90 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	17	28	20	31	25	7
Porcentaje de simulaciones en referencia a los lineamientos para PM_{2.5} de la OMS						
24-h Objetivo-1 ($75 \mu\text{g m}^{-3}$)	100%	100%	100%	100%	100%	100%
24-h AQG ($25 \mu\text{g m}^{-3}$)	97%	87%	96%	81%	91%	100%
Objetivo intermedio anual-1 ($35 \mu\text{g m}^{-3}$)	99%	96%	99%	94%	97%	100%
Anual AQG ($10 \mu\text{g m}^{-3}$)	58%	17%	46%	13%	30%	98%
Monóxido de carbono						
Promedio ($\mu\text{g m}^{-3}$)	0.06	0.02	0.10	0.05	0.06	0.15

Mediana ($\mu\text{g m}^{-3}$)	0.05	0.02	0.09	0.05	0.05	0.14
Desviación estándar	0.04	0.01	0.06	0.03	0.04	0.09
Percentil 10 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	0.02	0.01	0.04	0.02	0.02	0.07
Percentil 90 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	0.10	0.04	0.16	0.09	0.11	0.26

Porcentaje de simulaciones en referencia a los lineamientos para monóxido de carbono de la OMS

24-h AQG (7 mg m^{-3})	100%	100%	100%	100%	100%	100%
------------------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Nota: *Los modelos para las estufas de gas LP (LPG) fueron simulados bajo las mismas condiciones de las estufas de leña.

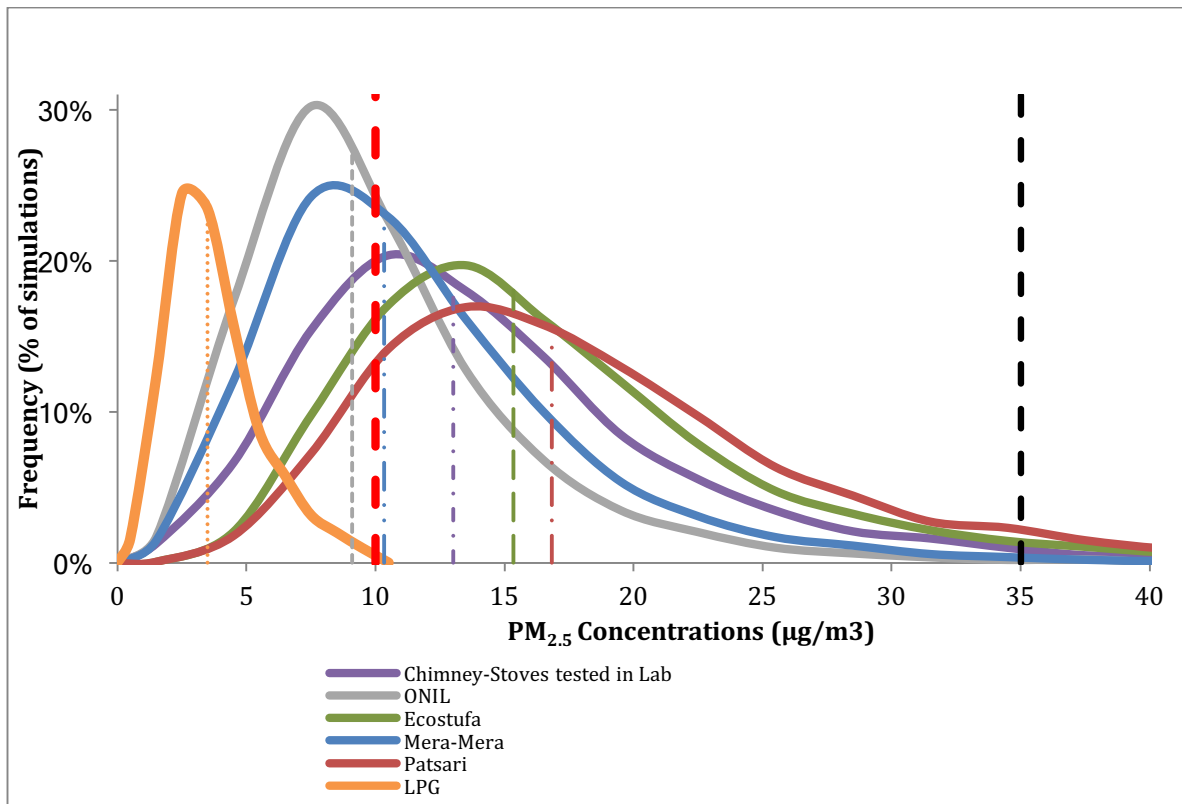


Figura 18. Distribución de las concentraciones de Material Particulado ($\text{PM}_{2.5}$).

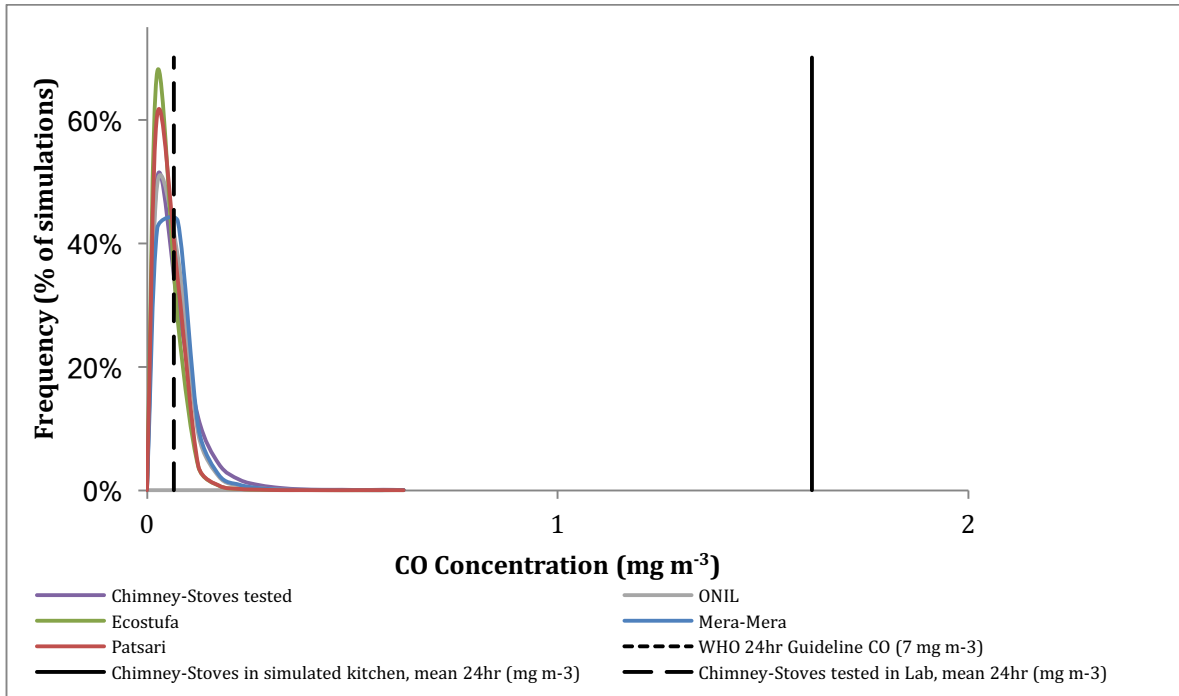


Figura 19. Distribución de las concentraciones de Monóxido de Carbono (CO)

4 CONCLUSIONES

El monitoreo de temperatura y gases (CO y O₂) dentro de la estufa de leña, así como de temperaturas en la superficie de cocción (comal) permite conocer la distribución de calor en la superficie de cocción (comal) y la manera en que se pueden disminuir productos secundarios provenientes de una reacción incompleta de combustión. La estufa Patsari carece de oxígeno de entrada en ciertos periodos de la evaluación, por lo que se recomienda que el diseño en la cámara de combustión garantice la entrada de aire primario de una manera continua y uniforme.

Debe estandarizarse el método para medir la eficiencia térmica en una estufa de leña que tiene plancha, ya que diferentes maneras de hacerlo presentan diversos resultados. El uso del comal-olla es el método que refleja la máxima transferencia de calor que tiene una estufa. Por otro lado, el comal-olla es un método más seguro para el operador durante una prueba de

ebullición de agua, mientras que las ollas Mylar se rompen y no es posible saber en qué momento será, lo que representa riesgos de seguridad para el evaluador.

Las emisiones fugitivas o el porcentaje de las emisiones totales que se fugan al cuarto de cocinado anteriormente habían sido pobremente caracterizadas. Los resultados de esta investigación evidencian que la recomendación de que el 25% (± 10) de las emisiones totales entran al cuarto de cocinado (OMS, 2014) esta sobrestimada, y no refleja el desempeño real de este tipo de estufas. Las emisiones fugitivas representan 5% para $PM_{2.5}$ and 1% para CO de la emisiones totales. Las estufas con chimenea tienen una tasa de emisión intramuros con indicadores (TIER) de 3 y 4 (estufas consideradas como limpias) y producen una concentración promedio en la cocina por debajo de las concentraciones de $PM_{2.5}$ (concentraciones promedio anuales, Objetivo Intermedio 1) y CO (AQG 24-h) de las Guías de Calidad del Aire (AQG) de la OMS. El uso combinado de estufas con chimeneas que utilizan leña y de las estufas que utilizan gas podría evitar la contaminación en el interior de los cuartos de cocinado.

Es importante mencionar que la re-infiltración de los gases de la chimenea al cuarto de cocinado y/o infiltración de contaminantes de chimeneas de casas vecinas no están considerados en esta investigación.

Existe contribución de productos secundarios en la combustión de la biomasa para el caso de la estufa Patsari, esta contribución es producida por la falta de oxígeno y/o tiempo de residencia de los gases. El principal contaminante en la gama de hidrocarburos medidos es el metano mientras que en la gama de aerosoles carbonosos es el carbono orgánico (aunque con producción de carbono elemental. La disminución de contaminantes de vida corta como el metano y el carbono elemental que tienen potencial de calentamiento positivo, ayudará a mitigar las emisiones de cambio climático en un corto plazo, y también a aumentar el factor de renovabilidad de la leña.

5 REFERENCIA

- Anenberg, S. (2012). Clean stoves benefit climate and health. *Nature*, 490(7420), 343. <https://doi.org/10.1038/490343n>
- Armendáriz-Arnez, C., Edwards, R. D., Johnson, M., Rosas, I. A., Espinosa, F., & Masera, O. R. (2010). Indoor particle size distributions in homes with open fires and improved Patsari cook stoves. *Atmospheric Environment*, 44(24), 2881–2886. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.04.049>
- Bailis, R., Drigo, R., Ghilardi, A., & Masera, O. (2015). The carbon footprint of traditional woodfuels. *Nature Climate Change*, 5(3), 266–272. <https://doi.org/10.1038/nclimate2491>
- Berrueta, V., Edwards, R., & Masera, O. (2008). Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico. *Renewable Energy*, 33(5), 859–870. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.016>
- Berrueta, V. M., Serrano-Medrano, M., García-Bustamante, C., Astier, M., & Masera, O. R. (2015). Promoting sustainable local development of rural communities and mitigating climate change: the case of Mexico's Patsari improved cookstove project. *Climatic Change*. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1523-y>
- Blanco, S., Cárdenas, B., Maíz, P., Berrueta, V., & Masera, O. (2012). *Estudio comparativo de estufas mejoradas para sustentar un programa de intervención masiva en México*.
- Bond, T., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., Deangelo, B. J., ... Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(11), 5380–5552. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>
- Calzada, J., & Sanz, A. (2018). Universal access to clean cookstoves: Evaluation of a public program in Peru. *Energy Policy*, 118(March), 559–572. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.03.066>
- CCT. (2004). *Controlled Cooking Test (CCT)*.
- Christian, & L'Orange. (2009). *Testing methodologies for biomass cook stoves and their effects on emissions*.
- Chum, H., Faaij, A., Moreira, J., Minowa, T., Berndes, G., Dhamija, P., ... Pingoud, K.

- (2011). *Bioenergy*. In: *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*.
- COP-21. (2015). Conferencia de las Partes 21er período de sesiones - Convención Marco sobre el Cambio Climático. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 40. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Cowlin, S. (2005). Tracer Decay for Determining Kitchen Ventilation Rates in San Lorenzo, Guatemala, (April), 1–9.
- CYTED. (2018). Convocatoria CYTED 2018. *Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología Para El Desarrollo*, 3–5.
- Debnath, R., Bardhan, R., & Banerjee, R. (2016). Investigating the age of air in rural Indian kitchens for sustainable built-environment design. *Journal of Building Engineering*, 7, 320–333. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.07.011>
- Díaz, R. (2000). *Consumo de leña en el sector residencial de México*. UNAM.
- Díaz, R., Berrueta, V., & Masera, O. (2011). *Estufas de leña*. *Red Mexicana de Bioenergía* (Vol. 3).
- DOF. (2017). Consulta pública del proyecto de norma mexicana. PROY-NMX-Q-001-NORMEX-2017. Estufas que funcionan con leña - Evaluación de funcionalidad, seguridad, eficiencia térmica y nivel de emisiones- Especificaciones y métodos de prueba. ICS 97.040.20. Retrieved from http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=677532&fecha=16/02/2004%0Ahttp://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5472965&fecha=24/02/2017
- Ferrari L. (2013). Energía finita en un planeta finito. *Revista Digital Universitaria*, 14, 9.
- Ferrari, L. (2013). Energías fosiles : diagnostico, perspectivas e implicaciones economicas. *Revista Mexica de Fisica*, 59(2), 36–43.
- Ferrari L., & C., E. G. (2012). Crisis energética mundial: diagnóstico y alternativas. En: J.L. Calva (Coord.), “Crisis energética mundial y futuro de la energía en México”. Serie “Análisis Estratégico para el Desarrollo.” *Consejo Nacional de Universitarios*, 8, 19–39.
- GACC. (2016). *2016 Progress Report Clean Cooking: Key to achieving Global Development and Climate Goals*. Retrieved from <https://cleancookstoves.org/binary-data/RESOURCE/file/000/000/495-1.pdf>

- Garland, C., Michael, J., Jagoe, K., & Ramanathan, T. (2016). *Cookstove Field Study Resources*.
- Gold Standard. (2014). *Public Call for Stakeholder Comments: The Gold Standard Foundation's Proposed Expansion of Scope to Certify Emission Reductions from Black Carbon About*.
- Grieshop, A. P., Marshall, J. D., & Kandlikar, M. (2011). Health and climate benefits of cookstove replacement options. *Energy Policy*, 39(12), 7530–7542. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.024>
- Han, H., & Wu, S. (2018). Rural Residential Energy Transition and Energy Consumption Intensity in China. *Energy Economics*, #page range#. <https://doi.org/10.1016/J.ENERCO.2018.04.033>
- IEA. (2012). *World Energy Outlook 2012. BP Statistical Review*. <https://doi.org/10.1787/20725302>
- IEA (International Energy Agency). (2010). *Renewables information 2010: with 2009 data*.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Retrieved from http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf
- ISN. (2018). Clean Cooking - Develop workshops or research projects, 1–5. Retrieved from <https://www.fic.nih.gov/About/Staff/Policy-Planning-Evaluation/Pages/clean-cooking-implementation-science-network.aspx>
- ISO TC 285/WG 2. (2018). *Clean cookstoves and clean cooking solutions - Harmonized laboratory test protocols - Committee Final Draft Part 1: Standard Test Sequence for emissions and performance, safety, and durability*.
- IWA-ISO. (2012). Guidelines for evaluating cookstove performance, (11), 11. Retrieved from <http://www.pciaonline.org/files/ISO-IWA-Cookstoves.pdf>
- Jetter, J., Zhao, Y., Smith, K. R., Khan, B., Decarlo, P., Hays, M. D., ... States, U. (2012). Pollutant Emissions and Energy Efficiency under Controlled Conditions for Household Biomass Cookstoves and Implications for Metrics Useful in Setting International Test Standards. *Environ. Sci. Technol.*, 46, 10827–10834.
- Jiménez, R. D., Frenk, C. A., & Masera, O. (2003). (2003). El uso de bioenergía en los Hogares: impactos ambientales y en la salud.
- Johnson, M., Edwards, R., Alatorre Frenk, C., & Masera, O. (2008). In-field greenhouse gas

- emissions from cookstoves in rural Mexican households. *Atmospheric Environment*, 42(5), 1206–1222. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.10.034>
- Johnson, M., Lam, N., Brant, S., Gray, C., & Pennise, D. (2011). Modeling indoor air pollution from cookstove emissions in developing countries using a Monte Carlo single-box model. *Atmospheric Environment*, 45(19), 3237–3243. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.03.044>
- L'Orange, C. L., Leith, D., Volckens, J., & Defoort, M. (2015). ScienceDirect A quantitative model of cookstove variability and field performance : Implications for sample size. *Biomass and Bioenergy*, 72, 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.10.031>
- LEMS. (2013). *Instructions for Use of the Laboratory Emissions Monitoring System (LEMS)*.
- Lombardi, F., Riva, F., Bonamini, G., Barbieri, J., & Colombo, E. (2017). Laboratory protocols for testing of Improved Cooking Stoves (ICSs): A review of state-of-the-art and further developments. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.02.005>
- Lombardi, F., Riva, F., & Colombo, E. (2018). Dealing with small sets of laboratory test replicates for Improved Cooking Stoves (ICSs): Insights for a robust statistical analysis of results. *Biomass and Bioenergy*, 115(November 2017), 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.04.004>
- Maccarty, N., Still, D., & Ogle, D. (2010). Energy for Sustainable Development Fuel use and emissions performance of fifty cooking stoves in the laboratory and related benchmarks of performance. *Energy for Sustainable Development*, 14(3), 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.06.002>
- Maccarty, N., Still, D., Ogle, D., & Drouin, T. (2008). Assessing Cook Stove Performance : Field and Lab Studies of Three Rocket Stoves Comparing the Open Fire and Traditional Stoves in Tamil Nadu , India on Measures of Time to Cook , Fuel Use , Total Emissions , and Indoor Air Pollution, 1–18.
- Martin, W. J., Glass, R. I., Balbus, J. M., & Collins, F. S. (2011). A Major Environmental Cause of Death. *Science*, 334(6053), 180–181. <https://doi.org/10.1126/science.1213088>
- Masera, O., Edwards, R., Armendáriz, C., Berrueta, V., Johnson, M., Leonora, R., ... Smith, K. R. (2007). Impact of Patsari improved cookstoves on indoor air quality in Michoacán , Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 11(2), 45–56. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60399-3](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60399-3)

- Masera, O. R., Díaz, R., & Berrueta, V. (2005). From cookstoves to cooking systems: the integrated program on sustainable household energy use in Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 9(1), 25–36. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60480-9](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60480-9)
- Medina, P., Berrueta, V., Martínez, M., Ruiz, V., Edwards, R. D., & Masera, O. (2017). Comparative performance of five Mexican plancha-type cookstoves using water boiling tests. *Development Engineering*, 2(June 2016), 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2016.06.001>
- Medina, P., Berrueta, V., Martínez, M., Ruiz, V., Ruiz-Mercado, I., & Masera, O. R. (2017). Closing the gap between lab and field cookstove tests: Benefits of multi-pot and sequencing cooking tasks through controlled burning cycles. *Energy for Sustainable Development*, 41, 106–111. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.08.009>
- Naeher, L. P., Smith, K. R., Leaderer, B. P., Mage, D., & Grajeda, R. (2000). Indoor and outdoor PM_{2.5} and CO in high- and low-density Guatemalan villages 1, 1–8.
- OMS. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado , el ozono , el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre .*
- OMS. (2010). *WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. World Health Organization Regional Office for Europe, Bonn.*
- OMS. (2014). *WHO Indoor Air Quality Guidelines: household Fuel Combustion - Review 3: Model for linking household energy use with indoor air quality.*
- ProyectoFSE. (2014). ProyectoFSE 2014.
- RLCCL. (2014). *Promoviendo la adopción y uso sostenido en gran escala.*
- RLCCL. (2016). *Red Latinoamericana y del Caribe de Cocinas Limpias: Camino a la consolidación estratégica regional.*
- Ruiz-García, V., Edwards, R., Berrueta, V., Michael, J., & Masera, O. (2018). Fugitive emissions from Plancha-type stoves.
- Ruiz-García, V., & Masera, O. (2018). *Estimating Kitchen PM_{2.5} and CO Concentrations out of Stove Emissions : The case of Mexican Plancha-type Stoves.*
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10393-015-1009-4>

- SENER. (2010). *Estrategia Nacional de Energía*.
- SENER. (2017). Mapa de ruta tecnologica biocombustibles sólidos.
- Serrano-Medrano, M. (2016). *Escenarios espaciales explícitos de usos múltiples de combustibles para cocción en el sector enegético residencial mexicano y su potencial de mitigación de gases de efecto invernadero*. UNAM.
- Serrano-Medrano, M., Arias-Chalico, T., Ghilardi, 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>
- Simon, G. L., Bailis, R., Baumgartner, J., Hyman, J., & Laurent, A. (2014). Current debates and future research needs in the clean cookstove sector. *Energy for Sustainable Development*, 20, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.02.006>
- Smith, K. R., McCracken, J. P., Thompson, L., Edwards, R., Shields, K. N., Canuz, E., & Bruce, N. (2010). Personal child and mother carbon monoxide exposures and kitchen levels: methods and results from a randomized trial of woodfired chimney cookstoves in Guatemala (RESPIRE). *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 20(5), 406–416. <https://doi.org/10.1038/jes.2009.30>
- Straffon Alejandra. (2009). *Estudio comparativo de eficiencia energética para estufas mejoradas de leña y sus implicaciones ambientales*. UNAM.
- Sutar, K. B., Kohli, S., Ravi, M. R., & Ray, A. (2015). Biomass cookstoves : A review of technical aspects, 41, 1128–1166. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.003>
- TESTO. (2012). *testo 340 – El nuevo analizador de PdC industriales equipado con 4 sensores*.
- UNEP and Climate and Clean Air Coalition. (n.d.). *Short-lived Climate Pollutants Short-lived Climate Pollutants in Latin America*.
- UNF. (2018). Field study on the relationship between cookstove emissions and personal exposure during typical usage in homes, 1–11.
- Villi, G., Pasut, W., & Carli, M. De. (2009). Computational Aspects of Modeling Different Strategies for Kitchen Ventilation : a Comparison Between the Multi-Zone Approach and Cfd Modelling With Reference To Predicted Indoor Pollutant Concentrations. *Eleventh International IBPSA Conference*, 1574–1581.
- Wang, S., Wei, W., Du, L., Li, G., & Hao, J. (2009). Characteristics of gaseous pollutants

from biofuel-stoves in rural China. *Atmospheric Environment*, 43(27), 4148–4154.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.05.040>

WBT. (2014). *Prueba de ebullicion de agua* (Vol. WBT 4.2.3).

WHO. (2005). *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. World Health Organization Press, Geneva.

6 ANEXOS

ANEXO A. Procedimiento técnico para medición de emisiones en dispositivos de generación de calor de baja potencia para tareas de cocción que funcionan con biomasa

1. OBJETIVO

El objetivo de este Anexo es el de evaluar las emisiones tanto de gases como aerosoles producidas por la combustión de biomasa en dispositivos de generación de calor de baja potencia para tareas de cocción y que pueden aplicarse a otros dispositivos de uso final. Estas emisiones incluyen emisiones fugitivas, en la chimenea y totales.

2. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

Aerosol: partículas sólidas y líquidas suspendidas en un gas o vapor de agua.

CO: el monóxido de carbono es un gas incoloro e inodoro, producto secundario de la combustión incompleta de la biomasa cuya molécula consiste en un átomo de carbono unido a un átomo de oxígeno.

CO₂: el dióxido de carbono es gas incoloro e inodoro, principal producto de la combustión completa de la biomasa cuya molécula consiste en un átomo de carbono unido a dos átomos de oxígeno.

Chimenea: ducto utilizado para ventilar emisiones hacia el exterior, estas emisiones son producidas en la cámara de combustión por dispositivos de generación de calor.

Doble campana de extracción: arreglo de dos campanas de extracción, que permiten la captura y separación de las emisiones intramuros y a la atmósfera.

CE: eficiencia de combustión, se refiere a la relación de moles de CO₂ respecto a todos los moles de contaminantes que contienen carbono (CO, CO₂, metano, material particulado, hidrocarburos, entre otros) y que están presentes en los productos y subproductos de la combustión.

MCE: eficiencia modificada de combustión, se refiere a la relación de moles de CO₂ respecto a los moles de CO y CO₂ presentes en la combustión.

Emisiones a la atmósfera o totales: 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.

Emisiones en la chimenea: emisiones producidas por la combustión y que se conducen por medio de una chimenea hacia el exterior.

Emisiones fugitivas o intramuros: emisiones producidas por la combustión, estas incluyen solo a las emisiones que se fugan hacia el interior del cuarto de cocinado. Estas fugas pueden provenir de la cámara de combustión, de imperfecciones del dispositivo o, del mal diseño y funcionamiento de la chimenea.

PM_{2.5}: es un producto secundario de la combustión incompleta que se compone en su mayoría de carbono y fragmentos de materia orgánica que se emiten. Su acrónimo es PM, por sus siglas en inglés (Particulate Matter). El subíndice 2.5 se refiere a las partículas con un diámetro aerodinámico igual o menor a 2.5 micrómetros (µm). Otros diámetros de partícula usualmente medidos son 10, 1 y 0.1 µm.

3. FUNDAMENTO/GENERALIDADES

La medición de las emisiones producidas por el uso de dispositivos de cocción que funcionan con biomasa incluye contaminantes gaseosos y aerosoles; tiene como propósito proveer de métricas que pueden ser usadas para determinar el desempeño de estos dispositivos bajo condiciones controladas. Este procedimiento para medición de emisiones contempla el

acoplamiento con diversos protocolos de evaluación como lo son: pruebas de ebullición de agua, de ciclos de cocinado controlado y de cocinado controlado. Este anexo incluye las instrucciones para medir las concentraciones de CO₂, CO y PM_{2.5}. bajo condiciones controladas.

4. MATERIALES, EQUIPOS Y REACTIVOS

4.1 *Materiales y equipos*

Los equipos para cuantificar emisiones deben ser calibrados regularmente para asegurar la estandarización de los resultados. Los sistemas de muestreo para PM_{2.5} deben controlarse para evitar fugas. Las bombas de vacío deben ser monitoreadas antes y después de realizada una prueba con un medidor de flujo. Los sensores de presión barométrica pueden calibrarse utilizando un calibrador automático de presión. La evaluación de las emisiones se debe realizar por diferentes métodos: método óptico y gravimétrico para el caso del PM_{2.5}; método electroquímico e infrarrojo no dispersivo para el caso de contaminantes gaseosos. Para el caso de los equipos de medición de gases, la calibración puede hacerse usando estándares con una concentración conocida de sus componentes.

Antes de comenzar una prueba se deben medir las concentraciones de fondo o ambiente de los contaminantes de interés o bien, contar con un equipo independiente que mida las concentraciones del ambiente durante la prueba. Lo anterior es importante para conocer exclusivamente la contribución de los dispositivos evaluados. La estabilización de los sensores previos a iniciar la prueba debe llevarse a cabo en un lapso de tiempo de 8 a 10 minutos sin el funcionamiento de sopladores o ventiladores de aire forzado que producen la dilución de los gases de combustión, y seguido de un periodo de 2 a 5 minutos con los sopladores encendidos. El encendido de las bombas que permiten capturar e impactar PM_{2.5} en un filtro (fibra de vidrio, cuarzo o teflón) se conoce como gravimetría, este encendido se realizará al comenzar la prueba y se apagará exactamente al término de la misma. A continuación, se describe el material y equipo necesarios para medir emisiones de gases y aerosoles:

Medición de Aerosoles:

- Doble campana
- Ductos de la doble campana hacia exterior
- Ventiladores o sopladores
- Medidor de la velocidad del flujo
- Sistema de adquisición de datos en tiempo real para temperatura, caída de presión o velocidad, y $PM_{2.5}$.
- Medidor óptico de $PM_{2.5}$ (opcional)
- Ciclones para la separación del $PM_{2.5}$
- Filtros para la retención del $PM_{2.5}$ (fibra de vidrio, cuarzo o teflón)
- Bombas de vacío para la extracción de la muestra.
- Calibrador de flujo para las bombas de vacío
- Cronómetro.

Medición de Gases:

- Doble campana.
- Ductos de la doble campana hacia exterior
- Ventiladores o sopladores
- Medidor de temperatura del flujo.
- Medidor de presión en la tubería.
- Medidor de la velocidad del flujo.

- Sistema de adquisición de datos en tiempo real para emisiones, temperatura y, caída de presión o velocidad.
- Sensores de medición de gases en tiempo real.
- Sistema de adquisición de datos en tiempo real.
- Bombas de vacío para la extracción de la muestra.
- Calibrador de flujo para las bombas de vacío.
- Cronómetro.

Nota: El principio de medición de los equipos para la medición de gases y aerosoles es el mismo tanto para la determinación de las emisiones de la chimenea y emisiones intramuros.

6.1.1 4.2 Sistema de medición de emisiones

Se utiliza la doble campana de extracción en conjunto con dos trenes de muestreo para realizar la medición de las emisiones. En la Figura 1 se muestran los puntos y trenes de muestreo, la disposición de las campanas y características de los ductos. Se pueden apreciar las entradas de aire para lograr la dilución adecuada de las emisiones procedentes de la estufa, la posición de los baffles para homogenizar el flujo, los ventiladores, la representación de los equipos involucrados y los puntos de muestreo para CO, CO₂ y PM_{2.5}. El objetivo de la doble campana es separar y capturar las emisiones de la chimenea mediante la campana superior y las intramuros mediante la campana inferior. Este sistema puede ser modificado en los casos de realizar pruebas en estufas sin chimenea. Esta modificación consiste en utilizar solamente la campana inferior para la medición de emisiones totales (emisiones totales = emisiones fugitivas + emisiones en la chimenea).

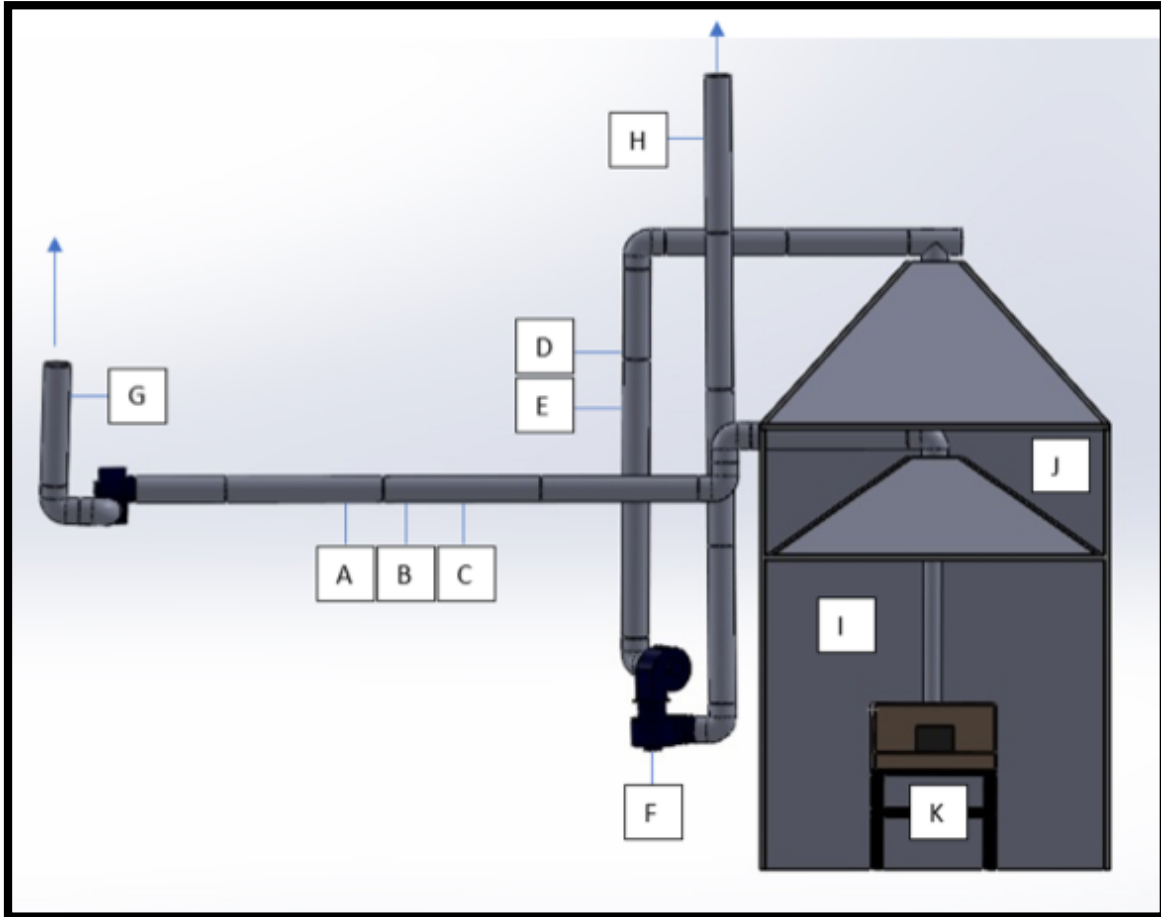


Figura A1. Sistema de doble campana para separar y capturar emisiones intramuros y en la chimenea. Los puntos de muestreo para emisiones fugitivas o intramuros se encuentran en las señalizaciones A, B y C, donde: A es el puerto de muestreo gravimétrico de $PM_{2.5}$; B es el puerto de muestreo para gases de CO y CO_2 y; C es el punto de muestreo para velocidad y temperatura del flujo. Mientras que, los puntos D y E son: D es el punto de muestreo para emisiones de CO y CO_2 , velocidad y temperatura del flujo de emisiones de la chimenea y; E es el puerto de muestreo de para el muestreo gravimétrico de $PM_{2.5}$. Las salidas de las tuberías para ventilar las emisiones fugitivas y de la chimenea se representan con las letras G y H, respectivamente. Las campanas para capturar emisiones fugitivas y de la chimenea son I y J, respectivamente. La extracción y dilución de las emisiones se realiza a través de ventiladores señalados con la letra F. Finalmente, el dispositivo evaluado de biomasa es representada por la letra K. **Créditos de la Figura: Dante Villanueva, Minerva López y Víctor Ruiz.**

La Figura A1 muestra los trenes de muestreo instalados para CO, CO₂ y PM_{2.5}; debido a la naturaleza de estos contaminantes, los puertos de muestreo son diferentes. El muestreo de contaminantes gaseosos no necesita ser isocinético, sin embargo, se debe tener cuidado de asegurar que el equipo de análisis de gases esté protegido de la alta concentración de aerosol y la humedad relativa que puede estar presente en el conducto. La concentración de PM_{2.5}, se debe medir por muestreo de aerosol en filtros gravimétricos de fibra de vidrio, cuarzo o teflón (Figura A2). Los métodos basados en métodos ópticos no son una referencia aceptable para cuantificar las concentraciones de aerosol medidos en laboratorio, pero muestran el monitoreo en tiempo real. Se recomienda usar ambos métodos.

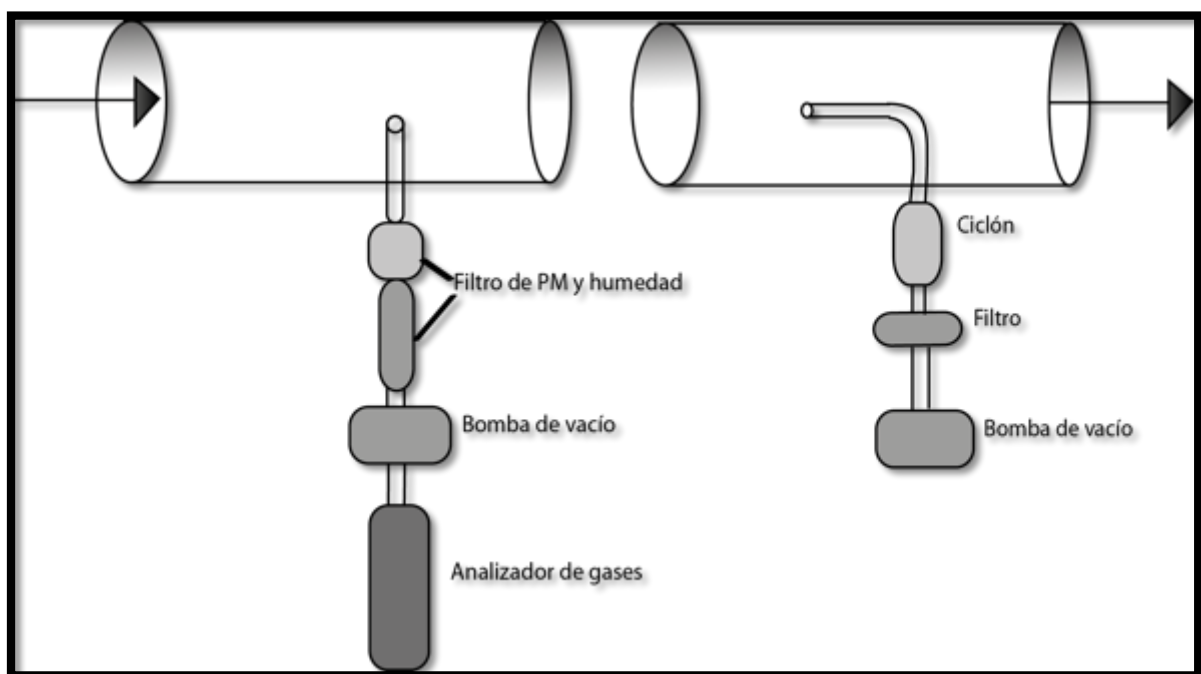


Figura A2. Tren de muestreo de la medición de emisiones gaseosas (izquierda) y de PM_{2.5} por gravimetría (derecha). **Créditos de la Figura: Juan Vázquez y Víctor Ruiz.**

Preparación de los filtros: los filtros utilizados en la cuantificación de PM_{2.5} por el método gravimétrico tanto de las emisiones intramuros como de la chimenea deben estar a peso constante y en condiciones controladas (temperatura y humedad) antes y después de ser usados.

5. DESARROLLO DEL MÉTODO

A continuación, se describe el método para la evaluación de las emisiones de la tubería de las emisiones a la atmósfera y de las emisiones intramuros. El primer paso es calcular el flujo que pasa a través de la tubería.

5.1 Cálculo de flujo en la tubería (m^3/s).

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

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

Una vez que se conoce el flujo en la tubería, debe calcularse la densidad del flujo mediante la ecuación de los gases ideales a las condiciones de presión y temperatura. El peso molecular de la mezcla gaseosa puede suponerse como aire. La densidad de la mezcla de gases es útil para conocer el flujo másico y posteriormente el flujo molar.

5.2 Densidad del Flujo (g/m^3).

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

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

5.3 Flujo másico (g/s).

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

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

5.4 Flujo molar (mol/s).

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

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

La medición de las concentraciones de cada contaminante, permite conocer el flujo molar de cada uno de ellos. A continuación, se muestra el ejemplo de cálculo para el caso del CO.

5.5 Flujo molar de CO (mol/s).

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

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

La masa de cada contaminante se obtiene con ayuda de su peso molecular y el tiempo que dura la medición.

5.6 CO integrado o acumulado (g).

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

$$(mol/s) * (g/mol) * s = g$$

Para el cálculo de la masa total emitida del contaminante en cuestión, se realiza una sumatoria de los gramos de contaminante de cada intervalo de tiempo en el que fue medida la concentración. En algunos casos la masa medida puede ser la masa total.

Una vez que se conoce la masa total del contaminante gaseoso emitido, es posible conocer la tasa de emisión por fase o protocolo de evaluación; o también los factores de emisión para tareas específicas del dispositivo de cocción en estudio.

5.7 Tasa de emisión de CO (g/min).

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

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

Para el caso del PM_{2.5} se utiliza el método gravimétrico, el cual consta del uso de filtros (fibra de vidrio, cuarzo o teflón) para la captura del material particulado, un ciclón para la selección del diámetro de partícula de interés y una bomba para la succión del flujo de la muestra. Al igual que la masa total de gases, la masa total de PM_{2.5} depende del flujo total de las emisiones. Los cálculos se muestran a continuación:

5.8 Concentración promedio de PM_{2.5} por gravimetría (µg/m³).

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

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

Una vez que se conoce la concentración promedio (determinada mediante el filtro), se calcula la masa total emitida de PM_{2.5} durante la prueba. Esto se realiza al combinar el método de gravimetría con el método integrado (el cual se utiliza para contaminantes gaseoso), al multiplicar la concentración obtenida mediante el filtro por el flujo en la tubería y el tiempo total de la prueba.

5.9 Masa total de PM_{2.5}.

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

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

Al igual que en el caso de los contaminantes gaseosos, conociendo la masa total emitida de $PM_{2.5}$; es posible determinar tasas de emisión y/o factores de emisión, para fases o pruebas de evaluación y tareas específicas respectivamente.

5.10 Tasa de emisión de $PM_{2.5}$.

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

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

Para evaluar la calidad de los resultados de las emisiones medidas se utiliza el balance de carbono. Para lo cual se calcula el carbono de entrada, el cual se refiere al contenido de carbono en la leña, restando el contenido de humedad y, el carbono presente en el carbono residual (después de que se realizó la combustión). Para calcular el carbono de salida, se considera el carbono presente en los productos de la combustión: CO_2 , CO y $PM_{2.5}$. Finalmente se determina la relación entre el carbono de salida y el carbono de entrada, y de esta manera se calcula el porcentaje del balance de carbono; para aceptar que la medición de las emisiones se realizó correctamente se toma como referencia un valor del balance de carbono de $100 \pm 20\%$. A continuación, se presentan las ecuaciones utilizadas:

5.11 Carbono de entrada (g).

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

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

5.12 Carbono de salida

Carbono en PM_{2.5} (g).

$$\text{Masa total} * \text{Fracción de carbono} = \text{Carbono en PM}_{2.5}$$

$$g * 0.91 = g$$

Carbono en CO (g).

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

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

Carbono en CO₂ (g).

$$\text{Masa total} * \text{Fracción de carbono} = \text{Carbono en el CO}_2$$

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

Carbono de salida (g).

$$\text{Carbono en PM}_{2.5} + \text{Carbono en CO} + \text{Carbono en CO}_2 = \text{Carbono de salida}$$

$$g + g + g = g$$

5.13 Balance de Carbono (%).

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

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

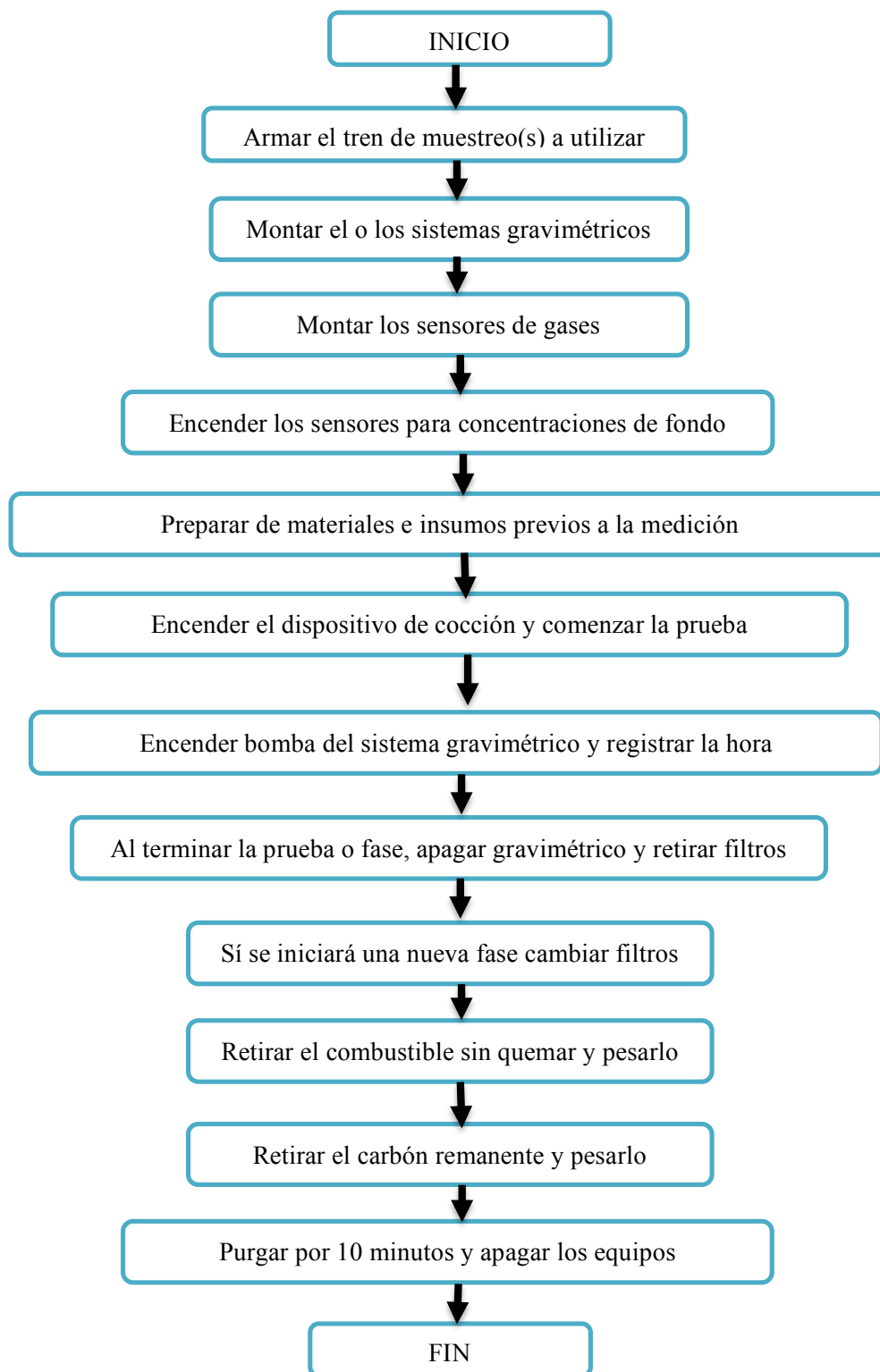
Un parámetro importante para determinar la calidad de la combustión es la Eficiencia Modificada de Combustión (MCE por sus siglas en ingles); que es una métrica que determina la calidad de la combustión por el uso de estufas eficientes de biomasa; el cual se basa solo

en las emisiones de CO y CO₂ para poder conocer la eficiencia de un proceso de combustión. El fundamento teórico de la MCE es que una combustión ideal o completa el 100% del producto es CO₂. La MCE se determina mediante la relación molar (moles) de CO₂ dividida entre la sumatoria de la cantidad de CO y CO₂, siguiendo la siguiente ecuación:

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

La eficiencia de combustión (CE por sus siglas en inglés) incluye todos los contaminantes que contenga carbono en relación al CO₂. El medir una gama tan diversa de contaminantes es complicado y no existen variaciones considerables al compararla con la MCE.

6. DIAGRAMA DE FLUJO



DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES

Preparación de la prueba

- Colocar los puertos de muestreo de gases y aerosoles como se muestra en la **¡Error!**
No se encuentra el origen de la referencia..
- Armar los trenes de muestreo para emisiones y gravimetría como se muestra en la Figura A2
- Preparar los filtros que serán utilizados en el sistema gravimétrico. El número de filtros dependerá del procedimiento que se utilizará para evaluar, algunos procedimientos requieren un filtro y otros más de un filtro.
- Montar el filtro antes de comenzar la prueba.
- Encender los sensores para el registro de la concentración de gases, al menos 10 minutos antes de comenzar la prueba, con el objetivo de estabilizar los sensores y tener concentraciones de fondo o background.
- Medir el flujo inicial de las bombas de succión de muestra, tato de los sensores y sistemas gravimétricos utilizados.
- Preparar el combustible y recipientes que serán utilizado en la prueba.

Prueba para evaluación

- Iniciar la combustión, utilizando el iniciador de llama.
- Encender el sistema gravimétrico para la captura de PM_{2.5} y al mismo tiempo iniciar el cronómetro; y registrar los datos en la hoja de registro.
- Revisar periódicamente las concentraciones de los sensores de gases, para corroborar que la medición de emisiones se lleve a cabo correctamente.

- Revisar periódicamente el sistema gravimétrico, para asegurarse de que se esté capturando la muestra.
- Al finalizar la prueba o la fase, apagar el sistema gravimétrico y registrar la hora.

Fin de la evaluación

- Retirar el o los filtros con PM_{2.5} colectada.
- Retirar el carbón residual y pesarlo.
- Retirar el combustible que no fue quemado y pesarlo.
- Dejar que los sensores sigan registrando al menos 10 minutos para purgarlos y evitar daños futuros.
- Terminar de registrar todos los datos en el formato impreso correspondiente al procedimiento que se esté realizando.

ANEXO B. Fugitive emissions from Plancha-type stoves

Fugitive emissions from Plancha-type stoves

Víctor M. Ruiz-García^{a, b}, Rufus D. Edwards^{c*}, Masoud Ghasemian^d, Víctor M. Berrueta^e, Marko Princevac^d, Juan C Vázquez^b, Michael Johnson^f, Omar R. Masera^b

^a School of Engineering, National Autonomous University of México (UNAM), CDMX, México.

^b Bioenergy Laboratory and Biomass Stove Innovation and Assessment Laboratory (LINEB), Ecosystems Research Institute and Sustainability (IIES), National Autonomous University of México (UNAM), Morelia, México.

^c Department of Epidemiology, School of Medicine, University of California Irvine, USA

^d Department of Mechanical Engineering, University of California Riverside, CA

^e Interdisciplinary Group on Appropriate Rural Technology (GIRA), México

^f Berkeley Air Monitoring Group, Berkeley, California, USA

***Corresponding author:**

Rufus Edwards

Department of Epidemiology,

School of Medicine,

University of California Irvine, USA

Abstract

Plancha-type stoves have been widely disseminated in Mexico and Central America, but the contribution of fugitive emissions from these stoves to indoor air concentrations has been poorly quantified. In this study, fugitive emissions were measured for four plancha-type cookstoves most disseminated in Mexico (Patsari, ONIL, Ecostufa and Mera-Mera). Fugitive emissions from plancha-type chimney-stoves (n=15 for each stove) were on average $5\pm 3\%$ for $PM_{2.5}$ and $1\pm 1\%$ for CO, much lower than defaults in WHO Guidelines ($25 \pm 10\%$). Using a Monte Carlo single zone model with locally measured parameters average kitchen concentrations resulting from fugitive emissions were $15 \pm 9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for $PM_{2.5}$ and $0.06 \pm 0.04 \text{ mg}/\text{m}^3$ for CO. Based on these models plancha-type stoves meet benchmarks for WHO Air Quality Guidelines (AQG) Interim Target I for $PM_{2.5}$ and the 24-hr AQG for CO, respectively, with on average 97% of homes meeting the guideline for $PM_{2.5}$. Similarly, all four plancha-type stoves were ISO tier 4 for indoor emissions of CO and Tier 3 for indoor emissions of $PM_{2.5}$, respectively. Three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) analysis was used to estimate neighborhood pollution impacts of upstream chimney emissions. When included as background concentrations combined with indoor contributions from fugitive emissions, plancha-type stoves would still meet the WHO AQG Annual Interim Target I for $PM_{2.5}$ and the 24-hr AQG for CO.

Key words

$PM_{2.5}$ exposure, Chimney-stove, indoor air pollution, cookstove, ISO standards, Monte Carlo Simulation.

1. Introduction

Field studies have shown that well-functioning plancha-type chimney stoves that vent emissions outside the home result in significant exposure benefit compared to open fire stoves as only a fraction of the emissions enter the kitchen via fugitive emissions and re-infiltration^{1, 2}, especially if the plancha stove is used exclusively and other combustion

sources are removed from the kitchen³. Plancha-type cookstoves have been widely disseminated in Mexico, Guatemala, El Salvador, Honduras and Nicaragua, where they have become widely accepted in local communities, and somewhat less in Panama and Costa Rica⁴. In Mexico a total of more than 600,000 plancha-type stoves were disseminated between 2007 and 2012, mostly through the *Programa Nacional de Estufas de Leña*.⁵ While plancha-type cookstoves are very popular and widely disseminated in Latin America, they do not easily fit into performance frameworks currently being developed by the cookstove community.

The International Workshop Agreement (IWA) 11:2012 as part of the ISO framework established tiers of performance for cookstove efficiency, emissions and safety. The IWA emission benchmarks were established with tiers for indoor emissions, and tiers for total emissions based on reductions in emissions rates spanning performance of traditional open fires (Tier 0) to aspirational targets (Tier 4). Although the fraction of emissions that does not go up the chimney (fugitive emissions) may be used to estimate the tiers for indoor emissions, the protocols for assessment of fugitive emissions have not been established. Further the indoor emission tiers do not account for the re-infiltration of emissions from the chimney back into the indoor environment.

The World Health Organization (WHO) Indoor Air Quality Guidelines recommend emission rates for both vented and unvented stoves⁶, where the emission rate for vented stoves used a normal distribution for the fraction of emissions entering the kitchen (fugitive and re-infiltration), ranging from 1-50% with a mean of 25% and standard deviation of 10% of the emissions from an unvented stove. The estimate was, however, based on the ratio of concentrations of homes with chimney stoves to those without chimney stoves rather than direct studies of fugitive emissions. The contributions from re-infiltration were also not included in the WHO guidance. Cognizant of the gaps in information for specific stove types, the IWA workshop attendees recommended that new protocols be developed or current protocols be updated to more adequately address a larger number of stove and fuel types, including plancha-type stoves.

Indoor pollutant concentrations in a kitchen with a plancha stove is a function of fugitive emissions from the stove, re-infiltration of emissions from the chimney of the same stove back into the home, and through infiltration of ambient pollutants from other external sources and upstream village stoves. Determination of whether plancha-type stoves should be promoted in an area to actually achieve substantive health benefits therefore depends on the amount of fugitive emissions from the stoves, the density of homes that contribute to downwind neighborhood pollution levels, and relative costs and accessibility of cleaner fuels, in addition to considerations relating to adoption, user preferences and cooking tasks. For plancha type stoves to be better incorporated into ISO:IWA 11:2012 tiers of performance for emissions and for better estimation of relative health benefits that may accrue from promotion of plancha type stoves, fugitive emissions and the impact of the chimney emissions on other village houses downstream need to be evaluated.

In this paper fugitive emissions for four Mexican plancha-type stoves are presented that show Plancha stoves meet ISO benchmarks for indoor emissions of $PM_{2.5}$ tier 3 and CO tier 4 with mean kitchen concentrations below the WHO IT1 when combined with local parameters on building ventilation rates, room volumes and cooking times. Further the impact of the chimney emissions on surrounding houses downstream is demonstrated through the application of a three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) analysis to establish criteria for housing densities where Plancha-type stoves could be promoted without major neighborhood pollution effects in surrounding houses.

2. Material and Methods

One of the key parameters that need to be measured for adequately estimating the impact of chimney stoves on indoor air pollution is the fraction of pollutants that do not exit through the chimney but leak through the combustion chamber entry, or from other parts of the stove into the kitchen, known as fugitive emissions " f ". For example, as stated above, the WHO roughly assumed that for chimney stoves, f ranges from 1-50% with a mean of 25% and standard deviation of 10%⁶. Smith et al (2010) considered that for a well-functioning chimney the value of f for CO is 10%⁷.

2.1 Measurements of fugitive emissions

Fugitive emissions were measured as a function of the overall emission by using two nested hoods to capture separately the emissions through the chimney and fugitive emissions to the room at the same time (Figure 1). Flue emissions and fugitive emissions were measured for four Plancha-Stoves models with chimney (Patsari, ONIL, Mera-Mera and Ecostufa – see Figure 3), which are the models most disseminated in Mexico⁵, using the Water Boiling Test (WBT) protocol version 4.2.3⁸. Fuels used were White Oak (*Quercus spp*) in all tests with average moisture content on a wet basis of $7.0 \pm 0.6\%$ with a range of 6.1–8.2% measured using a Protimeter Timbermaster Wood Moisture Meter (GE, Billerica, MA).

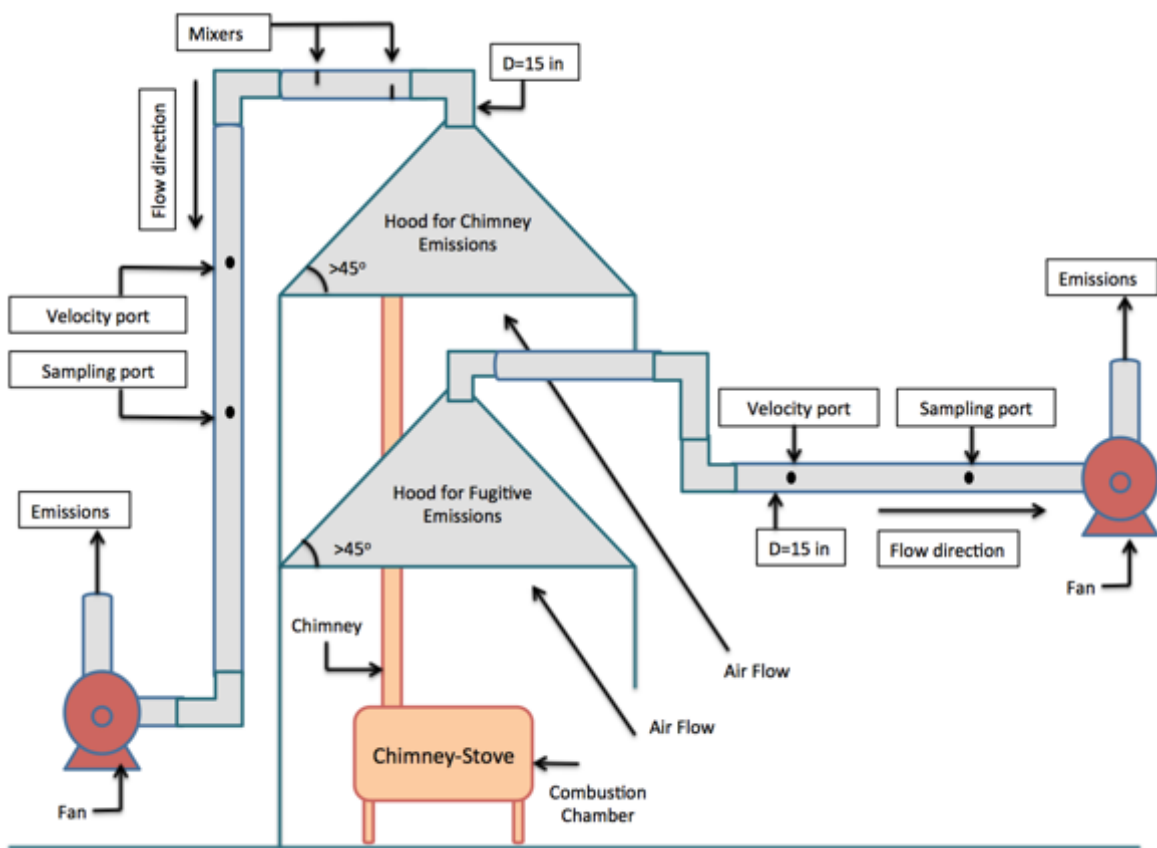


Figure 1. Diagram of double hood for measuring fugitive (indoor) emissions and chimney emissions.

Measurement of CO₂ and CO emissions was performed using a Laboratory Emissions Measurement System (LEMS) (Aprovecho Research Center, Oregon USA), and a Q-Trak (Model 7575, TSI Inc., Shoreview, MN) for fugitive emissions. Real-time concentrations are measured in both equipment using a non-dispersive infrared (NDIR) sensor for CO₂, an electrochemical cell to measure CO. CO₂ and CO sensors were calibrated using zero air and a mixture of 500 ppm CO and 5000 ppm CO₂⁹. Factory calibrated Q-trak have been shown to perform well in quantifying lower concentrations of CO₂ and CO in comparison with stainless steel canisters collected during the same emissions tests and analyzed by GC FID equipped with pre-concentrator and methanizer¹⁰. PM_{2.5} mass from both flue emissions and fugitive emissions was collected isokinetically with a PM_{2.5} cyclone on fiberglass filters for gravimetric determination¹¹. The sample flow for fugitive emissions was 4 L/min with a 47 mm filter and 16.7 L/min with a 4 inches filter for chimney emissions, and the resolution scale were 1 µg and 1 µg respectively.

2.2 Impact of fugitive emissions on indoor air quality

A Monte Carlo single zone model was used to estimate the impact of fugitive emissions from plancha-type stoves on indoor air quality⁶. The model for fugitive emissions is described mathematically as:

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

Eq. 1

$$f = \frac{g_{In}}{g_{In} + g_{Ch}}$$

Eq. 2

$$G = g_{In} + g_{Ch}$$

Eq. 3

Where,

C_t = Concentration of pollutant within the kitchen at time t (mg/m^3);

C_{t-1} = Concentration of pollutant within the kitchen preceding time t (mg/m^3);

G = Emission rate as a total emission (mg/min^1 or g/min^1);

g_{In} = Indoor emission rate (mg/min^1 or g/min^1);

g_{Ch} = Chimney emission rate (mg/min^1 or g/min^1);

f = Fraction of indoor (fugitive) emissions (as a fraction of total emissions);

α = Nominal air exchange rate (min^{-1});

V = Kitchen volume (m^3);

t = Time (min).

2.3 Impacts of emissions on neighborhood pollution

The Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) technique is utilized to obtain the flow and turbulence fields. Mass and momentum conservation equations for incompressible flow are defined as:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad \text{Eq. 4}$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + (\mu + \mu_t) \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{Eq. 5}$$

where μ_t is the eddy viscosity. The standard $k - \varepsilon$ turbulence model¹² has been employed to compute the eddy viscosity. The $k - \varepsilon$ turbulence model is a semi-empirical two equation turbulence model which solves two transport equations for turbulence kinetic energy, k , and the turbulence dissipation rate, ε .

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad \text{Eq. 6}$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \text{Eq. 7}$$

In these equations, G_k represents the turbulence kinetic energy generation due to the mean velocity gradients. σ_k and σ_ε are the turbulent Prandtl numbers for k and ε , respectively. $C_{1\varepsilon}$ and $C_{2\varepsilon}$ are constants. Turbulence model constants and parameters are listed in Table 1:

Table. 1: Values of turbulence model constants and simulation parameters

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ε	κ	Sc_t
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3	0.41	0.5

The eddy viscosity, μ_t , is computed as follow:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{Eq. 8}$$

where C_μ is a constant.

An additional advection-diffusion equation is solved for a scalar to represent the air pollution:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \varphi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(D_\varphi + \frac{\mu_t}{\rho Sc_t} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \varphi \right) \quad \text{Eq. 9}$$

where φ is the pollutant concentration, D_φ is the molecular diffusion coefficient and Sc_t is the turbulent Schmidt number.

Richards and Hoxley (1993)¹³ vertical profiles are utilized to specify the mean velocity, turbulent kinetic energy and dissipation rate variations for the inlet boundary condition:

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z + z_0}{z_0} \quad \text{Eq. 10}$$

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad \text{Eq. 11}$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa(z + z_0)} \quad \text{Eq. 12}$$

where $U(z)$ is the wind speed at height of z above the ground, u_* is the friction velocity extracted from the logarithmic profile with the wind speed value of $u = 2$ [m/s] at the reference height of $H = 10$ [m], κ is the Von Karman's constant (0.41), z_0 is the ground

roughness length and has value of 0.1 [m] and C_μ is the coefficient used in $k - \varepsilon$ turbulence model.

A three-dimensional incompressible steady computational fluid dynamic solver is employed to solve the Navier–Stokes equations using RANS technique. Due to the incompressibility of the flow, the pressure-based solver is chosen, which is traditionally implemented to solve low-speed incompressible flows. The SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) algorithm is chosen for coupling the velocity–pressure equations. Spatial discretization has been preceded using a least squares cell based algorithm for gradients, the second order upwind scheme for momentum, turbulent kinetic energy and turbulent dissipation rate and concentration. The residual target is that the normalized RMS (root mean square) errors for each conservation balance over the entire mesh reach to less than 10^{-5} .

2.4 Housing characteristics and ventilation parameters

Indoor air concentrations estimated using the single-zone model and impacts of emissions on neighborhood pollution were based on locally measured housing characteristics and ventilation parameters (Table 1.). Briefly, kitchens in Michoacán typically incorporate the kitchen and dining room with a mean of $41 \pm 20 \text{ m}^3$ (n=627 measurements). **Time:** Women usually start cooking early morning. For Mexican customs in rural areas there are no cooking events (breakfast, lunch and dinner), instead there is a period of operation in which the cooks cook foods that include tortillas (tortillas are garnish of any dish in any time of day), breakfast and dinner. The mean operating period per day of the stoves is extensive $259 \pm 123 \text{ min}$ (n=30 measurements) and similar to reported by Armendáriz-Arnez et al. (2010)¹⁴. **Nominal air exchange rate:** kitchen designs in rural Michoacán are diverse: without walls, three walls, four walls, brick walls, and wood plank walls with and without gaps, which affects the air exchange between the kitchen and the exterior. Armendáriz-Arnez et al. (2010) reported 43% with wooden planks and gaps <1 cm, 33% with gaps <1 cm, and 19% without gaps. Typically, however, in these region kitchens have four walls made of wooden planks with gaps of approximately 1 cm^{14, 15}, a door and one window (Figure 3). Air exchange rates were estimated after Traynor et al (1982) using CO decay rates in a test kitchen (Figure 2) with similar volume and construction as a typical kitchens (n=31 measurements)¹⁶. CO decay

rates were measured with Q-Trak (Model 7575, TSI Inc., Shoreview, MN) every 2 s, located at a height of 1.5 m in a room with a mixing fan to ensure well mixed concentration.

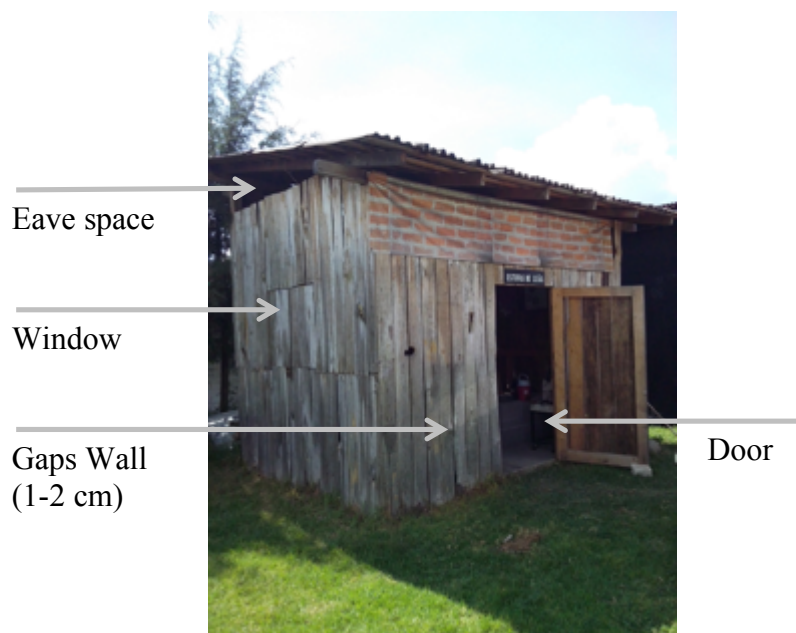


Figure 2. **Simulated Kitchen with similar volume and construction as typical rural kitchens in Michoacán**

Impacts of emissions on neighborhood pollution: Smoke temperatures were assumed to be 318°C based on measured flue gas temperatures at the top of the flue of plancha stoves during performance testing, and exit velocities were 0.5 m/s (Table 2). Similar to the single zone model used to derive emission rates for stoves to meet indoor air quality guidelines and interim targets⁶, background ambient concentrations were not incorporated into the model as the objective was to determine emission rates that would result in an incremental increase in exposures. These concentrations can be readily incorporated based on the local context, but since background ambient concentrations vary widely the results are of limited application. Wind speeds were based on local wind speeds in the Purepecha region. Based on a logarithmic profile wind speed near the ground would be expected to be lower than wind speed in meteorological data usually measured at a height of 10 m. Low wind speeds are conservative as higher wind speeds would increase particulate dispersion and resulting in lower estimates of exposure. The criteria for dispersed settlements based on minimum

distances between homes were also conservatively estimated to be protective of health by minimizing the dispersion of the plumes by wind, and estimating the distance directly downwind based on the center of the plume.

Table 2. Input parameters

Parameters	Unit	Mean	SD	Min	Max
Kitchen dimensions (n=627)					
Height	m	3.0	0.8	1.7	6.0
Width	m	3.7	0.9	1.7	8.5
Length	m	3.6	0.9	1.1	8.4
Wind speed	m/s	1.6	0.4	0.1	3.0
Chimney height	m	3.6	n.a.	n.a.	n.a.
Gas Temperature	°C	318	22	265	342
Ground roughness	m	0.1	n.a.	n.a.	n.a.
Exit velocity	m/s	0.5	n.a.	n.a.	n.a.
Kitchen volume (V)	m ³	41	12	5	97
Cooking time (t)	min/day	259	53	60	480
Nominal air exchange rate (α)	ACH	60	7	36	90

3. Results

Pollutant emissions rate (CO and PM_{2.5})

Table 3 shows fugitive emissions rates of PM_{2.5} and carbon monoxide (CO) from four plancha stove types and the relative fraction of fugitive emissions to the overall emission rate from the stove.

Table 3. Fugitive emissions from plancha-type stoves in Mexico

Parameter	n	PM _{2.5} Emissions rate (mg/min)			CO Emissions rate (mg/min)		
		Chimney	Fugitive	Fraction of overall	Chimney	Fugitive	Fraction of overall
ONIL	15	52 (32)	2.1(1.3)	0.05(0.03)	594(332)	12(12)	0.02(0.02)
Ecostufa	15	75 (52)	3.5(1.9)	0.06(0.04)	931(588)	5(3)	0.01(0.01)
Mera-Mera	15	76 (47)	2.4(1.6)	0.03(0.02)	1244(543)	20(16)	0.01(0.01)
Patsari	15	50 (21)	3.9(2.1)	0.07(0.03)	1645(965)	11(11)	0.01(0.00)
All stoves	60	63 (41)	3.0(1.8)	0.05(0.03)	1104(743)	12(12)	0.01(0.01)
Mean (standard deviation)							

Fugitive emissions from the Patsari stove were double those from the Mera-Mera, while chimney emissions from the Patsari were ~25% lower. As a result fugitive emissions from the Patsari are a larger fraction of overall emissions from the stove compared to the stoves with greater chimney emissions. Fugitive emissions for PM_{2.5} were also substantially higher than those for CO, which may be the result of a greater fraction of PM_{2.5} emissions escaping during lighting, or from larger fuel pieces that stick out the entrance to the combustion chamber.

Fugitive emissions from the plancha-type stoves were substantially lower than the mean of 25% of the overall emission (standard deviation of 10%; range 1-50) guidance by the World Health Organization (WHO) Indoor Air Quality Guidelines for the fraction of emissions entering the kitchen. The average fugitive emission for the 4 stove types tested was 5 ± 3 % for PM_{2.5} emissions and 1 ± 1 % for CO emissions. Similarly current estimates are also substantially lower than estimates of fugitive emissions by Smith et al 2010⁷ of 10%. As a result, ISO tier performance should be assessed through direct measurement of fugitive emissions combined with local ventilation parameters for input into the single zone model.

Table 4 and Figure 3 show estimates of the impact of fugitive emissions on indoor air quality using the Monte Carlo single single zone model, the percentage meeting WHO air quality guidelines and interim targets, and the ISO IWA 11:2012 indoor emissions tiers of performance. The impact of LPG emissions, assuming all emissions enter the room, have been added for comparison as it is often cited as a clean-burning cooking fuel.

Table 4. Estimates of 24-hour mean indoor concentrations and percent of simulations meeting WHO Air Quality Guidelines and interim target 1

	Particulate matter PM _{2.5} ($\mu\text{g m}^{-3}$)				Percent meeting Annual WHO guideline		ISO indoor emission PM _{2.5}	Carbon Monoxide (mg m^{-3})				Percent meeting 24-hr WHO guideline AQG (7 mg m^{-3})	ISO indoor emission CO
	Mean (SD)	Median	10%	90%	Interim Target-1 ($35 \mu\text{g m}^{-3}$)	AQG ($10 \mu\text{g m}^{-3}$)	mg min^{-1}	Mean (SD)	Median	10%	90%	g min^{-1}	
ONIL	10(6)	9	5	17	99%	58%	3	0.06(0.04)	0.05	0.02	0.1	100%	4
Ecostufa	17(10)	15	9	28	96%	17%	3	0.02(0.01)	0.02	0.01	0.04	100%	4
Mera-Mera	12(7)	10	5	20	99%	46%	3	0.10(0.06)	0.09	0.04	0.16	100%	4
Patsari	19(11)	17	9	31	94%	13%	3	0.05(0.03)	0.05	0.02	0.09	100%	4
All plancha stoves	15(9)	13	7	25	97%	30%	3	0.06(0.04)	0.05	0.02	0.11	100%	4
LPG	4(2)	3	2	7	100%	98%	4	0.15(0.09)	0.14	0.07	0.26	100%	4

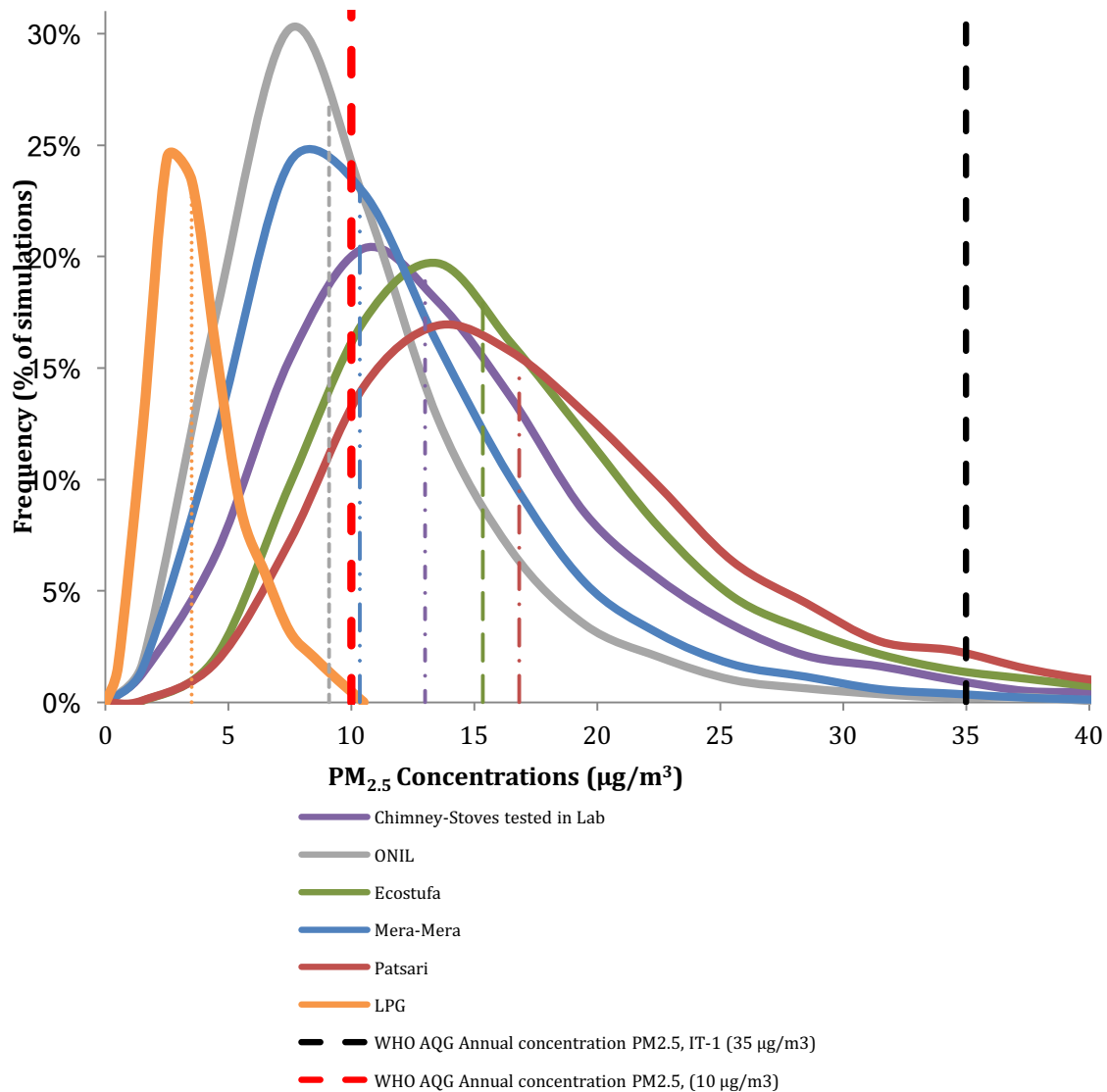


Figure 3. Modeled 24-hour mean indoor air concentration distributions of PM_{2.5} from.

Plancha-type stoves and LPG in reference to WHO IAQ guidelines. Dotted lines below the stoves indoor air concentration distributions show the geometric mean.

The means for each distribution of PM_{2.5} concentrations ranged from 10 to 19 µg/m³ depending on the stove, all are below the WHO Interim Target-1 of 35 µg/m³. The means of the CO (24-h) distributions ranged from 0.02 to 0.06 mg/m³ depending on the stove, which are well below the AQG of 7 mg/m³ recommended by WHO (2010)¹⁷. Fugitive emissions of PM_{2.5} from plancha-type chimney stoves resulted in simulated incremental increases in indoor concentrations of PM_{2.5} that would meet WHO interim target 1 for greater than 97% of homes. In addition, for the best performing of these stoves in terms of fugitive emissions, 58% of homes would have an incremental increase in indoor concentrations of PM_{2.5} that was less than the WHO AQG. Overall indoor air concentrations were a factor 2.5-4.7 higher than similar homes simulated with LPG stoves, which is reflected in the percentages of homes meeting the AQG for PM_{2.5}. ISO indoor emission tiers for CO were all Tier 4 for plancha-type stoves. Using emissions rates from laboratory tests of LPG reported by Shen et al. (2018)¹⁸, and the same single zone model parameters as above, mean indoor PM_{2.5} concentrations were 1.0 ± 0.6 µg/m³.

In order to estimate the impact of plancha-type stove emissions on surrounding houses downstream a three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) analysis was performed to determine housing densities where Plancha-type stoves could be promoted without major neighborhood pollution effects in surrounding houses. Using parameters estimated for the Purepecha region of Mexico on wind speed, housing volume, ground roughness, gas temperature etc (Table 2.) plume concentrations were estimated for emission rates of 20, 40, 60 and 80 mg/min. Figure 4 shows the iso-surface of $C = 1\mu\text{g}/\text{m}^3$ for the emission rate of 40 mg/min and contour of pollutant concentration with distance and height in the center of the plume.

Fig. 4: Pollutant plume using iso-surface of $C=1\mu\text{g}/\text{m}^3$ for emission rate of 40 mg/min and contour of pollutant concentration with distance and height in the center of the plume

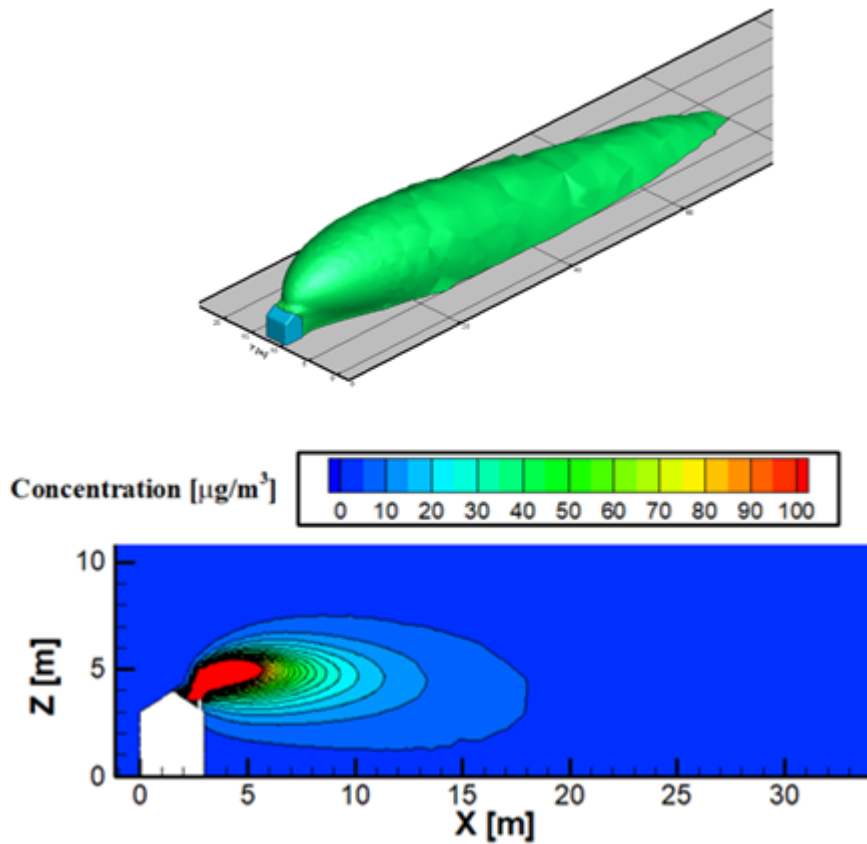


Figure 5 shows the distance between buildings for emission concentration to decrease to $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ at the breathing height of the individual for different chimney emissions rates. As emissions rates for plancha-type stoves range between 50 and $72\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Table 2), stoves plumes would decrease to $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ at approximately 95 meters for the Patsari and Onil, and 137 meters for the Mera Mera and Ecostufa (Table 5).

Figure 5. Distance between buildings for $\text{PM}_{2.5}$ emission concentration to decrease to $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ for different chimney emission rates.

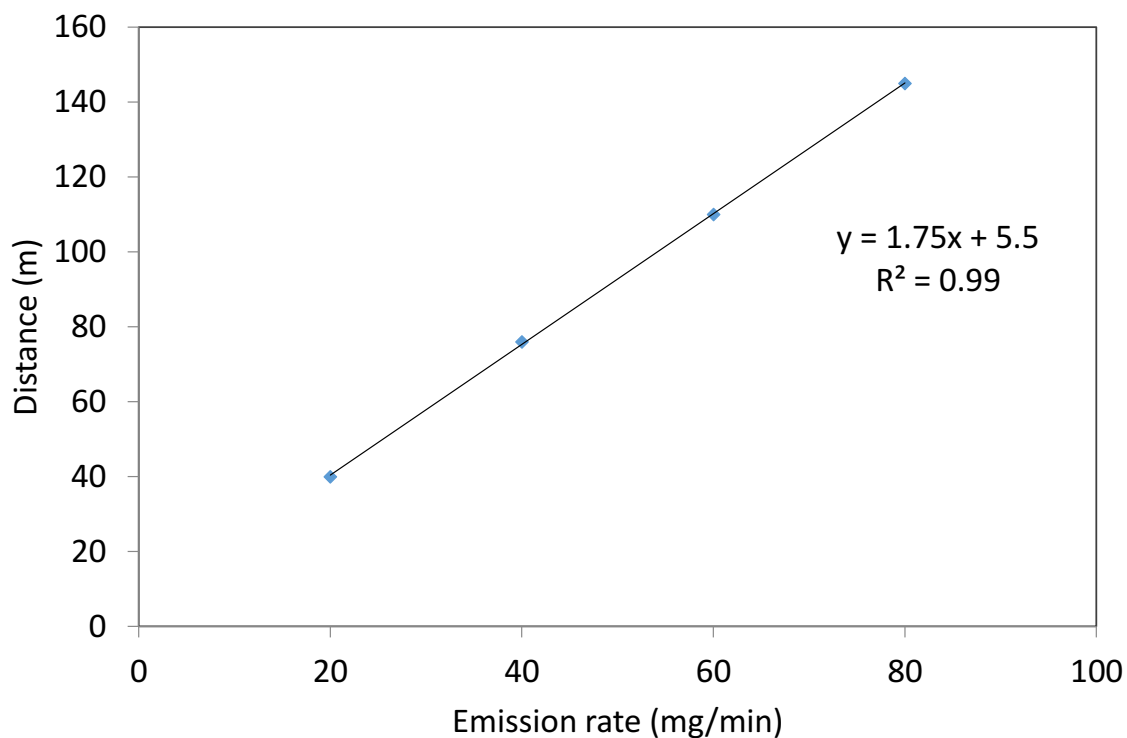


Table 5. Distance between buildings for emission concentration from Plancha-type stoves to decrease to $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ at breathing height of individual.

	PM _{2.5} emission rate	Distance (m)
ONIL	52	96
Ecostufa	75	136
Mera-Mera	76	138
Patsari	50	93
All chimney stoves	63	115

4. Discussion

4.1 Fugitive emissions

Chimney and fugitive emissions from four widely disseminated Mexican wood burning Plancha-type chimney stoves were measured to allow better estimation of indoor air concentrations and neighborhood air pollution impacts on other village houses downstream,

and relative health benefits that may accrue from promotion of plancha-type stoves. Measurements show that fugitive emissions well-functioning chimney stoves are a smaller fraction of total emissions than estimated for the WHO defaults of fraction of emissions entering the kitchen. Plancha-type chimney stoves vent on average $95 \pm 3\%$ and $99 \pm 1\%$ of total $PM_{2.5}$ and CO emissions out of the kitchen, respectively. Models that link emissions from cookstoves with indoor concentrations of $PM_{2.5}$ ¹⁹ have been useful in evaluating which stove types would meet WHO air quality guidelines in indoor environments⁶. Using a Monte Carlo single zone model parameterized for local Mexican building ventilation rates, building volume and cooking time, IAP concentration levels resulting from these stoves, are estimated to be on average $15 \pm 9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for $PM_{2.5}$ and $0.06 \pm 0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for CO. Modeled concentrations showed good agreement with estimated 24-hour mean indoor concentrations from Blanco et al (2012)²⁰ of $19.9 \pm 42.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $1.6 \pm 3.5 \text{mg}/\text{m}^3$ for $PM_{2.5}$ and CO, respectively, based on indoor concentrations during water boiling tests using Patsari and ONIL stoves in a simulated kitchen with dimensions similar to that modeled in the current study. Based on these models Plancha stoves meet benchmarks for WHO Air Quality Guidelines (AQG) Interim Target I for $PM_{2.5}$ and the 24-hr AQG for CO, respectively with on average 92% of homes meeting the guideline for $PM_{2.5}$. Similarly, all four plancha type stoves were ISO tier 4 for indoor emissions of CO and Tier 3 for indoor emissions of $PM_{2.5}$, respectively.

The Global Alliance for Clean Cookstoves considers stoves that meet ISO Tier 3 for indoor emissions as clean for health (GACC, 2016). Leaving aside issues related to the basis for this classification, modeled indoor air concentrations using the Monte Carlo single zone model based on fugitive emissions measured in the current study implies that the most disseminated Mexican stoves would meet this classification. Thus, these measurements suggest that significant benefits to indoor air quality can result from venting emissions outside the home through a chimney. While it is clear that the best/cleanest options which can feasibly displace traditional stove use should be pursued in different regional contexts, this may include chimney stoves in areas where use of clean fuels is limited by distribution networks, local infrastructure, fuel pricing, political climate, affordability, and other factors. The benefits of venting outdoors have largely been overlooked by the most recent generations of forced draft

stoves. Recent measurements of some of these stoves however have shown that exposure reductions have failed to materialize in uncontrolled field trials^{21, 22}. When used in indoor kitchens ventilation of these stoves with flues or chimneys, however, likely would have achieved substantial exposure reductions provided that traditional stoves were not used alongside. Clearly there are a range of other barriers and complications in installing chimneys, however the benefits may merit the extra effort, and many stoves globally incorporate chimneys including heating stoves in China²³, Tibet²¹ and Mongolia²⁴ amongst others and Plancha-type stoves across Central America. When used outdoors, emission rates can be substantially higher and still maintain exposure contributions below WHO air quality guidelines²⁵.

4.2 Contribution to neighborhood emissions

Although indoor fugitive emissions from Mexican plancha-type stoves meet ISO criteria for clean in indoor kitchens, there are clearly scenarios where promotion of plancha-type stoves would not be advisable due to the density of surrounding homes and the neighborhood pollution impacts of the emissions vented through the chimney. Indoor pollutant concentrations in a kitchen with a plancha stove is a function of fugitive emissions from the stove, re-infiltration of emissions from the chimney of the same stove back into the home, and through infiltration of ambient pollutants from other external sources and upstream village stoves. Leaving aside considerations relating to user preferences, adoption, use intensity, and purchasing power, from a health perspective determination of whether plancha stoves should be promoted in an area depends on the density of homes that contribute to downwind neighborhood pollution levels, and relative costs and accessibility of cleaner fuels.

Determination of whether the indoor air concentrations are lower than WHO AQG guidelines and interim targets depends on the ambient concentrations upwind, which are a function of the density of homes in the area where dissemination of Plancha-type stoves are being considered. To provide a benchmark for criteria for where dissemination of stoves could be considered three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) analysis was used to estimate the distance required between homes for chimney emissions outdoors to drop to 1

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ between homes (Table 3). As a first step these criteria can be useful in spatial analyses to evaluate potential areas where installation of plancha-type stoves could be promoted where the emissions do not substantially increase neighborhood pollution levels. An approach similar to that used for estimating impacts of outdoor cooking on neighboring houses²⁵. Consequently, a mechanistic model was used to evaluate plausible contributions to the neighborhood pollution impacts from houses with similar emissions spaced equally downwind in the center of the plume and resultant health implications. Figure 6 shows plume concentrations at the breathing height of an individual (1.5 m) for 5 houses in the downwind direction with each home emitting at 20 mg/min and a distance of 40m between homes such that the emissions from the first house reach $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ at the second home.

Figure 6. Contour of pollutant concentration at 1.5 m for 5 homes downwind in the center of the plume with each home emitting at 20 mg/min and a distance of 40 m between homes

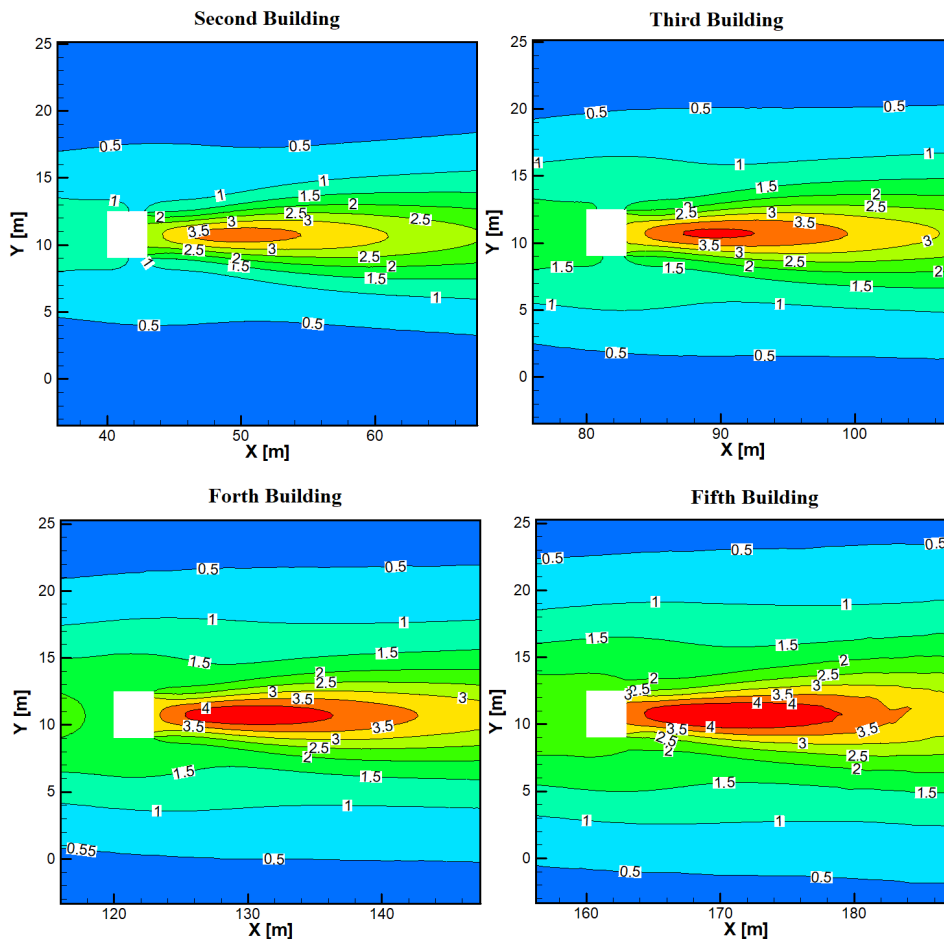
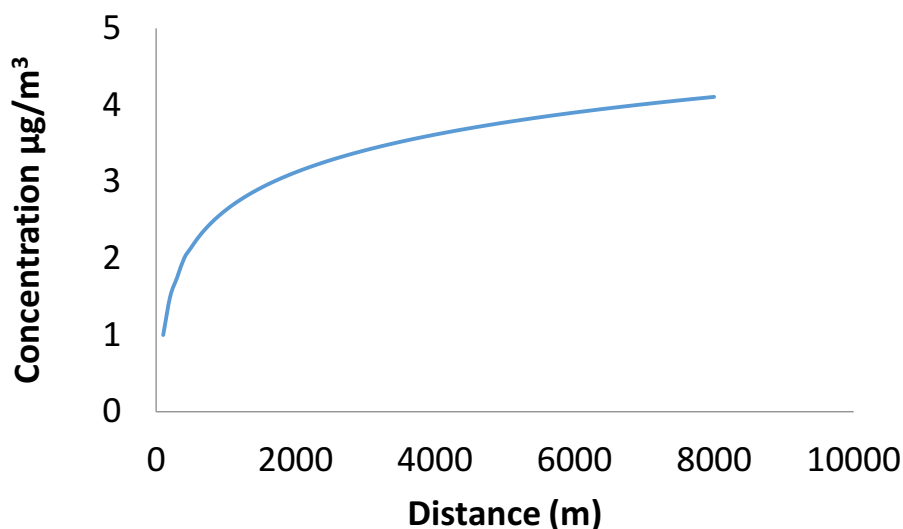


Figure 6 demonstrates the increase in neighborhood pollution as we move downwind, as a result of pollutant emissions from houses upwind, which is countered by plume dispersal. Since the distance between homes is linearly proportional to the emissions rate, for the Patsari stove Figure 7 shows the incremental increase in concentration in neighborhood pollution for homes spaced 100 meters apart such that emissions from the first house reach $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ at the second home. The figure demonstrates that neighborhood pollution impacts reach $4\mu\text{g}/\text{m}^3$ by 8 km or 80 homes downstream under this scenario. When added as background concentrations to the Monte Carlo single zone model simulation plancha-type stoves would still meet WHO IT1 of $35\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figure 7 Increase in concentration at each successive building with distance for homes with Patsari stoves spaced 100 m apart



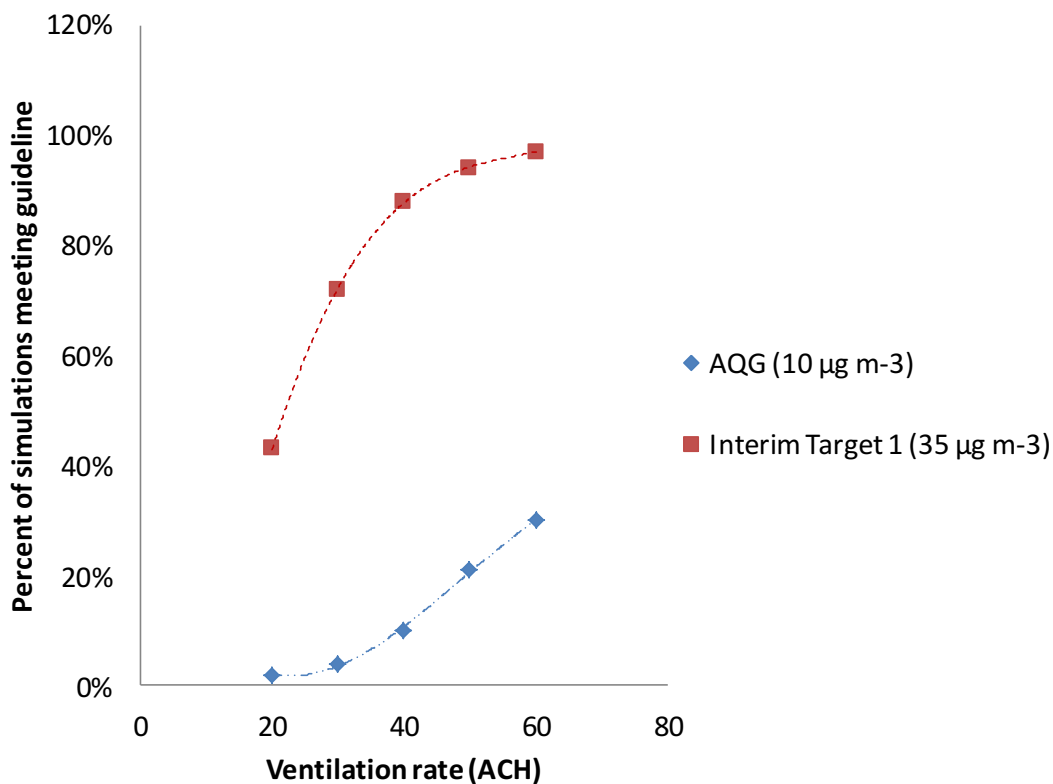
Limitations

Use of Monte Carlo simulations and three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) analysis clearly represents an idealized set of assumptions and scenarios that are not intended to represent actual communities, rather they are intended to facilitate the establishment of benchmarks that can be further evaluated and tested with field measurements. In particular, simulated indoor air concentrations are sensitive to assumptions on kitchen ventilation (airflow and mixing volume). Although ventilation rates were measured in a kitchen with

similar construction, dimensions and door/window openings as the average kitchen in these regions of Michoacán, in practice kitchens vary considerably particularly where structures are not standardized and self-built. These simulations do not capture the range of variability in kitchen design, or the actual indoor air concentrations in individual kitchens, rather they are intended to give an idea of indoor air concentrations in a typical kitchen for the region. Similarly, there are many differences in kitchen construction and design in different climatic conditions in Mexico and other regions of the world, which would impact kitchen ventilation and indoor air concentrations, and thus the number of simulations and homes meeting guidelines. For example Park et al (2003) report lower average air exchange rates of 12.2 ACH in 18 homes based on CO decay for a single event of 7 min or longer. Actual air exchange rates were likely higher however as they assumed zero background CO concentration, well mixed air, and no CO source strength during the decay as the source was not removed from the room²⁶. CO emissions can be very significant in the smoldering phase of the fire, and emissions are typically quite stratified and not well mixed in village kitchens. Smith et al. (1983) estimated that air exchanges greater than 35h ACH would be required for their modeled concentration to agree with measured concentrations in Indian village homes²⁷. Bhangar et al. reported mean air exchange rates of 15.8 ± 4.04 ACH for 10 homes with mud walls using traditional stoves in Kaldari, India²⁸. S. Cowlin measured 6 kitchens in San Lorenzo Guatemala classified as closed, partially closed and open and reported air exchange rates of 15.8 ± 5 ACH for closed kitchens, 18.3 ± 7.8 ACH for partially closed, and 31.4 ± 18.8 ACH for open homes respectively²⁹. In addition they showed that height of measurement significantly impacts air exchange estimates in open homes when a mixing fan is not present with lower measurements producing lower air exchange estimates²⁹. In the current study the mean ventilation rates were substantially higher than those reported, but similar to Cowlin estimates for open kitchens at higher measurement heights; however, a mixing fan was present which may account for the higher estimates and kitchen construction in this region is typically in a separate room to the main house with large eave spaces and ~1cm gaps between wall planks. In addition, simulated indoor concentrations agree well with measured concentrations in homes. To evaluate the impact of this parameter, therefore, and to illustrate how these stoves might perform in other environments, Figure 8 shows the percent of simulations meeting WHO guidelines under different air exchange profiles with

other parameters kept as above . With air exchange rates above 40 ACH there is not a large difference in the number of simulations meeting Interim Target 1, but a significantly greater fraction meeting the air quality guideline. Conversely the fraction meeting interim target 1 decreases rapidly below 30 ACH. Where direct measurements of fugitive emissions is not possible these results give a baseline for the estimated fraction of simulations meeting the guidelines when combined with local data on kitchen ventilation.

Figure 8. Percent of simulations meeting WHO guidelines under different air exchange profiles.



Modeling homes spaced equally apart directly downwind and emitting all at the same time represents an idealized conservative scenario to be more protective of health. While the modeled indoor air concentrations based on the Monte Carlo single zone model agree well with controlled measurements, they differ substantially from actual communities due to the upwind contributions of a variety of sources including homes and small scale industries, wind speed in actual communities, temporal and seasonal differences in emissions and behavior

and meteorological parameters etc. The impact of upwind sources on the effective indoor air reductions seen from plancha-type stove dissemination in communities has been demonstrated by Armendariz Arnes et al 2010³⁰. While the neighborhood pollutions impacts are modeled from stove emissions the contributions of ambient background emissions from further upstream are not included, and they are spatially and temporally variable in different countries around the world, and limit application of these analyses, although they can be added for different regions to make these analyses more relevant to the local context.

Stacking of cooking stoves has been widely reported in Mexico and other places where households do not transition fully to cleaner burning cookstoves, but retain the traditional stove, often outdoors for some cooking tasks³¹. The current analyses do not include stacking in homes as the purpose was to evaluate the potential benefits of plancha-type stoves, and to determine spatial criteria where these stoves could be promoted. Similar to LPG, where stacking occurs and the traditional fire is used indoors for some tasks, air quality guidelines would not be met. However, in this region use of the traditional fire in combination with the plancha-type stove tends to be in outdoor environments for heating water.

5. Conclusions

Plancha-type stoves have been widely disseminated in Mexico and Central America, but the performance of these stoves has been underestimated using current WHO defaults for the fraction of emissions entering the kitchen.

- Fugitive emissions from plancha-type chimney-stoves are on average 5% for PM_{2.5} and 1% for CO, much lower than the 25 ± 10% defaults in WHO Guidelines (WHO, 2014).
- The associated kitchen pollutant concentrations resulting from these fugitive emissions are estimated to be on average 15 ± 9 µg/m³ for PM_{2.5} and 0.06 ± 0.04 for CO, suggesting that the stoves meet the WHO AQG Annual Interim Target I for PM_{2.5} and the 24-hr AQG for CO.

- Including modeled neighborhood pollution impacts as background in indoor concentration estimates Plancha-type stoves would still meet WHO AQG Annual Interim Target I for PM_{2.5} and the 24-hr AQG for CO.
- Using the IWA Tier System for indoor emission rates, the chimney-stoves tested were Tier 4 for CO and 3 for PM_{2.5}.
- The plancha-type stoves tested meet current interim performance guidelines from the Global Alliance for health endpoints.

Acknowledgements

This research was supported by UNAM, PAPIIT IT-101315, SENER CONACYT 2014 246911 Clúster de biocombustibles sólidos para generación térmica y eléctrica; the Global Alliance for Clean Cookstove (GACC) RFP-14-1; and US EPA STAR R835423 A Global Map of Feasible Residential Solutions, Emphasizing Stoves with Space Heating Uses. The contents are solely the responsibility of the authors and do not necessarily represent the official views of the aforementioned institutions. Further, the aforementioned institutions do not endorse the purchase of any commercial products or services mentioned in the publication. The authors thank René Martínez and Alfredo Fuentes at the Bioenergy and Ecotec lab facilities, and Paulo Medina for their help during tests. We would also like to thank LINEB and GIRA for their support during measurement of laboratory and field parameters, respectively.

6. References

1. Naeher, L.; Leaderer, B.; Smith, K., Particulate matter and carbon monoxide in highland Guatemala: indoor and outdoor levels from traditional and improved wood stoves and gas stoves. *Indoor air* **2000**, *10*, (3), 200-205.
2. Amendariz Arnez, C.; Edwards, R. D.; Johnson, M. J.; Zuk, M.; Rojas-Bracho, L.; Serrano, P.; Riojas-Rodríguez, H.; Masera, O. R., Reductions in personal exposures and indoor concentrations of PM and CO in rural Mexico as a result of the installation of a Patsari Improved Cook Stove. *Indoor Air* **2008**, *18*, 93-105.
3. Armendáriz Arnez, C.; Edwards, R.; Johnson, M.; Zuk, M.; Serrano, P.; Rojas Bracho, L.; Riojas-Rodríguez, H.; Masera, M., Reduction in particulate and carbon monoxide levels associated with the introduction of a Patsari improved cook stove in rural Mexico. *Indoor Air* **2008**, *18*, 93-105.

4. Wang, X.; Franco, J.; Masera, O. R.; Troncoso, K.; Rivera, M. X., What Have We Learned about Household Biomass Cooking in. *The World Bank, Washington DC* **2013**.
5. Medina, P.; Berrueta, V.; Martínez, M.; Ruiz, V.; Edwards, R.; Masera, O., Influence of laboratory test on performance of plancha-type stoves in Mexico. *Dev Eng* **2017**, 2, 20-28.
6. Johnson, M.; Edwards, R.; Morawska, L.; Nicas, M.; Smith, K. R., Review 3: Model for linking household energy use with indoor air quality. *WHO Indoor Air Quality Guidelines: household Fuel Combustion*. **2014**.
7. Smith, K. R.; McCracken, J. P.; Thompson, L.; Edwards, R.; Shields, K. N.; Canuz, E.; Bruce, N., Personal child and mother carbon monoxide exposures and kitchen levels: methods and results from a randomized trial of woodfired chimney cookstoves in Guatemala (RESPIRE). *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* **2010**, 20, (5), 406-416.
8. GACC, Water Boiling Test (WBT) protocol version 4.2.3. Retrieved from <http://cleancookstoves.org/technology-and-fuels/testing/protocols.html> **2014**.
9. MacCarty, N.; Still, D.; Ogle, D., Fuel use and emissions performance of fifty cooking stoves in the laboratory and related benchmarks of performance. *Energy for Sustainable Development* **2010**, 14, (3), 161-171.
10. Edwards R.D.; Bond T.C.; Smith K.R., Final Report. EPA STAR R835036 Characterization Of Emissions From Small, Variable Solid Fuel Combustion Sources For Determining Global Emissions And Climate Impact. **2016**.
11. Jetter, J.; Zhao, Y.; Smith, K. R.; Khan, B.; Yelverton, T.; DeCarlo, P.; Hays, M. D., Pollutant emissions and energy efficiency under controlled conditions for household biomass cookstoves and implications for metrics useful in setting international test standards. *Environmental science & technology* **2012**, 46, (19), 10827-10834.
12. Launder, B. E.; Spalding, D. B., *Mathematical models of turbulence*. Academic press: 1972.
13. Richards, P.; Hoxey, R., Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- ϵ turbulence model. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics* **1993**, 46, 145-153.
14. Armendáriz Arnez, C.; Edwards, R. D.; Johnson, M. J.; Rosas, I. A.; Espinosa, F. J.; Masera, O. R., Indoor particle size distributions in homes with open fires and improved Patsari cook stoves in Mexico. *Atmospheric Environment (Submitted)* **2009**.
15. Masera, O.; Edwards, R.; Arnez, C. A.; Berrueta, V.; Johnson, M.; Bracho, L. R.; Riojas-Rodríguez, H.; Smith, K. R., Impact of Patsari improved cookstoves on indoor air quality in Michoacán, Mexico. *Energy for Sustainable Development* **2007**, 11, (2), 45-56.
16. Traynor, G. W.; Apte, M. G.; Dillworth, J. F.; Hollowell, C. D.; Sterling, E. M., The effects of ventilation on residential air pollution due to emissions from a gas-fired range. *Environment International* **1982**, 8, (1), 447-452.
17. WHO, WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. World Health Organization Regional Office for Europe, Bonn. **2010**.
18. Shen, G.; Hays, M. D.; Smith, K. R.; Williams, C.; Faircloth, J. W.; Jetter, J. J., Evaluating the Performance of Household Liquefied Petroleum Gas Cookstoves. *Environmental science & technology* **2018**, 52, (2), 904-915.
19. Johnson, M.; Lam, N.; Brant, S.; Gray, C.; Pennise, D., Modeling indoor air pollution from cookstove emissions in developing countries using a Monte Carlo single-box model. *Atmos Environ* **2011**, 45, (19), 3237-3243.

20. Blanco, S.; Cárdenas, B.; Maíz, P.; Berrueta, V.; Masera, O.; Cruz, J., Estudio comparativo de estufas mejoradas para sustentar un Programa de Intervención Masiva en México. *Informe Final. Instituto Nacional de Ecología. Versión actualizada: Septiembre de 2012.*
21. Edwards, R.; Bond, T.; K.R., S., Characterization of emissions from small, variable solid fuel combustion sources for determining global emissions and climate impact. *Final Project report EPA STAR R83503601 2017.*
22. Wathore, R.; Mortimer, K.; Grieshop, A. P., In-Use Emissions and Estimated Impacts of Traditional, Natural- and Forced-Draft Cookstoves in Rural Malawi. *Environmental Science & Technology 2017, 51, (3), 1929-1938.*
23. Edwards, R. D.; Smith, K. R.; Liu, Y.; Yin, Z.; He, G.; Sinton, J., Household CO and PM levels measured as part of a review of China's national improved stove program. *Indoor Air 2007, 17, (3), 189-204.*
24. Social Impact *Impact evaluation final results report - MCA Mongolia Energy and Environment Project Energy Efficient Stove Subsidy Program; Ulaanbaatar, Mongolia, 2013.*
25. Edwards, R.; Princevac, M.; Weltman, R.; Ghasemian, M.; Arora, N. K.; Bond, T., Modeling emission rates and exposures from outdoor cooking. *Atmos Environ 2017, 164, (Supplement C), 50-60.*
26. Park, E.; Lee, K., Particulate exposure and size distribution from wood burning stoves in Costa Rica. *Indoor Air 2003, 13, (3), 253-259.*
27. Smith, K. R.; Aggarwal, A. L.; Dave, R. M., Air pollution and rural biomass fuels in developing countries: A pilot village study in India and implications for research and policy. *Atmospheric Environment (1967) 1983, 17, (11), 2343-2362.*
28. Bhangar, S., Indoor air quality of households with improved and traditional stoves in Kaldari, India. *Health, environment and development, University of California, Berkeley 2006.*
29. Cowlin, S. C., Tracer Decay for Determining Kitchen Ventilation Rates in San Lorenzo, Guatemala. *Maxwell Student Projects, Max-04-4, EHS, School of Public Health, University of California, Berkeley. 2005.*
30. Armendáriz-Arnez, C.; Edwards, R. D.; Johnson, M.; Rosas, I. A.; Espinosa, F.; Masera, O. R., Indoor particle size distributions in homes with open fires and improved Patsari cook stoves. *Atmos Environ 2010, 44, (24), 2881-2886.*
31. Ruiz-Mercado, I.; Masera, O., Patterns of stove use in the context of fuel-device stacking: rationale and implications. *Ecohealth 2015, 12, (1), 42-56.*

ANEXO C. Comparative performance of five Mexican plancha-type cookstoves using water boiling tests

Development Engineering 2 (2017) 20–28



Contents lists available at ScienceDirect

Development Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/deveng



Comparative performance of five Mexican plancha-type cookstoves using water boiling tests



Paulo Medina^{a,*}, V. Berrueta^{b,2}, M. Martínez^{a,1}, V. Ruiz^{c,3}, R.D. Edwards^{d,4}, O. Masera^{c,3}

^a División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Morelia, Michoacán, Mexico

^b Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Aplicada (GIRA), Pátzcuaro, Michoacán, Mexico

^c Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Morelia, Michoacán, Mexico

^d Department of Epidemiology, School of Medicine, University of California, Irvine, USA

ARTICLE INFO

Keywords:

Plancha-type stoves
3-Stone fire
Water boiling test
Performance
Emissions

ABSTRACT

While plancha-type cookstoves are very popular and widely disseminated in Latin America, few peer review articles exist documenting their detailed technical performance. In this paper we use the standard Water Boiling Tests (WBT) to assess the energy and emission performance of five plancha-type cookstoves disseminated in about 450 thousand Mexican rural homes compared to the traditional 3-stone fire (TSF). In the high-power phase, average modified combustion efficiencies (MCE) for plancha-type stoves were $97 \pm 1\%$ which was higher than TSF $93 \pm 4\%$, and reductions in CO and PM_{2.5} total emissions were on average 44%. Time to boil and specific fuel consumption, however, were increased in plancha-type stoves compared to the open fire as a result of the reduced overall thermal efficiency of the plancha during WBT. In the simmering phase, plancha-type stoves showed much more consistent performance reductions compared to the TSF. MCE for plancha stoves were on average $98 \pm 1\%$ and $95 \pm 3\%$ for the TSF, while reductions in CO and PM_{2.5} total emissions were on average 55%. In this phase 27% average savings in fuel use are achieved by plancha-type stoves. Removal of the plancha rings resulted in savings of specific fuel consumption (SFC), thermal efficiency (TE), and time to boil; however, CO and PM_{2.5} emissions increased significantly as flue air is drawn through the comal surface rather than through the combustion zone, resulting in suboptimal combustion conditions.

International Workshop Agreement (IWA) energy performance Tiers for plancha-type stoves ranged from 0 to 1. However, these results contrast sharply with the well documented reductions in fuel consumption during daily cooking activities achieved by these stoves. IWA indoor emissions Tiers are 4 for both PM_{2.5} and CO using locally measured values for fugitive emissions. Optimization of combustion chamber design on these stoves in Mexico is desirable to further reduce indoor emissions and to reduce the impacts of neighborhood pollution that can re-infiltrate kitchens. Comparison of performance between plancha-type stoves and unvented stoves should reflect the substantial gains that are made by reducing indoor air pollution and exposures by venting pollutants.

1. Introduction

Plancha-type cookstoves have been widely disseminated in Mexico as they are well suited to local cooking customs and are widely accepted in local communities [1]. Between 2007 and 2012 a total of more than 600,000 plancha-type stoves had been disseminated, mostly through the *Programa Nacional de Estufas de Leña* [2]. Recently, assessment

of cookstoves technical performance has been integrated into a standardized guidance through an International Workshop Agreement (IWA) 11:2012 of the International Standards Organization [3], that provide performance Tiers of efficiency, emissions and safety [4]. Although there is a standard for total emissions, ISO standards to protect health largely address open combustion type stoves, and stoves without flues. There is a clear exposure benefit that

* Correspondence to: División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Gral. Francisco J. Mugica S/N, Ciudad Universitaria, 58030 Morelia, Michoacán, Mexico.

E-mail addresses: paulo491@hotmail.com (P. Medina), vberrueta@gira.org.mx (V. Berrueta), mcinco71@gmail.com (M. Martínez), victor_ruizgarcia@yahoo.com (V. Ruiz), edwardsr@uci.edu (R.D. Edwards), omasera@gmail.com (O. Masera).

¹ Gral. Francisco J. Mugica S/N, Ciudad Universitaria, 58030 Morelia, Michoacán, Mexico.

² Carretera Pátzcuaro a Erongaricuaro 28, 61613 Tzetzenguaro, Pátzcuaro, Michoacán, Mexico.

³ Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Colonia Ex-Hacienda de San José de la Huerta, 58190 Morelia, Michoacán, Mexico.

⁴ 101 Theory, Suite 258, Irvine, CA 92697-3957, USA.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.deveng.2016.06.001>

Received 24 July 2015; Received in revised form 1 June 2016; Accepted 6 June 2016

Available online 15 June 2016

2352-7285/© 2016 The Authors. Published by Elsevier Ltd.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

well-functioning chimney stoves provide as only a fraction of the emissions enter the kitchen via fugitive emissions and re-infiltration. The World Health Organization (WHO) Indoor Air Quality Guidelines present emission rates for both vented and unvented stoves, where the emission rate for vented stoves used a normal distribution for the fraction of emissions entering the kitchen, ranging from 1 to 50% with a mean of 25% and standard deviation of 10% of the emissions from an unvented stove [5]. The IWA standards were established with Tiers for indoor emissions, which represent fugitive emissions for a stove with a flue, and total emissions based on reductions in emissions rates in a transition from open fires to modern forced draft stoves. Cognizant of the gaps in information for specific stove, IWA workshops recommended that new protocols be developed or current protocols be updated to more adequately address a larger number of stove and fuel types, such as heating stoves, plancha stoves, charcoal stoves, double pot stoves and solar cookers [6].

In this paper we examine the energy and emission performance of 5 Mexican plancha-type stoves in comparison with a 3-stone fire (TSF) using standard Water Boiling Tests (WBT). We highlight the issues involved in incorporating plancha-type stoves into IWA guidance. We examine the reasons for poor performance of plancha-type stoves in WBT in relation to actual performance during daily cooking tasks in real homes, and suggest some modifications to test protocols to better reflect the actual performance of these stoves. These suggestions can be useful for IWA current activities on adapting the WBT for plancha stoves.

2. Methods

2.1. Stoves distribution

Fig. 1 shows the 5 plancha-type stoves tested: Patsari, Patsari Portatil, ONIL, Mera-Mera, and Ecostufa. Distribution of the Patsari has been approximately 200,000 in several Mexican States such as Michoacan, Oaxaca, Sinaloa, and others. Distribution of the ONIL has been approximately 90,000 predominantly in Guerrero, Oaxaca, San Luis Potosi, and Chiapas. The extent of Mera-Mera and Ecostufa distribution is not known precisely, but several thousands have also been distributed in different Mexican States. The total estimated distribution is more than 450 thousand stoves installed in the field. The Patsari stove is built in-situ and the rest are mass-produced. The ONIL and Mera-Mera have metallic rings insert in the plancha surface that can be removed to improve the heat transfer pot to comal⁵ (see Supplementary section for more detailed information about each stove tested). The ONIL and ONIL without rings were evaluated to highlight the impact of the plancha surface in changing emission and performance metrics as can be seen in Fig. 2.

2.2. Water boiling test

The WBT protocol version 4.1.2 [7] was used to determine performance and emission parameters of the plancha-type stoves and the TSF. All plancha-type stoves were started with a small amount (~30 g) of “ocote” that is a highly resinous piece of pitch pine. For all three phases of the WBT protocol, a digital scale with 1 g resolution was used to determinate measurements of the mass of fuel used. White oak (*Quercus bicolor*) was used in all WBT test, and the average dimensions of fuel were 2 cm×4 cm×40 cm. Fuel moisture was determined by a Protimeter Timbermaster Wood Moisture Meter, and nine measurements for each test for each stove were made [8]. The average fuelwood moisture content for all tests was $8.8 \pm 1.4\%$ on a wet basis with a range of 7–13%.

⁵ Comal is a flat metal surface lying immediately over the combustion zone on which food items and pots to cook food are placed.



Fig. 1. Stoves tested. Left to right: Ecostufa, Mera-Mera, Patsari Portatil, 3-stone fire, ONIL and Patsari.

2.3. Emission measurements

Emission measurements were made using a Portable Emissions Measurement System (PEMS) (Aprovecho Research Center, Oregon USA), consisting of a hood under constant flow which collects emissions from the cookstove being tested. Real-time concentrations are measured using a NDIR (non-dispersive infrared) sensor for CO₂, an electrochemical cell to measure CO, and a light scattering photometer to estimate PM_{2.5}. CO₂ and CO sensors were calibrated using zero air and a mixture of 100 ppm CO and 3000 ppm CO₂ [9]. Constant flow hoods have been used previously to capture and measure emissions from cookstoves in laboratory or simulated kitchen settings [10–13].

Light scattering by particles is dependent on the scattering coefficient of particles, mass scattering cross section and the particle size distribution [14]. PEM PM_{2.5} light scattering measurements were referenced to simultaneously collected gravimetric filter based measurements from in-lab testing using the same stove and wood type by the following adjustment factors:

$$\text{Patsari: } (y[\text{PM}_{2.5,\text{filter}}]=5.1[\text{PM}_{2.5,\text{optical}}]+5417), R^2=0.84, \quad (1)$$

$$\text{Ecostufa: } (y[\text{PM}_{2.5,\text{filter}}]=19[\text{PM}_{2.5,\text{optical}}]+2690), R^2=0.90, \quad (2)$$

$$\text{ONIL: } (y[\text{PM}_{2.5,\text{filter}}]=11[\text{PM}_{2.5,\text{optical}}]+2667), R^2=0.99, \quad (3)$$

where [PM_{2.5,filter}] and [PM_{2.5,optical}] are filter and optical PM_{2.5} concentration, respectively. Eq. (1) was used to adjust Patsari Portatil and Mera-Mera PM_{2.5} light scattering concentrations as filter data were not available for these measurements.

2.4. Data analysis

When the number of replicates is small, the t-test is recommended over ranked transformations and the Welch test [15]. Statistical analysis of difference in means was done using a two sample t-test, and probability of error of $p \leq 0.05$ was considered statistically significant as reported by Grimsby et al. [16] and Berrueta et al. [17], respectively. Coefficient of variation (CV) and t-distribution for plancha-type stoves performance during WBT phases are shown in Appendix A, Table A1. The 95% confidence interval (CI) indicates the reliability of the means based on the number of test replicates, where the true mean has 95% chance of lying within the confidence interval. Emissions reductions and 95% CI from plancha-type stoves relative to TSF are shown in Table A2.

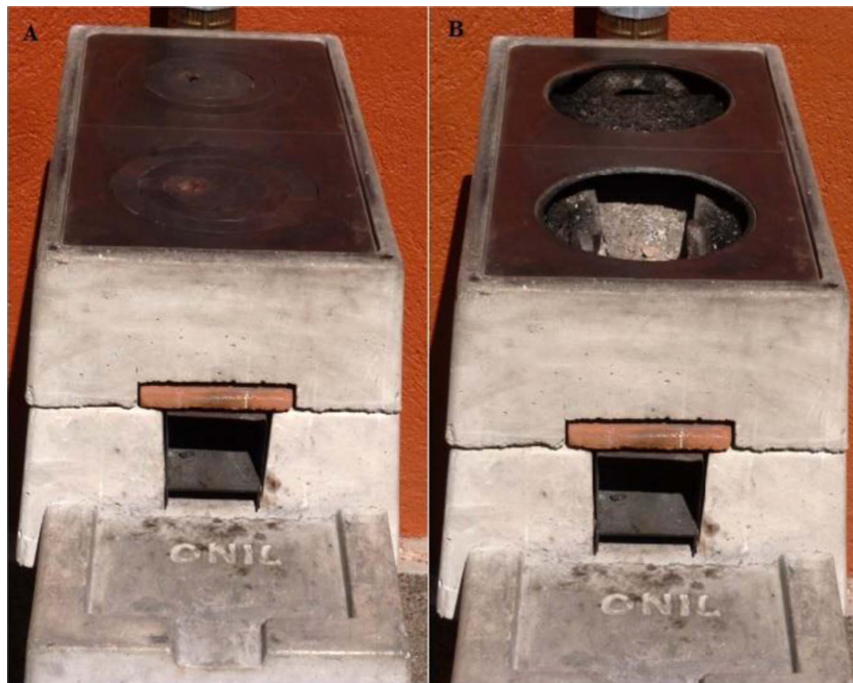


Fig. 2. ONIL stove: (A) Plancha surface. (B) Rings in plancha surface removed.

3. Results

3.1. Performance parameters

Unadjusted PEMS light scattering $PM_{2.5}$ concentrations underestimated particle concentrations by a factor of 10 and 15 relative to gravimetric filter based measurements depending on the specific stove, demonstrating the importance of referencing light scattering measurements to gravimetric concentrations. In fact, IWA protocols recommend that both gravimetric and light scattering methods to be used, and some studies [18,19] have demonstrated the need to reference light scattering measurements to gravimetric concentrations to ensure that the measurements are comparable between the two methods and

across different testing centers.

Table 1 shows average specific fuel consumption (SFC), thermal efficiency (TE), firepower, and time to boil for high and low power phases of five repeat WBT tests of 5 plancha-type stoves compared to TSF. In the high power phase, TSF showed the lowest time to boil with 20 ± 5 min which is similar as reported by [10,20], and its SFC was 0.1 ± 0.1 kg/L in relatively good agreement with prior studies [17]. TE for Patsari stove was $12 \pm 1\%$, but TSF demonstrated statistically higher thermal efficiency which also was observed by Bailis et al. [20]. During simmering phase, SFC for TSF was 0.2 ± 0.1 kg/L which is significantly different from the 0.1 ± 0.1 kg/L obtained for all plancha-type stoves. The highest CVs obtained when estimating SFC, TE, and firepower was 26% as can be seen in Table A2. In the time to boil, however, the ONIL

Table 1
Average performance parameters of plancha-type stoves and TSF for both WBT phases.

Phase	Parameter	TSF	Patsari	Patsari Portatil	Mera-Mera	Ecostufa	ONIL
High power: cold and hot start	SFC (kg/L)	0.1 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.2 ± 0.1
	TE (%)	15 ± 1	12 ± 1	8 ± 1	16 ± 3	19 ± 3	15 ± 2
	Firepower (kW)	11 ± 3	10 ± 2	11 ± 2	9 ± 1	9 ± 2	8 ± 2
	Time to boil	20 ± 5	43 ± 15	38 ± 11	48 ± 13	36 ± 12	62 ± 28
Low power	SFC (kg/L)	0.2 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.1
	TE (%)	15 ± 1	13 ± 1	11 ± 1	22 ± 1	20 ± 1	17 ± 2
	Firepower (kW)	4 ± 1	7 ± 1	7 ± 1	6 ± 1	6 ± 1	5 ± 1

Note: A total of 5 tests were conducted for each stove and TSF, and average of high and low power phases is shown. Variability is expressed as \pm standard deviation.

Table 2
Average emission contribution for Plancha-type stoves and TSF during the high and simmer phases.

Phase	Parameter	TSF	Patsari	Patsari Portatil	Mera-Mera	Ecostufa	ONIL
High power: cold and hot start	MCE (%)	93 ± 4	97 ± 1	97 ± 1	96 ± 1	98 ± 1	99 ± 1
	g(c)CO/kg(c)CO ₂	81 ± 43	31 ± 13	35 ± 13	40 ± 13	19 ± 6	13 ± 7
	gCO ^a	59 ± 31	43 ± 12	41 ± 9	44 ± 11	22 ± 8	20 ± 9
	gPM _{2.5} ^a	5.3 ± 2.9	2.5 ± 0.9	3.0 ± 0.8	3.5 ± 1.2	2.9 ± 1.0	3.0 ± 1.1
Low power	MCE (%)	95 ± 3	98 ± 1	99 ± 1	98 ± 1	99 ± 1	98 ± 1
	g(c)CO/kg(c)CO ₂	52 ± 28	15 ± 5	15 ± 5	18 ± 7	11 ± 2	17 ± 10
	gCO ^a	33 ± 12	17 ± 8	18 ± 7	17 ± 8	11 ± 3	14 ± 8
	gPM _{2.5} ^a	4.4 ± 1.1	1.8 ± 0.3	1.9 ± 0.6	2.2 ± 0.4	2.2 ± 0.6	1.6 ± 0.5

Note: Variability is expressed as ± standard deviation.

^a Total emissions as reported by Yuntewi et al. [30]. Average of high and low power phases is shown.

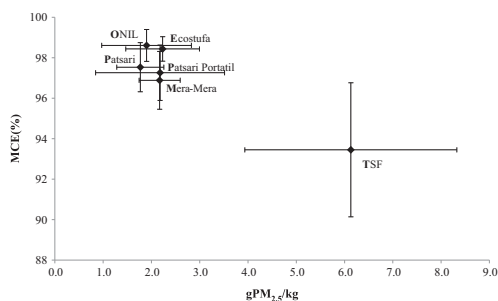


Fig. 3. Average of PM_{2.5} emission factors and MCEs for plancha-type stoves and TSF. Note: Error bars represent ± standard deviation.

stove presented a CV of 46% due to its larger variation to reach boiling point in both cold and hot phases.

Table 2 shows average emissions contribution plancha-type stoves and TSF for high power and low power phases of five repeat WBT tests. Overall, plancha-type stoves all showed large emission reductions relative to the TSF. Reductions in CO total emissions in the high-power phase ranged between 26% and 67%, depending on the stove. Reductions in PM_{2.5} total emissions ranged between 35% and 52% with the ONIL and the Patsari stove showing the largest values, depending on the pollutant. Average reductions for plancha-type stoves in the simmering phase relative to the TSF were substantial and statistically significant with 54% for CO and 56% for the PM_{2.5}, with the Ecostufa and ONIL showing the largest reductions, respectively. In addition, reductions in CO emission ratios in the high and low power phases were on average 66% and 71%, respectively, and differences were statically significant at 95% confidence.

Fig. 3 shows average of modified combustion efficiencies (MCE) and PM_{2.5} emission factors for plancha-type stoves and TSF. MCEs for ONIL (99 ± 1%), Ecostufa (98 ± 1%), Mera-Mera (97 ± 1%), Patsari (98 ± 1%), and Patsari Portatil (97 ± 1%) were higher than the TSF (93 ± 3%). MCEs for the TSF and ONIL stove were comparable between this study and those reported by Jetter et al. [21], and MCE for Patsari stove is also in a good agreement with reported combustion efficiencies [8]. Average PM_{2.5} emission factor (gPM_{2.5}/kg dry wood) for the five plancha-type stoves was 2.0 ± 0.2 gPM_{2.5}/kg which is 3 times lower than the TSF (6.1 ± 2.2 gPM_{2.5}/kg) and differences between the stoves

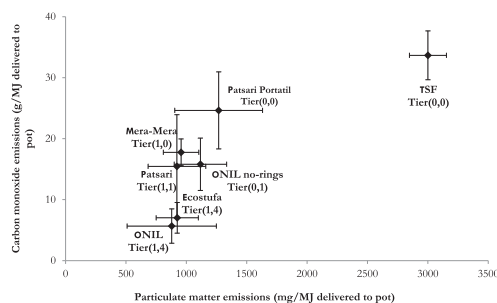


Fig. 4. High-power CO and PM_{2.5} emissions for Plancha-type stoves and TSF using IWA metrics. Note: Error bars represent ± standard deviation.

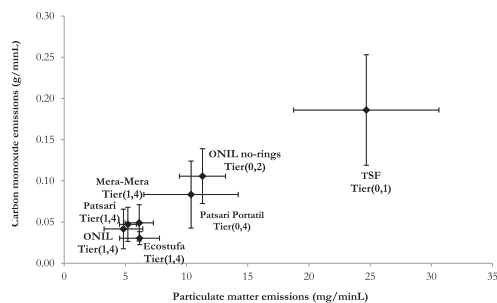


Fig. 5. Low-power CO and PM_{2.5} emissions for Plancha-type stoves and TSF using IWA metrics. Note: Error bars represent ± standard deviation.

tested and the TSF were statistically significant at 95% confidence level.

3.2. IWA performance metrics

Figs. 4 and 5 and Table A3 compare the different stoves tested in terms of the IWA efficiency and emission performance metrics. **Efficiency:** the highest thermal efficiency Tier achieved by plancha-type stoves was by the ONIL without rings with Tier 1 (21 ± 1%), the

rest of Plancha-type stoves with metallic surfaces separating the combustion zone from the pot were Tier 0. Emissions: for CO emissions, during high-power phase, Tiers ranged from 0 for Patsari Portatil and Mera-Mera, to 4 for Ecostufa and ONIL. For the low-power phase, most stoves achieved Tier 4 for CO emissions. Regarding $PM_{2.5}$ emissions, most stoves achieved Tier 1 in both high- and low-power phases. Indoor emissions: we measured fugitive emissions in a set of 18 WBT conducted in the five plancha-stoves examined, for a total of 54 measurements. The results indicate that fugitive emissions average 1% (with a 95% CI \pm 0.3%). Using this value, to estimate CO and $PM_{2.5}$ indoor emissions for Plancha-type stoves we obtain a Tier 4 for both pollutants.

4. Discussion

Plancha-type stoves have substantially higher modified combustion efficiencies and reduced overall emissions (Fig. 3), however, thermal efficiencies in WBT are comparable or lower than the TSF because the plancha-type stoves have a metal plate that separates the pot from the combustion zone, which allows for a flue that vents emissions outdoors. While indoor emissions are substantially less than open fire stoves that vent directly into indoor environments, optimization of combustion chamber design on these plancha-type stoves in Mexico is desirable to further reduce indoor emissions and to reduce the impacts of neighborhood pollution that can re-infiltrate. Thus there is still considerable room for improvement in these stove designs.

In WBTs all plancha-types stoves showed low overall TEs, comparable or lower than the TSF (see Table 1), confirming previous studies (see for example [21]). This would imply little or no fuel savings of the stove compared to the traditional TSF. However, in field tests of fuel consumption, most of these stoves lead to fuel savings of more than 50% with regards to the TSF [17,22]. The reason for these somewhat contradictory findings threefold.

First, real cooking involves many factors that are not captured in laboratory tests [23,24], which is why WBTs are not representative of the situation in rural villages, or of climate benefits through carbon offsets [24–26]. Second, Plancha stoves show a poor energy and emissions performance when they are forced to boil a large volume of water, but boiling this amount of water is not representative of cooking of local staples in rural communities of Mexico and Central America. During simmering tests Plancha stoves consistently show much better MCE compared to high power tests because the combustion chamber tends to be overloaded restricting airflow when trying to boil large volumes of water, but during simmering air flow into the combustion chamber is sufficient to combust the available gases. Only one stove, the ONIL, showed similar efficiencies in both phases. Thirdly, the WBT underestimates the actual TE of these stoves because only a small portion of the comal heat transfer is used for boiling water [18], whereas the whole surface is used for cooking staple foods such as tortillas.

Current efforts to address these shortcomings of the WBT include, (a) testing in 2 modes: (1) with typical cooking pots and (2) with water in contact with 60% of the surface area of the plancha using a shallow pot (named “comalolla”) covering the whole comal surface to better represent the actual plancha heat transfer efficiency, or the “Mylar pot” method [27]. However, the evaporative losses of such a system would have to be accounted for when comparing with standard pots used of water boiling tests, or foam covers used on the water surface to minimize evaporative losses [28]; and (b) weighting the results of the different phases of the water boiling test by the relative proportions of boiling and simmering seen in the field through the use of a burn cycle [24], or comparing across performance curves [29]. Alternatively the effectiveness of the stoves could be evaluated with other tasks such as tortilla making in controlled cooking tests. However, this limits the

utility of the data in comparing stoves between different regions in a standard manner, as food staples differ across global regions.

The results presented here are the most comprehensive database collected to date using similar protocols, operators, and equipment for each test, representing a large share of plancha-type stoves in Mexico. The results represent a baseline of performance of plancha-type stoves with the WBT, and confirm that alternative approaches to testing these stoves are required in this region. The results also show that improvements in the design of these stoves are still needed. As a basis for improving test protocols these results show that simply removing comal rings to perform a WBT will not likely produce results that are meaningful, as it changes the combustion of the stove. Analysis of the specific impact of the *plancha* surface or *comal* on heat transfer and emissions is not straightforward as removal of the rings in the plancha surface changes the combustion conditions inside the stove. When rings are removed emissions are vented directly into the room, and air passing through the stove as a result of draw of the flue can by-pass going through the combustion zone, passing through the stove surface instead and up the chimney. Thus, airflow through the combustion zone is reduced which decreases the combustion efficiency. A comparison of the performance and emission parameters of the ONIL stove with a plancha and with the rings in the plancha surface removed is shown in Table 3. ONIL without rings demonstrated average reductions of 20% and 30% in SFC and time to boil, respectively, and there is 20% increase in TE as the heat transfer from the pot to the comal was improved. In contrast however, average CO and $PM_{2.5}$ total emissions and CO gaseous emission ratio from the ONIL without rings were 2.6, 1.3, and 3.2 times higher than ONIL, respectively, and differences between the stoves were statistically significant with a 95% confidence level. Thus, removal of the rings results in a tradeoff between increased heat transfer, and reduced MCE resulting in increased emissions.

Plancha-type stoves generally perform poorly on IWA Tiers compared to unvented stoves, with the exception of indoor emissions and stove safety Tiers. While this would lead many to dismiss these stoves, they are widely accepted and used in Mexico and other parts of Central America, and, as shown by our data, there is a clear exposure benefit that well-functioning chimney stoves provide. IWA has already recognized the problem, and has called for developing modified WBT adequate to plancha-type stoves.

Since the objectives of most stove programs are to reduce adverse health impacts, the performance characteristics of vented and unvented stoves need to be treated separately, with due consideration given to the substantial gains that are made by reducing indoor air pollution and exposures by venting pollutants outside. Finally performance testing should better reflect the actual cooking uses for which the stove is typically being used, which will substantially impact performance characteristics of plancha-type stoves.

5. Conclusions

This study makes a comparative evaluation of the 5 major Plancha-type stoves disseminated in Mexico. Results show that:

- Plancha-type stoves show substantial reductions in CO and $PM_{2.5}$ emissions compared to the 3-stone fire with WBT, but optimization of combustion chamber design on these plancha-type stoves in Mexico is desirable to further reduce the impacts of neighborhood pollution that can re-infiltrate.
- In the low-power phase of the water boiling test, Plancha stoves reported substantial improvements in emission and fuel savings with respect to high-power phases, indicating the combustion chamber tends to be overloaded restricting air supply during high power tasks.
- As expected removal of the plancha rings resulted in reductions of

Table 3

Average performance and emissions parameters of ONIL stove with plancha surface and with rings in plancha surface removed.

Phase	Stove	SFC (kg/L)	TE (%)	Firepower (kW)	Time to boil (min)	MCE (%)	g (c)CO/kg (c)CO ₂	gCO ^a	gPM _{2.5} ^a
High power: cold and hot start	ONIL	0.2 ± 0.1	15 ± 2	8 ± 2	62 ± 28	99 ± 1	13 ± 7	20 ± 9	3.0 ± 1.1
	ONIL no rings	0.1 ± 0.1	21 ± 3	7 ± 2	44 ± 14	95 ± 2	49 ± 18	55 ± 16	3.9 ± 1.0
Low power	ONIL	0.1 ± 0.1	17 ± 2	5 ± 1	–	98 ± 1	17 ± 10	14 ± 8	1.6 ± 0.5
	ONIL no rings	0.1 ± 0.1	19 ± 4	4 ± 1	–	96 ± 1	38 ± 11	29 ± 9	2.8 ± 1.8

Note: Variability is expressed as ± standard deviation.

^a Total emissions. Average of high and low power phases is shown.

SFC and time to boil, however, CO and PM_{2.5} emissions increased significantly as flue air is drawn through the comal surface rather than through the combustion zone, resulting in suboptimal combustion conditions.

5.1. Recommendations for protocol modifications

- Performance tests to better represent the actual energy performance of plancha-type stoves should focus on better representing the heat transfer through the surface with *comalolla* or mylar pot methods, and not through performing a WBT with the rings removed.
- There is a need to better integrate the different phases of laboratory performance tests by weighting to reflect the actual performance in the field through representative regional stove burn cycles [24].
- Although the WBT 4.2.3 states that fugitive emissions should be measured separately there is no protocol for doing so as part of emissions testing for plancha stoves. Protocols for assessment of fugitive emissions need to be developed and implemented.

Acknowledgements

We would like to thank Juan Pablo Gutiérrez Llerenas, Alejandro Tavera Durán, and Juan Carlos Vazquez Tinoco for their help in WBTs. We would also like to thank GIRA and LINEB for its support in providing resources and the infrastructure for all WBTs. Omar Masera would like to thank the financial support of Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) for his sabbatical stay. This research was supported by UNAM, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), PAPIIT Project 2012, Environmental Protection Agency (EPA) STAR 83503601 and Global Alliance for Clean Cookstove (GACC). Its contents are solely the responsibility of the authors and do not necessarily represent the official views of the US EPA and GACC. Further, US EPA and GACC do not endorse the purchase of any commercial products or services mentioned in the publication.

Appendix A

See Appendix Tables A1–A3.

Table A1
Coefficient of variation and t-distribution for plancha-type stoves.

Parameter	Phase	p-Value						CV (%)					
		Patsari	Patsari Portatil	Mera-Mera	Ecostufa	ONIL	ONIL-no rings	Patsari	Patsari Portatil	Mera-Mera	Ecostufa	ONIL	ONIL-no rings
gCO	High power	0.2	0.1	0.7	< 0.05	< 0.05	0.5	28	22	25	35	45	28
	Low power	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.7	48	40	44	24	58	29
gPM _{2.5}	High power	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.1	37	27	35	34	37	26
	Low power	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.2	14	30	17	28	33	64
g(c)CO/kg(c)CO ₂	High power	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	42	38	32	33	56	37
	Low power	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.3	31	34	39	21	60	29
MCE (%)	High power	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	1	1	1	1	1	2
	Low power	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.3	1	1	1	1	1	1
SFC (kg/L)	High power	< 0.05	< 0.05	0.2	0.1	< 0.05	< 0.05	16	14	34	15	27	17
	Low power	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	6	8	8	5	3	26
TE (%)	High power	< 0.05	< 0.05	0.5	< 0.05	0.6	< 0.05	10	12	19	14	12	15
	Low power	< 0.05	< 0.05	0.1	0.1	0.9	0.5	6	5	3	8	11	20
Firepower (kW)	High power	0.8	0.9	0.1	0.2	< 0.05	< 0.05	21	21	13	24	22	22
	Low power	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	0.3	12	6	7	5	1	14
Time to boil (min)	High power	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	36	28	28	34	46	32

Note: Plancha-type stoves were tested against TSF using a t-distribution with $\alpha=0.05$.

Table A2
Average percentage reductions and 95% confidence intervals (CI) for plancha-type stoves relative to the 3-stone fire (TSF).

Parameter	Phase	Patsari		Patsari Portatil		Mera-Mera		Ecostufa		ONIL	
		%	CI	%	CI	%	CI	%	CI	%	CI
gCO	High power	28	17 ± 22	30	18 ± 21	26	15 ± 22	63	37 ± 21	67	40 ± 27
	Low power	50	17 ± 15	47	16 ± 14	47	16 ± 15	67	22 ± 13	58	19 ± 15
gPM _{2.5}	High power	52	2.8 ± 2.0	44	2.3 ± 2.0	35	1.8 ± 2.1	45	2.4 ± 2.1	42	2.3 ± 2.1
	Low power	59	2.6 ± 1.2	57	2.5 ± 1.3	51	2.2 ± 1.2	49	2.1 ± 1.3	63	2.8 ± 1.3
g(c)CO/kg(c)CO ₂	High power	62	51 ± 30	57	46 ± 30	51	41 ± 30	77	63 ± 29	84	68 ± 29
	Low power	71	37 ± 29	71	37 ± 29	66	35 ± 29	79	41 ± 29	67	35 ± 31

Note: The column “%” means percentage reduction with respect to TSF. Percentage reductions were estimated as [(emission (TSF)–emission (plancha-type stove))/emission (TSF)]*100% as reported by Adkins et al. [31] and 95% CIs were estimated using: $\bar{X}_1 - \bar{X}_2 \pm t_{1-\alpha/2} S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$, where $S_p^2 = \frac{S_1^2(n_1 - 1) + S_2^2(n_2 - 1)}{n_1 + n_2 - 2}$, $t_{1-\alpha/2}$ is obtained from tables, and \bar{X}_1 was considered as the TSF.

Table A3
IWA performance metrics of plancha-type stoves and TSF.

IWA performance metrics	Units	TSF	Tier	Patsari	Tier	Patsari Portatil	Tier	Mera-Mera	Tier	Ecostufa	Tier	ONIL	Tier	ONIL without rings	Tier
High power thermal efficiency	%	15 ± 1	0	12 ± 1	0	8 ± 1	0	16 ± 3	0	19 ± 3	1	15 ± 2	1	21 ± 3	1
Low power specific consumption	MJ/min/L	0.2 ± 0.10		0.1 ± 0.1	1	0.1 ± 0.1	0	0.1 ± 0.1	1	0.1 ± 0.1	1	0.1 ± 0.1	2	0.1 ± 0.1	1
High power CO	g/MJd	34 ± 4	0	15 ± 9	1	25 ± 6	0	18 ± 2	0	7 ± 3	4	6 ± 3	4	16 ± 4	1
Low power CO	g/min/L	0.2 ± 0.11		0.1 ± 0.1	4	0.1 ± 0.1	4	0.1 ± 0.1	4	0.1 ± 0.1	4	0.1 ± 0.1	4	0.1 ± 0.1	2
High power-PM _{2.5}	mg/MJd	3001 ± 0		923 ± 239	1	1268 ± 363	0	957 ± 147	1	925 ± 175	1	879 ± 370	1	1117 ± 217	0
Low power PM _{2.5}	mg/min/L	25 ± 6	0	5 ± 1	1	10 ± 3	0	6 ± 1	1	6 ± 2	1	5 ± 2	1	12 ± 11	0
Indoor emissions CO ^a	g/min	2.3 ± 0.80		0.1 ± 0.1	4	0.1 ± 0.1	4	0.1 ± 0.1	4	0.1 ± 0.1	4	0.1 ± 0.1	4	0.1 ± 0.1	4
Indoor emissions PM _{2.5} ^a	mg/min	212 ± 720		0.6 ± 0.2	4	0.7 ± 0.1	4	0.6 ± 0.1	4	0.8 ± 0.2	4	0.5 ± 0.1	4	0.9 ± 0.1	4

Note: Variability is expressed as ± standard deviation.

^a CO and PM_{2.5} indoor emissions were estimated assuming a locally measured average fugitive emissions value of 1% the total emissions.

Appendix B. Supplementary material

Supplementary data associated with this article can be found in the online version at <http://dx.doi.org/10.1016/j.deveng.2016.06.001>.

References

REMPIO. Red Mexicana de Bioenergía, Cuaderno Temático No. 4, LA BIOENERGÍA EN MÉXICO, Situación Actual y perspectivas, 2011.
 V. Berrueta, I Seminario Taller Latinoamericano DE Cocinas/Estufas Limpias, Promoviendo La Adopción y Uso Sostenible En Gran Escala, Lima, Peru, 2014.
 International Organization for Standardization, IWA 11:2012: Guidelines for Evaluating Cookstove Performance, Author, Geneva, Switzerland, retrieved from (http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=61975), 2012
 Johnson, M.A., Chiang, R.A., 2015]. Quantitative stove use and ventilation guidance for behavior change strategies. J. Health Commun. Int. Perspect. 20 (Suppl.), S6–S9.
 Johnson, M., Edwards, R., Morawska, L., Smith, K., Nicas, M., 2014]. Review 3: model for linking household energy use with indoor air quality, WHO Indoor Air Quality Guidelines: Household Fuel Combustion.
 ISO IWA, International Standards Organization (ISO) International Workshop Agreement (IWA), ISO International Workshop on Cookstoves, (<http://www.pciaonline.org/proceedings/>), 2012
 Water Boiling Test (WBT) Version 4.1.2, Available from: Partnership for Clean Indoor Air, (http://www.pciaonline.org/files/WBT4.1.2_0_0.pdf) (accessed 2013 February).
 Johnson, M., Edwards, R., Alatorre Frenk, C., Masera, O., 2008]. In-field greenhouse gas emissions from cookstoves in rural Mexican households. Atmos. Environ. 42, 1206–1222.
 MacCarty, N., Still, D., Ogle, D., 2010]. Fuel use and emissions performance of fifty cooking stoves in the laboratory and related benchmarks of performance. Energy Sustain. Dev. 14, 161–171.
 Jetter, J.J., Kariher, P., 2009]. Solid-fuel household cook stoves: characterization of performance and emissions. Biomass Bioenergy 33, 294–305.

MacCarty, N., Ogle, D., Still, D., Bond, T., Roden, C., 2008]. A laboratory comparison of the global warming impact of five major types of biomass cooking stoves. Energy Sustain. Dev. 12, 5–14.
 Smith, K.R., Uma, R., Kishore, V.V.N., Lata, K., Joshi, V., Zhang, J., Rasmussen, R.A., Khalil, M.A.K., 2000]. Greenhouse Gases from Small-scale Combustion Devices in Developing Countries. EPA/600/R-00/052. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
 Zhang, J., Smith, K.R., Ma, Y., Ye, S., Jiang, F., Qi, W., Liu, P., Khalil, M.A.K., Rasmussen, R.A., Thorneloe, S.A., 2000]. Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a database for emission factors. Atmos. Environ. 34, 4537–4549.
 Edwards, R., Smith, K.R., Zhang, J., Ma, Y., 2004]. Implications of changes in households stoves and fuel use in China. Energy Policy 32, 395–411.
 Winter, J.C.F., 2013]. Using the Student’s t-test with extremely small sample sizes. Pract. Assess. Res. Eval. 18 (10), 1–12.
 Grimsby, L.K., Rajabu, H.M., Treiber, M.U., 2016]. Multiple biomass fuels and improved cook stoves from Tanzania assessed with the water boiling test. Sustain. Energy Technol. Assess. 14, 63–73.
 Berrueta, V., Edwards, R., Masera, O.R., 2008]. Energy performance of woodburning cookstoves in Michoacan, Mexico. Renew. Energy 33 (5), 859–870.
 Chung, A., Chang, D.P.Y., Kleeman, M.J., Cahill, T.A., Dutcher, D., McDougall, E.M., Stroud, K., 2001]. Comparison of real-time instruments used to monitor airborne particulate matter. J. Air Waste Manag. Assoc. 51, 109–120.
 Ramachandran, G., Adgate, J.L., Hill, N., Sexton, K., Pratt, G.C., Bock, D., 2000]. Comparison of short-term variations (15 min averages) in outdoor and indoor PM_{2.5} concentrations. J. Air Waste Manag. Assoc. 50, 1157–1166.
 Bailis, R., Berrueta, V., Chengappa, C., Dutta, K., Edwards, R., Masera, O., Still, D., Smith, K.R., 2007]. Performance testing for monitoring improved biomass stove interventions: experiences of the Household Energy and Health project. Energy Sustain. Dev. 12 (2), 57–70.
 Jetter, J., Zhao, Y., Smith, K.R., Khan, B., Yelverton, T., DeCarlo, P., Hays, M.D., 2012].

- Pollutant emissions and energy efficiency under controlled conditions for household biomass cookstoves and implications for metrics useful in setting international test standards. *Environ. Sci. Technol.* 46, 10827–10834.
- Masera, O.R., Navia, J., 1997]. Fuel switching or multiple cooking fuels? Understanding inter-fuel substitution patterns in rural mexican households. *Biomass Bioenergy* 12 (5), 347–361.
- Chen, Y., Roden, C.A., Bond, T.C., 2012]. Characterizing biofuel combustion with patterns of real-time emission data (PaRTED). *Environ. Sci. Technol.* 46, 6110–6117. <http://dx.doi.org/10.1021/es3003348>.
- Johnson, M., Edwards, R., Berrueta, V., Masera, O., 2010]. New approaches to performance testing of improved cookstoves. *Environ. Sci. Technol.* 44, 368–374.
- Edwards, R.D., Karnani, S., Fisher, E.M., Johnson, M., Naeh, L., Morawska, L., Smith, K.R., 2014]. Review 2: emissions of health-damaging pollutants from household stoves, WHO Indoor Air Quality Guidelines: Household Fuel Combustion.
- Johnson, M., Edwards, R., Ghilardi, A., Berrueta, V., Gillen, D., Alatorre Frenk, C., Masera, O., 2009]. Quantification of carbon savings from improved biomass cookstove projects. *Environ. Sci. Technol.* 43, 2456–2462.
- ISO TC 285, Clean Cookstoves and Clean cooking Solutions – Harmonized Laboratory Protocols – Part 1: Standard Test Sequence for Emissions and Performance, Safety and Durability, 2015.
- L'Orange, C., DeFoort, M., Willson, B., 2012]. Influence of testing parameters on biomass stove performance and development of an improved testing protocol. *Energy Sustain. Dev.* 16, 3–12.
- Makonese, T., Robinson, T., Pemberton-Pigott, C., Annegarn, H., 2011]. A preliminary comparison between the heterogeneous protocols and the water boiling test. *New Dawn Eng.*
- Yuntenwi, E.A.T., MacCarty, N., Still, D., Ertel, J., 2008]. Laboratory study of the effects of moisture content on heat transfer and combustion efficiency of three biomass cook stoves. *Energy Sustain. Dev.* 12 (2), 66–77.
- Adkins, E., Tyler, E., Wang, J., Siriri, D., Modi, V., 2010]. Field testing and survey evaluation of household biomass cookstoves in rural sub-Saharan Africa. *Energy Sustain. Dev.* 14, 172–185.

ANEXO D. Closing the gap between lab and field cookstove test: Benefits of multi-pot sequencing cooking tasks through controlled burning cycles

Energy for Sustainable Development 41 (2017) 106–111



Contents lists available at ScienceDirect

Energy for Sustainable Development



Closing the gap between lab and field cookstove tests: Benefits of multi-pot and sequencing cooking tasks through controlled burning cycles



Paulo Medina ^{a,*}, V. Berrueta ^{b,2}, M. Martínez ^{a,1}, V. Ruiz ^{c,d,3,4}, I. Ruiz-Mercado ^{c,e,3,5}, O.R. Masera ^{c,3}

^a División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Morelia, Michoacán, México

^b Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada A.C. (GIRA), Pátzcuaro, Michoacán, México

^c Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Morelia, Michoacán, México

^d Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México

^e Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), Ciudad de México, México

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 January 2017

Revised 18 August 2017

Accepted 20 August 2017

Available online xxxx

Keywords:

Performance

emissions

CCT

CBC

Patsari

U-type

ABSTRACT

There is a critical need for developing wood-burning cookstoves lab tests that better reflect their field performance, and that can be used to complement existing standard tests. This is particularly true for Plancha-type cookstove stoves, widely disseminated in Latin America, where existing tests, like Water Boiling Test (WBT) and Controlled Cooking Test (CCT), are either not well suited to these stoves or do not capture the simultaneous and sequential arrangement of local cooking practices –i.e., multi-pot cooking, pre-heating of meals, and use of residual heat. In this paper, we developed a “controlled cooking cycle” or “controlled burning cycle” (CBC) test to study the benefits, in terms of fuelwood and pollutants emissions savings, of multi-pot cooking arising from the integration of cooking tasks. Tests were conducted on the Patsari stove, a plancha-type stove that has been widely disseminated in Mexico and in other regions of Central America. We first used CCTs to evaluate the comparative energy and emissions performance of the Patsari stove relative to a traditional U-shaped open fire (U-type) for the most common cooking practices carried out in the Purepecha Region of Michoacan. We also compared results from the CBC multi-pot cooking with results from simply conducting the cooking tasks in series. All the CCTs and CBCs were carried out in a simulated kitchen at GIRA facilities in Patzcuaro, Michoacan, Mexico with two local cooks who performed all the cooking tasks in the traditional/typical manner of the region. Results from CCTs showed Patsari benefits relative to the open fires, in terms of fuelwood consumption and CO and PM_{2.5} emissions savings, vary among cooking tasks and range from negligible to 63% depending on the parameter and the task. The sequential cooking and integration of these tasks in a CBC result in average savings of 65% for CO, 65% for PM_{2.5} and 35% for fuelwood relative to the U-type, and of between 30% and 44% savings with respect to simply conducting the cooking tasks in series in the same stove. The CBC fuelwood savings obtained here are comparable with field results from Kitchen Performance Tests (KPT) conducted regionally by other authors. The results confirm that multi-pot cooking and a smart sequential integration of tasks developed by local users are key to achieve the maximum benefits from plancha-type stoves, and need to be much better reflected in standard lab tests.

© 2017 International Energy Initiative. Published by Elsevier Inc. All rights reserved.

* Corresponding author at: División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Gral. Francisco J. Mugica S/N, Ciudad Universitaria. Postal code: 58030. Morelia, Michoacán, México.

E-mail addresses: paulo491@hotmail.com (P. Medina), vberrueta@gira.org.mx (V. Berrueta), mcinco71@gmail.com (M. Martínez), victor_ruizgarcia@yahoo.com (V. Ruiz), ilse.ruiz@cieco.unam.mx (I. Ruiz-Mercado), omasera@gmail.com (O.R. Masera).

¹ Postal addresses: Gral. Francisco J. Mugica S/N, Ciudad Universitaria. Postal code: 58030. Morelia, Michoacán, México.

² Postal addresses: Carretera Pátzcuaro a Erongaricuaro 28. Postal code: 61613. Tzetzenguaro, Pátzcuaro, Michoacán, México.

³ Postal addresses: Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Ex-Hacienda de San José de la Huerta. Postal code: 58190. Morelia, Michoacán, México.

⁴ Postal addresses: Avenida Universidad 3000, Ciudad Universitaria. Postal code: 04510. Ciudad de México, México.

⁵ Postal addresses: Avenida de los Insurgentes Sur 1582, Crédito Constructor, Benito Juárez. Postal code: 03940. Ciudad de México, México.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2017.08.009>

0973-0826/© 2017 International Energy Initiative. Published by Elsevier Inc. All rights reserved.

Introduction

Reliance on fuelwood for cooking and heating is very high in many Latin-American countries, particularly within rural areas. Wood is mostly burned in open fires, which require vast amounts of fuel and produce very high indoor air pollution (L'Orange et al., 2012), leading to several health effects (Rumchev et al., 2007), and environmental problems (Smith et al., 2010). To cope with this problem, plancha-type improved wood-burning cookstoves have been widely disseminated in several countries across North, Central and South-America such as Mexico, Bolivia, Peru and Honduras with >1 million stoves installed (I Seminario Taller Latinoamericano, 2014). In rural Mexico, the Patsari stove, a multi-pot



Fig. 1. A. Stoves tested. Left to right: Patsari stove and the U-type. B. Different in-field simultaneous cooking of several dishes on Patsari stoves observed in Purepecha Region of Central Mexico.

plancha-type stove,⁶ has been well accepted due to its effectiveness to cook tortillas, but also is used to cook beans and rice, heat beverages, and to fry eggs as reported by Ruiz-Mercado and Masera, (2015).

Many studies have emphasized the need to develop standard lab and field tests that better reflect in-field conditions (Arora and Jain, 2015; Adkins et al., 2010; Bailis et al., 2007). This is particularly true for Plancha-type cookstove stoves, because Water Boiling Tests (WBT) are not well suited to these stoves, as a large fraction of the heat that is transmitted through the “plancha” is not captured by the pot filled with water that is placed on top of it. Adaptations to the standard Water Boiling Tests (WBT) such as the “comal-olla” or “plancha-olla” (Medina et al., 2017; ISO TC 285, 2015) or the “Mylar pot” (ISO TC 285, 2015) have been proposed to better estimate the actual heat transfer from the combustion of fuel to the plancha (Medina et al., 2017). But these adaptations, while important to have more realistic estimates of the stoves actual energy efficiency, are not aimed at giving feedback on their in-field performance.

Controlled Cooking Tests (CCT) were developed to give more insights on the stoves performance for the most relevant cooking practices within a region (Bailis et al., 2007). While CCTs have proved very valuable –and have not been used to the extent they should as a complement to WBT– they also present shortcomings. In fact, evidence from the field shows that local cooking tasks more than being a simple

collection of isolated events, are usually performed following specific arrangements, which can be thought as daily “burning cycles” –or “cooking cycles”– (Johnson et al., 2010).

Here we argue that the combination of specific cooking practices carried out locally as well as the simultaneous and sequential arrangement of these practices in burning cycles –i.e., multi-pot cooking, and use of residual heat for pre-heating meals and water, or for keeping food warm, see (Ruiz-Mercado and Masera, 2015), could be used as a starting point for developing new standard tests that could help to better assess the actual field performance of improved stoves. These tests, simulating regional cooking cycles, can be viewed as a complement to standard tests, such as WBT and individual CCTs.

To test these hypotheses, we first conducted a series of CCTs for the most common meals (or cooking tasks) prepared in the Purepecha Highlands, Central Mexico and compared the relative performance of Patsari improved stoves to traditional open fires for each task. We then integrated the different cooking tasks in a Controlled Burning Cycle (CBC) and re-assessed the energy and emissions performance of Patsari stove relative to both traditional open fires and to itself for the whole cycle and for a theoretical cycle consisting of the simple additions of conducting the individual tasks in series.

Methods

Controlled Cooking Test

Stoves. Fig. 1A shows the cookstoves tested: Patsari stove and a traditional fire: the U-shaped open fire (U-type). **Patsari:** the body of Patsari

⁶ Plancha-type stoves are characterized for having a large flat griddle, named “plancha” or “comal” that covers the upper part of the stove, avoiding the direct contact between the fire and the pot and also allowing the smoke to exit the house through a chimney. The griddle is usually made of metal, and the stoves could be metallic or made of local materials, like bricks, mud, and cement.

stove is made of brick and cement with a combustion chamber, a main metal comal that is 52 cm in diameter, two secondary comales that are 27 cm in diameter and a chimney to release the pollutant gases outside the cooking area. **U-type:** Masonry (e.g., bricks, stones, mud) materials fire encloses the fire simulating a U-shaped combustion chamber (Maserá et al., 2007). Patsari stove was tested against U-type to evaluate five typical meals and a CBC. **Performance test.** CCT protocol version 2.0 (Controlled Cooking Test, CCT, 2015) was used to determine both performance and emissions parameters of wood-burning cookstoves. White oak (*Quercus bicolor*) was used in all CCT and CBC tests, the average dimensions of fuel were 3 cm × 5 cm × 30 cm, and a digital scale with 1 g resolution was used to determine fuelwood measurements. Fuel moisture content was measured with a Protimeter Timbermaster Wood Moisture Meter as reported by Pennise et al. (2010), and the average fuelwood moisture content for all CCT tests was 10 ± 2%, expressed as wet basis with a range of (7–15%). All CCT and CBC tests were initiated with a small amount (~25 g) of “ocote” that is a highly resinous piece of pitch pine used as a fire starter material. **Location.** All the CCTs and CBCs were carried out in a simulated kitchen at GIRA facilities in Patzcuaro, Michoacan, Mexico. The simulated kitchen has the following internal dimensions: 2.9 m wide by 3.85 m in length, with a height of 3.2 m. **Cooks.** Two local cooks were hired to perform all the cooking tasks in the traditional/typical method familiar to them (see Table A3). **Individual meals.** As mentioned before, five items were prepared on the Patsari and U-type stoves: 3 kg of tortillas, fried eggs (5 pieces), ½ kg of fried rice, ½ kg of fried boil beans, and 1 L of boiled water. Each individual task was performed in the main comal of the Patsari stove and a similar metal comal, which is 52 cm in diameter (see Fig. 1A), was used in the U-type to perform all the individual tasks. It is important to note that in the Purepecha Region of Michoacan a metal or clay comal is used over the open fire to prepare tortillas as well as other food items (Berrueta et al., 2008; see Fig. A4). **Cooking cycle.** The CBC was designed to mimic the way Patsari users cook their meals in terms of the time sequence of meals and the way each dish is accommodated in the different comales (for example, skilled users make use of the residual heat of the secondary comales to warm up water or to slow cook some meals) as reported by (Ruiz-Mercado and Maserá, 2015). It was performed in Patsari and U-type. CBC included 3 kg of tortillas, fried eggs (5 pieces), ½ kg of fried rice, ½ kg of fried boil beans, and 1 L of boiled water. The cooking procedure was: 1) to make tortillas and 2) to fry rice, to fry beans and to boil water simultaneously on the main Patsari comal and to fry 5 eggs on the secondary comal. These cooking tasks are typical from the Purepecha region as reported by (Maserá and Navia, 1997). A similar CBC was applied in the U-type fire using the metal comal mentioned previously to perform the cooking cycle. In this case tortillas were made first, frying beans, frying rice and boiling water were done simultaneously using the metal comal, and then the 5 eggs were fried. The cooking cycle was established based on extensive field work in the area and detailed visits to 30 households, where the main cooking tasks, sequences and timing of these practices were documented. Fig. 1B shows typical arrangements of multiple dishes in Patsari stoves installed in the Purepecha Region.

Appendix A reports the following supplementary material: Patsari stove performance relative to U-type, Patsari performance across different comparison levels, numbers of tests by individual tasks and for the CBC and a series of Figures to show: 1) the simulated kitchen, 2) CBC's simultaneous arrangement, 3) experimental setup to capture emissions and 4) use of the comal over the open fire by Michoacan rural users. Appendix B shows a detailed description for the CBC including equipment, testing procedure and calculations.

Emission measurement

Fine particulate matter (PM_{2.5}) emissions samples were collected using a portable hood, as shown in Fig. A3, that is made of fire resistance fabric, measuring 1 m × 1 m, and with a metal fan to exhaust emissions. To collect CO₂ and CO emissions a Flue Gas Analyzer (FGA) (Autologic,

USA) was used that measures gas concentrations directly from the flue (Prapas et al., 2014; Tsai et al., 2003). Patsari emission samples were collected from probes inserted 40 cm, 50 cm and 60 cm above the chimney base. Open fire emissions were taken with an “Araña probe” (Roden et al., 2006) or “3-pronged probe” (Johnson et al., 2009) about 1.5 m above the open fire as reported by Roden et al. (2009). FGA was calibrated using CO and CO₂ reference gas as reported by Johnson et al. (2009), and continuous measurements were recorded every 8 s.

PM_{2.5} emissions were measured using gravimetric methods as reported by Jetter and Kariher, (2009). Integrated PM_{2.5} samples were collected using a GAST Vacuum Pump (Gast Manufacturing Inc.) at a flow rate of 16.7 L per minute. PM_{2.5} was collected on FPAE-102 glass fiber filters (4 in. 1 µm pore size, HI-Q Environmental Products; San Diego, CA) which were placed inside the filter holder (ILPH-102, HI-Q Environmental Products; San Diego, CA) that was positioned downstream of a PM_{2.5} cyclone (URG-2000-30EHS, URG; Chapel Hill, NC). Filters were equilibrated in a temperature- and humidity-controlled room for at least 24 h (Li et al., 2012) and then weighed pre-and post sampling using a microbalance (0.01 mg readability, CX 265; Citizen Scale India Private Limited).

Statistical analysis

The Patsari stove and both open fires were tested for significant differences in performance and emissions parameters. A statistical analysis of difference in means was conducted with a two sample t-test. The probability of error of 1%, 5% and 10%, was considered significant (Beyene et al., 2015).

Results

Technical Performance and Emissions Characteristics of Individual Cooking Tasks

Table 1 shows the performance parameters associated to each individual cooking task for both the Patsari stove and U-type in terms of total fuelwood consumed, energy consumed, cooking time and CO and PM_{2.5} total emissions. Results are presented as averages ± one standard deviation. For the U-type, total fuel consumption varied by a factor of 4 between tasks. Also, the energy consumed per mass of food cooked varied by a factor of 5 among tasks, ranging from 12 ± 1 MJ/kg for tortillas to 65 ± 10 MJ/kg for frying eggs. Additionally, cooking times varied by a factor of 3, ranging from a bit >20 min for frying eggs, frying beans, and boiling water to one hour (61 ± 14 min) to cook fried rice.

For the Patsari stoves, fuel use also ranged by a factor of ~4. The energy consumption per unit of food cooked for making tortillas for the Patsari was the lowest with 9 ± 1 MJ/kg, which is in a good agreement with the value reported by Berrueta et al. (2008), and went up to 30 ± 3 MJ/kg for frying eggs. There are no significant differences, in terms of energy consumed, for Patsari stove and U-type for boiled water, fried rice and fried beans tasks, while these differences were significant for tortilla making and for fried eggs. Cooking time for the Patsari stove varied by a factor of 3, ranging from 19 ± 6 min for frying eggs, to almost one hour (57 ± 8 min) to prepare fried rice.

Total PM_{2.5} and CO emissions for the U-type fire varied approximately 6-fold among cooking tasks ranging from 2.3 ± 0.5 g and 25 ± 5 g, respectively, for frying beans to 15 ± 3 g and 126 ± 36 g, respectively, for preparing rice. Total emissions for the Patsari stove were significantly smaller than the U-type for most of the tasks, ranging from 1.1 ± 0.4 g and 14 ± 5 g, respectively, for frying eggs, to 6 ± 1 g and 65 ± 14 g, respectively, for frying rice. CO and PM_{2.5} emission factors per kg of dry fuelwood for Patsari stove were also statistically different from those estimated for U-type for tortillas, fried eggs and fried rice (see Table 1).

Table 1
Comparative Performance and emissions parameters for Patsari and U-type stoves for individual cooking tasks measured with Controlled Cooking Tests.

Task	Stove	N	Fuelwood consumption	Energy consumed ^a	Cooking time	Total emissions		Emission factors ^b	
			g	MJ/kg	min	gCO	gPM _{2.5}	gCO/kg	gPM _{2.5} /kg
Tortillas	Patsari	6	1281 ± 139	9 ± 1	51 ± 6	60 ± 7	2.5 ± 0.5	47 ± 2	1.7 ± 0.3
	U-type	6	1829 ± 117	12 ± 1	45 ± 6	115 ± 33	4.4 ± 1.0	62 ± 14	3.0 ± 0.7
	<i>p</i> -value		< 0.01***	< 0.01***	0.13	0.01***	0.01***	0.05**	0.01***
Fried eggs	Patsari	6	438 ± 30	30 ± 3	19 ± 6	14 ± 5	1.1 ± 0.4	32 ± 11	0.8 ± 0.3
	U-type	6	872 ± 73	65 ± 12	21 ± 8	38 ± 14	2.9 ± 2.0	43 ± 16	2.0 ± 1.4
	<i>p</i> -value		< 0.01***	< 0.01***	0.62	0.02**	0.08*	< 0.01***	0.07*
Fried rice	Patsari	3	1626 ± 201	14 ± 1	57 ± 8	65 ± 14	6 ± 1	33 ± 14	4.4 ± 0.9
	U-type	3	2728 ± 480	19 ± 6	61 ± 14	126 ± 36	15 ± 3	53 ± 13	7.2 ± 4.6
	<i>p</i> -value		0.04**	0.04**	0.65	0.09*	0.08*	0.07*	0.08*
Fried beans	Patsari	3	688 ± 182	20 ± 7	28 ± 14	20 ± 18	2.2 ± 0.9	20 ± 20	0.8 ± 0.7
	U-type	3	750 ± 139	23 ± 7	21 ± 3	25 ± 5	2.3 ± 0.5	33 ± 6	3.0 ± 2.6
	<i>p</i> -value		0.67	0.64	0.03**	0.66	0.42	0.48	
Boil 1 L of water	Patsari	3	920 ± 173	16 ± 2	30 ± 9	33 ± 12	3.6 ± 1.2	35 ± 6	2.5 ± 0.8
	U-type	3	1092 ± 54	18 ± 1	24 ± 6	44 ± 3	5.0 ± 1.1	41 ± 1	3.4 ± 0.7
	<i>p</i> -value		0.22	0.21	0.06*	0.23	0.21	0.28	0.21

Notes: Values shown are averages ± standard deviation. Patsari stove values were tested against U-type using a t-distribution with *** $\alpha = 0.01$, ** $\alpha = 0.05$ and * $\alpha = 0.10$.

^a We use 20 MJ/kg and 28 MJ/kg as the heating value of wood and charcoal, respectively as reported by Berrueta et al. (2008) and Maserá et al. (2005).

^b CO and PM_{2.5} emission factors are expressed as gram of pollutant per kg of dry fuelwood.

Relative performance of Patsari stove against the U-type fire for Individual Tasks

Fig. 2 shows fuelwood, cooking time and emissions savings for Patsari stove relative to U-type for each individual meal. Significant savings in fuelwood consumptions of between 30% to 50% were obtained for fried eggs, fried rice, and for making tortillas. For CO total emissions, Patsari stove presented significant savings for tortillas, fried eggs and fried rice with 48% ($p = 0.01$, $\alpha = 0.01$), 63% ($p = 0.02$, $\alpha = 0.05$) and 48% ($p = 0.09$, $\alpha = 0.10$), respectively. For PM_{2.5} emissions, savings were observed to be significant for tortilla making ($p = 0.01$, $\alpha = 0.01$), fried eggs ($p = 0.08$, $\alpha = 0.10$) and fried rice ($p = 0.08$, $\alpha = 0.10$). There was not significant CO and PM_{2.5} emissions difference for Patsari and open fire for boiling water and fried beans. Although open fire seems to be faster, differences in terms of cooking time were not statistically significant (i.e. $p > 0.10$) for tortillas, fried eggs and fried rice between Patsari and U-type. Table A1 shows Patsari performance relative to U-type in terms of percentage reduction and *p*-values for all individual cooking tasks.

Percentage savings for Patsari stove were estimated: $\left[\frac{\text{parameter}(\text{open fire}) - \text{parameter}(\text{Patsari})}{\text{parameter}(\text{open fire})} \right] \times 100\%$ as reported by Adkins et al. (2010).

Energy and emissions performance for CBC

Table 2 shows performance parameters and emissions contribution for the Patsari and U-type for the CBC. Average emissions savings for Patsari stove reached 65% ($p \leq 0.01$, $\alpha = 0.01$) for both CO and PM_{2.5} relative to U-type. Average fuelwood savings for Patsari stove were 35% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$). No significant differences were observed for cooking time between Patsari stove and U-type (i.e. $p > 0.10$). The average modified combustion efficiency (MCE) for Patsari stove during CBC was $96 \pm 1\%$ which is statistically different ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$) from $92 \pm 1\%$ for the U-type. Emission factors, expressed in g carbon of pollutant per kg dry wood, for CO and PM_{2.5} for Patsari during CBC were 20 ± 3 g(c)CO/kg and 1.5 ± 0.9 g(c)PM_{2.5}/kg, respectively, which are comparable to those reported by Johnson et al. (2008) for a normal

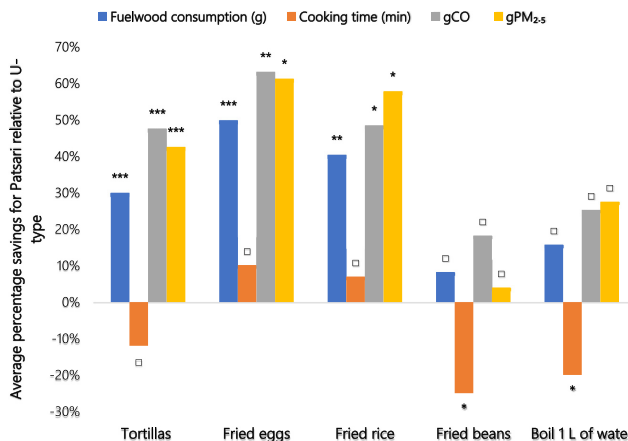


Fig. 2. Fuelwood, cooking time and emissions savings for Patsari stove relative to U-type. Notes: Bars marked with ***, ** and * indicate significant at 1%, 5% and 10% levels, respectively. □ means not significant (i.e. $p > 0.10$).

Table 2
Comparative performance and emissions metrics for Patsari and U-type for the CBC cooking cycle.

Task	Stove	N	Fuelwood consumption	Energy consumed	Cooking time	Total emissions		Emission factors		MCE
			g	MJ/kg		gCO	gPM _{2.5}	g(c)/CO/kg	g(c)/PM _{2.5} /kg	
CBC	Patsari	5	3066 ± 276	9 ± 1	110 ± 17	143 ± 34	9 ± 2	20 ± 3	1.5 ± 0.9	96 ± 1
	U-type	5	4718 ± 463	13 ± 1	103 ± 12	408 ± 82	26 ± 8	30 ± 5	5.5 ± 1.6	92 ± 1
p-value			< 0.01***	< 0.01***	0.52	< 0.01***	0.01***	0.01***	0.03**	< 0.01***

Notes: Values shown are averages ± standard deviation. Patsari stove was tested against U-type using a t-distribution with *** $\alpha = 0.01$ and ** $\alpha = 0.05$.

cooking day in a rural household. Fig. 3 shows the MCEs time dynamics for Patsari and U-type during the CBC. While Patsari stove shows MCEs higher or equal than 0.95 75% of the time, U-type exceeded 0.95 only 22% of the total cooking time. These results are comparable with a real burning cooking cycle reported by Johnson et al. (2010).

Cooking cycle relative to individual tasks sum for the Patsari stove

To understand the benefits of multi-pot cooking and of a smart sequencing of the different cooking tasks, Fig. 4 compares the relative performance of the Patsari stove when completing the CBC burning cycle vs the values resulting from conducting the individual tasks in series. Results showed average fuelwood and cooking time savings of 38% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$) and of 41% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$) for the CBC. In addition, total emissions savings for CO and PM_{2.5} of 30% ($p = 0.01$, $\alpha = 0.01$) and 44% ($p < 0.01$, $\alpha = 0.01$), respectively, were also obtained. Table A2 shows average values for fuelwood consumption, cooking time and CO and PM_{2.5} total emissions for this comparison.

Discussion

CCT for Individual Meals

Cooking tasks vary in terms of the time, energy, emissions and power needed to be completed using traditional open fires. The benefits from adopting Patsari stoves also differ by individual cooking tasks in terms of performance parameters and emissions contribution. In general, for tortilla making, fried eggs and fried rice the Patsari stove outperformed the U-type showing substantial energy and CO and PM_{2.5} emissions savings. The possible explanation in these cases is the effective use of the stove cooking power as reported by Jetter et al. (2012). Most of the PM_{2.5} emissions occur at start-up combustion process (MacCarty et al., 2008) which explains the relatively larger emission contribution of the short-time tasks compared to longer-time tasks. Overall, while the U-type was faster than Patsari stove, the differences in cooking

time were not statistically significant for tortillas, fried eggs and rice soup.

Cooking cycle

When the meals were cooked following local user's practices, i.e., making the most out of the main and secondary comales and of the sequencing of cooking tasks, significant fuelwood savings for Patsari stove relative to U-type were observed. These savings result from an improved overall heat transfer to the water and foods by cooking more than one dish at a time and by using the secondary comales to pre-heat some of the items. The Patsari had substantial emissions savings relative to the U-type fire, which result from a cleaner combustion and from burning less fuel (Medina et al., 2017). Results for the evolution of real-time MCE confirmed this statement, showing that the Patsari stove achieved 75% of the time a MCE higher or equal than 95% even though the cooking cycle is characterized by complex burn events as reported by Johnson et al. (2010). Not surprisingly real-time MCEs for the open fire were extremely irregular likely due to inconsistent combustion conditions (air-to-fuel ratio, mixing, temperature, residence time, etc.)

Also to be noted are the differences between the CBC and the conducting of individual tasks in series for the Patsari stove. This shows first, the benefits of multi-pot cooking, which allows making the most of the heat delivered by the stove in the main and secondary comales, and second, a wise integration of fast and slow tasks developed by local users, that optimizes fuel use. Finally, an additional interesting result from CBC tests is that the fuel savings obtained by Patsari stove relative to open fires (such as the U-type fire) are similar to the savings reported in the field using Kitchen Performance Tests (KPTs). For example, Miranda (2015) in a review of regional KPTs conducted before and after families adopted Patsari stoves found that they save approximately 40% fuelwood relative to open fires, a figure that is in good agreement with the average 35% savings for the CBC found in this study.

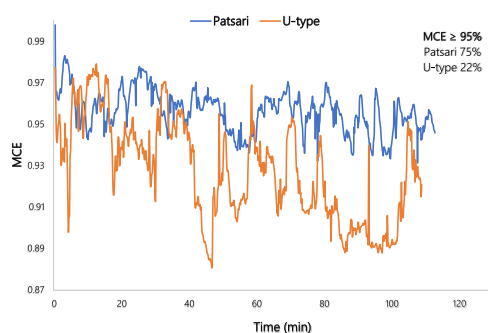


Fig. 3. Time evolution of MCE for Patsari stove and U-type for CBC. Note: MCEs averaged over 5 repeats for Patsari and U-type are shown.

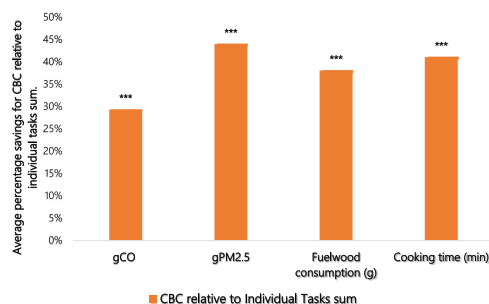


Fig. 4. Benefits of CBC vs the conducting of cooking tasks in series for the Patsari stove. Notes: Bars marked with *** were found to be significant at $\alpha = 0.01$. The sum of Individual tasks for Patsari stove was estimated: $\sum (\text{parameter}_{\text{tortillas}} + \text{parameter}_{\text{fried eggs}} + \text{parameter}_{\text{fried rice}} + \text{parameter}_{\text{fried beans}} + \text{parameter}_{\text{boil 1 L of water}})$.

Conclusions

The present study proposed a “controlled burning cycle” (CBC) test as a first step to the development of new standard lab tests that should better represent in-field stove performance for specific regional contexts.

Performing a series of CCT for a representative set of daily meals, we found that the relative advantages of Patsari stoves against traditional open fires differ by cooking task in terms of energy demand, cooking time and CO and PM_{2.5} emissions. Mimicking the cooking strategies followed by skilled Patsari users in the field by means of the CBC test, we found that simultaneous cooking of different dishes and the smart sequencing of cooking tasks help to virtually eliminate the disadvantages of Patsari stoves against the open fires. The CBC test also helped confirm that when operating Patsari stoves in cooking cycles very significant fuelwood, total CO and PM_{2.5} emissions and cooking time savings are achieved compared to conducting individual cooking tasks in series in the same stove. Finally, we found that fuelwood savings for Patsari plancha-type stoves during CBC were comparable with in-field measurements of Patsari stoves conducted previously in the same Region.

As no standard test currently tackles two of the main plancha stoves users’ perceived benefits, i.e., the ability to cook several dishes at a time with different power and time requirements, and the ability to use residual heat –thus saving time and fuel– through the smart sequencing of cooking tasks, we think that the CBC presented here is worth pursuing and holds promise for the development of lab tests that better inform about the likely in-field performance of multi-pot and plancha stoves at the regional level. The CBC could then be integrated into a portfolio of standard tests that, together with existing tests such as WBTs, CCTs and KPTs, could provide a more robust understanding of the stove lab and in-field performance.

Several challenges remain that need to be tackled for CBC to be adopted as standard protocol. On the one hand, in its present form, the CBC test is representative of a cooking cycle from the Purepecha Region of Central Mexico. Specific cooking cycles should be developed for other regions as, that accurately represent their diversity of dishes, techniques and practices. Also, the CBC has been performed so far only in the Patsari stove. It is important to test it in other plancha stoves that have also been widely disseminated in Mexico and Central America. Finally, more detailed information about the exact sequencing of dishes, the influence of different cooks in overall variability of results, and other factors should be gathered to convert the CBC into a truly standard protocol.

Acknowledgments

This research was supported by Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES), and Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Partial funding was obtained from the projects PAPIIT Project 101315 2016 and the Clúster de Biocombustibles Sólidos para la Generación Térmica y Eléctrica Secretaría de Energía, Fondo de Sustentabilidad Energética (SENER)-CONACYT No 246911. We would like to thank Laboratorio de Innovación y Evaluación en Estufas de Biomasa (LINEB) and Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Aplicada (GIRA) for their support in providing resources and the infrastructure for all CCTs.

We would also like to thank David Molmen, Juan Carlos Vázquez Tinoco, Juan Pablo Gutiérrez Llerenas, Doña Margarita, Doña María Concepción and all GIRA’s staff for their help during experimental tests. We also thank René Martínez for the technical support at the Bioenergy Laboratory of the IIES, UNAM.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2017.08.009>.

References

- Adkins E, Tyler E, Wang J, Siriri D, Modi V. Field testing and survey evaluation of household biomass cookstoves in rural sub-Saharan Africa. *Energy Sustain Dev* 2010;14:172–85.
- Arora P, Jain S. Estimation of Organic and Elemental Carbon Emitted from Wood Burning in Traditional and Improved Cookstoves Using Controlled Cooking Test. *Environ Sci Technol* 2015;49:3958–65.
- Bailis R, Berrueta V, Chengappa C, Dutta K, Edwards R, Masera O, et al. Performance testing for monitoring improved biomass stove interventions: experiences of the Household Energy and Health project. *Energy Sustain Dev* 2007;12(2):57–70.
- Berrueta V, Edwards R, Masera OR. Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico. *Renew Energy* 2008;33(5):859–70.
- Beyene A, Bluffstone R, Gebreegziabher Z, Martinsson P, Mekonnen A, Vieider F. Do Improved Biomass Cookstoves Reduce Fuelwood Consumption and Carbon Emissions? Evidence from Rural Ethiopia Using a Randomized Treatment Trial with Electronic Monitoring. Policy Research Working Paper 7324 2015 <http://econ.worldbank.org>.
- Controlled Cooking Test (CCT) Version 2.0 Available from: Partnership for Clean Indoor Air. http://www.pciaonline.org/files/CCT_Version_2.0_0.pdf (accessed 2015 August).
- I Seminario Taller Latinoamericano de Cocinas/Estufas Limpias. Promoviendo la Adopción y Uso Sostenible en Gran Escala. Peru: Lima; 2014.
- ISO TC 285. Clean Cookstoves and Clean cooking Solutions – Harmonized Laboratory Protocols – Part 1. Standard Test Sequence for Emissions and Performance, Safety and Durability; 2015.
- Jetter JJ, Karher P. Solid-fuel household cook stoves: Characterization of performance and emissions. *Biomass Bioenergy* 2009;33:294–305.
- Jetter J, Zhao Y, Smith KR, Khan B, Yelverton T, DeCarlo P, et al. Pollutant Emissions and Energy Efficiency under Controlled Conditions for Household Biomass Cookstoves and Implications for Metrics Useful in Setting International Test Standards. *Environ Sci Technol* 2012;46:10827–34.
- Johnson M, Edwards R, Alatorre Frenk C, Masera OR. In-field greenhouse gas emissions from cookstoves in rural Mexican households. *Atmos Environ* 2008;42:1206–22.
- Johnson M, Edwards R, Ghilardi A, Berrueta V, Gillen D, Alatorre Frenk C, et al. Quantification of Carbon Savings from Improved Biomass Cookstove Projects. *Environ Sci Technol* 2009;43:2456–62.
- Johnson M, Edwards R, Berrueta V, Masera O. New approaches to performance testing of improved cookstoves. *Environ Sci Technol* 2010;44(1):368–74.
- Li C, Kang S, Chen P, Zhang Q, Fang GC. Characterizations of particle-bound trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) within Tibetan tents of south Tibetan Plateau. *China Environ Sci Pollut R* 2012;19(5):1620–8.
- L’Orange C, DeFoort M, Willson B. Influence of testing parameters on biomass stove performance and development of an improved testing protocol. *Energy Sustain Dev* 2012;16:3–12.
- MacCarty N, Still D, Ogle D, Drouin T. Assessing Cook Stove Performance: Field and Lab Studies of Three Rocket Stoves Comparing the Open Fire and Traditional Stoves in Tamil Nadu, India on Measures of Time to Cook, Fuel Use, Total Emissions, and Indoor Air Pollution. Aprovecho Research Center 2008.
- Masera OR, Navia J. Fuel switching or multiple cooking fuels? Understanding inter-fuel substitution patterns in rural Mexican households. *Biomass Bioenergy* 1997;12(5):347–61.
- Masera O, Diaz R, Berrueta VM. From cookstoves to cooking systems: the integrated program on sustainable household energy use in Mexico. *Energy Sustain Dev* 2005;9(1):25–36.
- Masera O, Edwards R, Armendáriz Arnez C, Berrueta V, Johnson M, Rojas Bracho L, et al. Impact of Patsari improved cookstoves on indoor air quality in Michoacán, Mexico. *Energy Sustain Dev* 2007;11(2):45–56.
- Medina P, Berrueta V, Martínez M, Ruiz V, Edwards RD, Masera O. Influence of laboratory test on performance of plancha-type stoves in Mexico. *Dev Eng* 2017;2:20–8.
- Miranda MA. Impactos socio-ambientales del proceso de adopción de estufas eficientes de leña en el México Rural. [MSc thesis] Biological Sciences Masters. Mexico: National Autonomous University of Mexico (UNAM); 2015.
- Pennise D, Charron D, Wofchuck T, Rouse J, Hunt A. Evaluation of Manufactured Wood-Burning Stoves in Dadaab Refugee Camps, Kenya. Berkeley Air Monitoring Group; 2010.
- Prapas J, Baumgardner ME, Marchese AJ, Willson B, DeFoort M. Influence of chimneys on combustion characteristics of buoyantly driven biomass stoves. *Energy Sustain Dev* 2014;23:286–93.
- Roden CA, Bond TC, Conway S, Benjamin A, Pinel O. Emission factors and real-time optical properties of particles emitted from traditional wood burning cookstoves. *Environ Sci Technol* 2006;40:6750–7.
- Roden CA, Bond TC, Conway S, Pinel O, MacCarty N, Still D. Laboratory and field investigations of particulate and carbon monoxide emissions from traditional and improved cookstoves. *Atmos Environ* 2009;43:1170–81.
- Ruiz-Mercado I, Masera O. Patterns of Stove Use in the Context of Fuel–Device Stacking: Rationale and Implications. *Ecohealth* 2015;12(1):42–56.
- Rumchev K, Spickett JT, Brown HL, Mkhwebi B. Indoor air pollution from biomass combustion and respiratory symptoms of women and children in a Zimbabwean village. *Indoor Air* 2007;17(6):468–74.
- Smith KR, Jerrett M, Anderson HR, Burnett RT, Stone V, Derwent R, et al. Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: health implications of short-lived greenhouse pollutants. *Lancet* 2010;374(9707):2091–103.
- Tsai SM, Zhang J, Smith KR, Ma Y, Rasmussen RA, Khalil MAK. Characterization of non-methane hydrocarbons emitted from various cookstoves used in China. *Environ Sci Technol* 2003;37:2869–77.