



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO  
EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Evaluación energética del  
desempeño de dispositivos para la  
cocción con leña**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**DOCTOR EN INGENIERÍA  
(ENERGÍA)**

P R E S E N T A

**M. EN C. VÍCTOR MANUEL BERRUETA SORIANO**

TUTOR

**DR. OMAR RAÚL MASERA CERUTTI**

2007



**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Dr. José Luis Fernández Zayas

**Secretario:** Dr. Omar Raúl Masera Cerutti

**Vocal:** Dr. Jorge Marcial Islas Samperio

**1er. Suplente:** Dr. Javier Eduardo Aguillón Martínez

**2do. Suplente:** Dr. Fabio Manzini Poli

**Lugar donde se realizó la tesis:**

**Pátzcuaro, Michoacán**

**TUTOR DE TESIS:**

**DR. OMAR RAÚL MASERA CERUTTI**



---

**FIRMA**

A Ana, mi esposa, por su cariño y apoyo incondicional, por su tiempo, paciencia y sacrificios, por compartir el sueño de vivir en favor de los que menos tienen.

A Diego, Andrea y Pablo, por ser nuestra alegría, por darnos motivos para seguir preparándonos, por mostrarnos que cada día hay algo nuevo que aprender.

A ellos, indígenas y campesinos, hombres, mujeres y niños de las comunidades rurales que en su pobreza nos enseñan la alegría de vivir, de compartir y de luchar. A ellos porque tienen derecho a condiciones dignas para vivir.

*“...Te quiero en mi paraíso;  
es decir, que en mi país  
la gente vive feliz  
aunque no tenga permiso.*

*Si te quiero es porque sos  
mi amor, mi cómplice y todo.  
Y en la calle codo a codo  
somos mucho más que dos.”*

**Mario Benedetti**

## Agradecimientos

Bajo el riesgo de omitir a alguien, agradezco sinceramente al equipo de trabajo de GIRA, A.C., a Rubén, Ramiro, Félix, Evaristo y Minerva, quienes participaron en todo el proceso de este trabajo ya que sin ellos hubiera sido muy difícil concretarlo.

Agradezco también a mis colegas y amigos con quienes compartí la aventura de los estudios de monitoreo del Proyecto *Patsari*: Ana, Cynthia, Tere, Horacio, Rufus, Michael, por todo lo que aprendimos juntos. De manera especial a Rodolfo, por la oportunidad de integrarme al proyecto, por todo lo que vivimos, aprendimos y compartimos.

Al Centro de Investigaciones en Ecosistemas-UNAM (CIEco) especialmente al Laboratorio de Bioenergía, a René, Gaby, Adrián, por el apoyo y las facilidades brindadas, pero sobre todo por la amistad.

Al Posgrado en Ingeniería por permitirme la oportunidad de continuar mis estudios y preparación, en especial al Dr. José Luis Fernández Zayas y al Dr. Javier Aguillón del Instituto de Ingeniería por acompañarme en este proceso. Al Dr. Jorge Islas y al Dr. Fabio Manzini del Centro de Investigación en Energía por sus comentarios y observaciones.

A CONACYT, al PAPIIT y a la Fundación Shell por el apoyo económico con el cual fue posible realizar esta investigación.

A mis padres por el apoyo incondicional, por su cariño, por inculcarme las ganas de seguir aprendiendo. Gracias por darme las alas y enseñarme a volar, pero sobre todo, por seguir creyendo en mí.

Y de manera especial, al Dr. Omar Masera. Gracias Omar por haber sido mi Tutor, gracias por el tiempo, la dedicación y la paciencia, gracias por la oportunidad de participar en este gran proyecto, pero sobre todo, gracias por la amistad.

# ÍNDICE GENERAL

Índice General .....	5
Índice de Tablas y Figuras .....	6
Resumen .....	7
Introducción .....	8
<b>1. Energía Rural, Biomasa y Estufas de Leña .....</b>	<b>13</b>
1.1. Energía rural y el consumo de leña en México y en el mundo .....	13
1.1.1. Consumo de leña en el sector rural .....	
1.1.2. Patrones de consumo de leña en México .....	
1.1.3. Tendencias .....	
1.2. Desarrollo e innovación de tecnología rural .....	18
1.3. La biomasa como combustible. Características energéticas de la leña .....	20
1.3.1. Características físicas .....	
1.3.2. Características químicas .....	
1.3.3. Características físico-químicas .....	
1.3.4. Proceso de combustión de la leña .....	
<b>2. Tecnologías para cocción con leña y métodos de evaluación .....</b>	<b>27</b>
2.1. Principales tipos de tecnologías .....	27
2.2. Experiencias en México y en el mundo .....	29
2.3. Eficiencia y metodologías para la evaluación de estufas de leña .....	32
2.4. Principios de diseño de estufas .....	36
2.5. Retos y oportunidades en el diseño y evaluación de estufas eficientes .....	38
<b>3. Estudio de caso: Proyecto Patsari, Michoacán .....</b>	<b>40</b>
3.1. Descripción de la zona de estudio .....	40
3.2. Proyecto Patsari, un enfoque “sistémico” e integral .....	41
3.3. Integración de estudios de investigación al Proyecto Patsari .....	44
<b>4. Evaluación de la tecnología. Caso de estudio .....</b>	<b>46</b>
4.1. Evaluación del desempeño energético de estufas eficientes de leña .....	46
4.1.1. Objetivos .....	
4.1.2. Metodología .....	
4.1.3. Resultados .....	
4.1.4. Discusión y conclusiones .....	
4.2. Discusión y comentarios relacionados a los Protocolos Estándares de evaluación .....	50
4.3. “Energy performance of woodburning cookstoves in Michoacan, Mexico” (Berrueta, et al., 2007) .....	52
<b>5. Propuesta de diseño de una estufa eficiente de leña .....</b>	<b>64</b>
5.1. Síntesis de la evaluación de la Estufa Patsari .....	64
5.2. Propuesta de diseño .....	66
5.3. Evaluación del modelo Patsari Jimbani (“La nueva Patsari”) .....	71
5.3.1. Eficiencia térmica y funcionamiento .....	
5.3.2. Comparación del desempeño de la Estufa Patsari vs Patsari Jimbani .....	
5.3.3. Eficiencia nominal de combustión .....	
5.3.4. Adaptabilidad, adoptabilidad (aceptación y percepciones de las usuarias) .....	
5.4. Impactos del nuevo modelo en el proceso de difusión .....	76
<b>Conclusiones .....</b>	<b>77</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>79</b>
1. Stove Performance Testing Protocol .....	
2. Masera O, R Díaz and V Berrueta. “From cookstoves to cooking system: the integrated program on sustainable household energy use in Mexico”. Energy for Sustainable Development, 9:1, pp 25-36 (2005) .....	
3. Masera O, E Edwards, C Armendariz, V Berrueta, L Bracho, H Riojas and K Smith. “Impact of “Patsari” improved cookstoves on Indoor Air Quality in Michoacan, Mexico”. Energy for Sustainable Development 11:2, pp 45-56 (2007) .....	
4. Bailis R, V Berrueta, Ch Chengappa, K Dutt, R Edwards, O Masera, D Still and K Smith. “Performance Testing as a Tool to Monitor Improved Stove Interventions: Experiences of the Shell Foundation’s Household Energy and Health Project” Energy for Sustainable Development, 11:2 pp 57-70 (2007) .....	
5. Formatos y cuestionarios .....	
6. Información técnica de la estufa Patsari Jimbani .....	
<b>Referencias .....</b>	<b>137</b>

## ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1. Modelo simplificado de la combustión de la leña .....	24
Tabla 2. Factor de corrección para Adulto Estándar .....	36
Tabla 3. Fortalezas y Debilidades de la estufa <i>Patsari</i> .....	64
Tabla 4. Comparativo de los resultados de la PEA .....	71
Tabla 5. Prueba de Cocinado Controlado para tortillas .....	72
Figura 1. Consumo final de energía en el sector residencial (1965-2003) .....	15
Figura 2. Evolución del consumo de leña por tipo de usuario PJ/año (1960-2000) .....	18
Figura 3. Valor calorífico en función de la humedad relativa .....	21
Figura 4. Componentes en la combustión de la madera .....	25
Figura 5. Estufas difundidas en Latinoamérica .....	30
Figura 6. Ahorro promedio en la región del Lago de Pátzcuaro por el uso de la estufa Lorena .....	31
Figura 7. Esquema general de una estufa de leña mejorada .....	36
Figura 8. Localización de la Región Purhépecha, Michoacán .....	40
Figura 9. Estufa <i>Patsari</i> .....	41
Figura 10. Diagrama conceptual de la integración del Proyecto <i>Patsari</i> .....	44
Figura 11. Árbol de problemas y soluciones .....	66
Figura 12. Nuevo modelo de Estufa Eficiente: <i>Patsari Jimbani</i> .....	67
Figura 13. Nuevo modelo de Estufa Eficiente: <i>Patsari Jimbani</i> .....	68
Figura 14. Distribución de temperatura en el comal principal de estufas <i>Patsari</i> .....	68
Figura 15. Dimensiones internas de las estufas <i>Patsari</i> .....	69
Figura 16. Proceso de construcción del nuevo modelo de estufa <i>Patsari Jimbani</i> .....	69
Figura 17. Vista interna de la estufa <i>Patsari Jimbani</i> .....	70
Figura 18. Detalle de la modificación realizada al comal principal .....	70
Figura 19. Comparativo de temperaturas en el centro del comal principal .....	72
Figura 20. Distribución de temperatura en comal principal a 50 min de operación .....	72
Figura 21. Eficiencia nominal de combustión para cada estufa .....	73
Figura 22. Adopción de la estufa <i>Patsari</i> de barro vs <i>Patsari Jimbani</i> .....	74

# RESUMEN

Cerca de 2 mil millones de personas en el mundo dependen de la biomasa para cocinar o calentarse. En México, este combustible es usado por más de 27 millones de habitantes tanto del sector rural como urbano; la mayor parte de la población rural usa la leña como principal combustible para la cocción de sus alimentos.

Existen diversos problemas asociados al uso tradicional de la leña, tales como los riesgos a la salud, la contaminación al interior de los hogares, los impactos al ambiente local y global, entre otros. La mayoría de los hogares rurales utilizan el denominado fogón tradicional de “tres piedras”. La baja eficiencia de estos dispositivos es uno de los mayores problemas que enfrentan los usuarios. Desde hace muchos años se han realizado numerosos esfuerzos por mejorar el diseño de las estufas, lograr una mejor combustión, reducir la cantidad de humo y el consumo de combustible y hacer más eficiente la transferencia de calor; sin embargo, el problema aún persiste.

Por tal razón se reconoce que el desarrollo tecnológico de estufas eficientes de leña es un proceso complejo que comprende aspectos sociales, culturales, económicos y tecnológicos. El presente trabajo tuvo como objetivo el desarrollo y validación de un método de evaluación del desempeño de dispositivos para la cocción con leña haciendo énfasis en los aspectos energéticos, con la finalidad de derivar aspectos de diseño para la innovación, desarrollo y difusión de este tipo de tecnología.

Mediante una evaluación integral de la estufa eficiente de leña *Patsari*, que contempló el análisis de su funcionamiento en diferentes dimensiones, la integración de resultados de estudios paralelos y tomando como punto de partida que los procesos de innovación tecnológica son dinámicos, se experimentaron cambios en el diseño original de la estufa y se probó, con excelentes resultados, un modelo mejorado, la estufa *Patsari Jimbani*.

En promedio, la estufa *Patsari* proporciona ahorros del orden del 67% (37 MJ/cáp/día) para usuarios exclusivos de leña, y del 66% (28 MJ/cáp/día) para usuarios que combinan el uso de leña y gas LP, éstos últimos utilizan el gas LP únicamente para cubrir el 12% de sus necesidades energéticas de cocción de alimentos y en algunos casos lo abandonan al utilizar la estufa *Patsari*.

Los beneficios que la estufa *Patsari* brinda con respecto a los fogones tradicionales, demuestran que una estufa eficiente bien diseñada, bajo un enfoque integral de seguimiento, evaluación y monitoreo, es una buena alternativa para promover el uso sustentable de la leña.

# INTRODUCCIÓN

La energía residencial y el uso de estufas eficientes de leña están nuevamente abriendo camino en la agenda internacional, impulsados ahora por diversos intereses entre los que destacan aspectos locales como el ambiente, aspectos socioculturales y particularmente la salud de las familias, además de cuestiones globales vinculadas a las emisiones de gases de efecto invernadero. Para enfrentar estos retos, los programas de estufas eficientes están pasando de ser proyectos orientados a la construcción o venta de estufas hacia un enfoque “sistémico” e integral. Este enfoque contempla un importante componente de desarrollo y evaluación dirigido a conocer y mejorar los dispositivos para el aprovechamiento de la energía procedente de la biomasa en el México rural.

En lo que a energía rural se refiere, la fuente principal en el sector doméstico es la biomasa, la cual se emplea básicamente para cocción de alimentos, calentamiento de agua, acondicionamiento de espacios y en pequeñas industrias (panaderías, alfarerías, tortillerías, ladrilleras, destilerías, etc.). Resultados preliminares del Sistema de Información de la Energía Forestal (Wood Energy Information System, WEIS), obtenidos por Horta y Trossero (1998), muestran que la leña representa el 7% de la energía primaria consumida, de la cual el 76% se usa en los países en vías de desarrollo y el resto en los desarrollados; en conjunto la biomasa contribuye con aproximadamente el 14% de la energía primaria, considerando todos los biocombustibles, donde la leña representa el 50% de la biomasa total demandada para energía.

## Antecedentes y justificación

Cerca de 2 mil millones de personas en el mundo dependen de la biomasa para cocinar o calentarse. En México, el consumo de leña representa el 10% de la energía primaria y aporta alrededor del 46% de la energía demandada por el sector residencial (SENER, 2002; Díaz-Jiménez, 2000; Masera, 1993). Este combustible es usado por más de 27 millones de habitantes tanto del sector rural como urbano. El 89% de la población rural usa la leña como principal combustible para la cocción de sus alimentos, mientras que en las zonas urbanas los usuarios de leña representan el 11% de la población urbana (Díaz-Jiménez, 2000).

Por otro lado, los daños que el uso de biocombustibles puede ocasionar a la salud de las personas están comenzándose a documentar en estudios internacionales. El humo generado por la combustión abierta afecta principalmente a mujeres y niños, desarrollando principalmente infecciones respiratorias agudas, que en niños menores de 5 años ocasionan cerca de 1.2 millones de muertes prematuras anualmente (Smith, 2003; Smith y Mehta, 2003).

Sin embargo, en las zonas rurales más del 80% de los hogares utilizan aún el denominado fogón tradicional de “tres piedras” (Masera, 1993). La baja eficiencia de los fogones tradicionales es uno de los mayores problemas que enfrentan los usuarios de leña. En las últimas tres décadas se han desarrollado a nivel mundial una gran variedad de opciones tecnológicas para mejorar la eficiencia de la cocción con leña (Dutt et al., 1989; Masera et al., 1997; Still, 2007). Se han realizado numerosos intentos por mejorar el diseño de las estufas, lograr una mejor combustión, reducir la cantidad de humo y el consumo de combustible y hacer más eficiente la transferencia de calor.

El diseño de una estufa eficiente de leña no es sencillo. Los procesos de combustión y de transferencia de calor son muy complejos. En la estufa ocurren fenómenos de transporte de masa y energía, transferencia de calor por convección, conducción y radiación, así como reacciones químicas; todos estos procesos son irreversibles y fuera de equilibrio (Baldwin, 1986).

Actualmente el Centro de Investigaciones en Ecosistemas de la UNAM<sup>1</sup> en coordinación con el Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropriada, A. C. (GIRA)<sup>2</sup> llevan a cabo, desde el año 2003, un

---

<sup>1</sup> [www.oikos.unam.mx](http://www.oikos.unam.mx)

<sup>2</sup> [www.gira.org.mx](http://www.gira.org.mx)

programa multi-institucional denominado "Proyecto Patsari", que tiene como objetivo el desarrollo, difusión y evaluación de la estufa Patsari, (Masera, et al., 2005). Este esfuerzo cuenta con la colaboración de diversas instituciones y centros de investigación como lo son: la Universidad de California, Irvine, el Instituto de Ingeniería, UNAM, el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) y el Instituto Nacional de Ecología (INE). El proyecto está anclado en el estado de Michoacán y está integrado por cuatro componentes principales: a) *desarrollo e innovación de tecnología*; b) *diseminación de estufas eficientes*; c) *seguimiento, evaluación y monitoreo*; d) *fortalecimiento del programa*.

El Proyecto Patsari pretende evaluar, por primera vez y de manera integral, el uso de estufas eficiente de leña y sus impactos en la salud, en el ambiente y en la calidad de vida de las personas, para lo cual la evaluación y mejoramiento de la tecnología constituyen parte fundamental. El proyecto se desarrolla en el marco del programa denominado "*Mejoramiento del nivel de vida de los hogares rurales, mediante el uso sustentable de la leña*", con énfasis en la región Purhépecha del Estado de Michoacán.

Para lograr la evaluación integral se realizaron de manera simultánea 5 estudios de investigación para documentar los impactos relacionados con el uso de estufas eficientes de leña: Impactos en la salud (Riojas, et al., 2006); Contaminación intramuros (Zuk, et al., 2006; Masera, et al., 2007; Armendáriz, et al., 2007); Emisiones y gases de efecto invernadero (Johnson, et al., 2007); Percepciones y calidad de vida (Troncoso et al., 2006; Magallanes, 2007) y; Eficiencia y funcionamiento (Berrueta, et al., 2007; Bailis, et al., 2007).

Los efectos de estos procesos de aprendizaje se han observado, estudiado y medido, desde hace décadas en la mayoría de las industrias con excelentes resultados, sin embargo, en el ámbito rural estos procesos de aprendizaje no han sido documentados y mucho menos llevados al proceso de innovación de tecnología, se cree, equivocadamente, que por tratarse de tecnología dirigida a campesinos poco o nada es lo que pueden aportar al desarrollo tecnológico.

Este trabajo, además de contribuir a la evaluación integral del modelo de estufa que se ha implementado en el Proyecto Patsari, establece lineamientos de diseño, basados en el proceso de aprendizaje del proyecto mismo, adaptados a las condiciones del México rural que permitirán el mejoramiento tecnológico y la superación de las dificultades encontradas en el modelo de tecnología que se ha implementado.

Estos lineamientos, en conjunto con los resultados de la aplicación de pruebas de laboratorio y de campo y los resultados de estudios de investigación paralelos sobre emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación intramuros y percepciones y preferencias de las usuarias, permitirán determinar los aspectos relacionados al desempeño del dispositivo para derivar criterios de diseño y funcionamiento que integren las tres dimensiones establecidas para el análisis del desempeño de las estufas.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

El presente trabajo, como parte de los estudios de investigación mencionados, tiene como objetivo el desarrollo y validación de un método de evaluación del desempeño de dispositivos para la cocción con leña haciendo énfasis en los aspectos energéticos, con la finalidad de derivar aspectos de diseño para la innovación y el desarrollo de este tipo de tecnología.

## Objetivos particulares

- Evaluar, desde el punto de vista energético, el desempeño de fogones tradicionales y estufas eficientes de leña para determinar los parámetros básicos de funcionamiento.
- Integrar los resultados de los diferentes estudios de monitoreo así como otros aspectos críticos para el funcionamiento y adopción de las estufas para determinar aspectos de diseño cada vez más adecuados.
- Experimentar cambios en el diseño de la tecnología que derivan en la fabricación de prototipos de una nueva estufa eficientes de leña.

## Metodología

La metodología utilizada para evaluar la eficiencia y el funcionamiento de las estufas parte de un análisis integral que contempla tres dimensiones relacionadas entre sí: a) *la estufa y su funcionamiento como dispositivo aislado* (eficiencia térmica, de combustión); b) *la estufa y su efectividad para realizar las principales tareas de cocinado* (consumo de combustible, comportamiento en condiciones controladas), y c) *la estufa y su comportamiento en condiciones reales de operación* (ahorros de combustible y de energía destinada para la cocción de alimentos por una familia rural).

La evaluación de las tecnologías se realizará con base en la aplicación de tres pruebas estándar incluidas en protocolos internacionales específicos para este tipo de dispositivos: Prueba de Ebullición de Agua (PEA o WBT, Water Boiling Test), Prueba de Cocinado Controlado (PCC o CCT, Controlled Cooking Test) y Prueba de Funcionamiento en Cocina (PFC o KPT, Kitchen Performance Test).

Se llevará a cabo una revisión de los principios termodinámicos, de funcionamiento y de diseño de una estufa de leña, de las principales experiencias internacionales de desarrollo y evaluación de este tipo de tecnología y del concepto de "eficiencia" y las metodologías utilizadas para evaluarla. Estos principios, en conjunto con los resultados de la aplicación de las pruebas del objetivo anterior y los resultados de estudios de investigación paralelos sobre emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación intramuros y percepciones y preferencias de las usuarias, permitirán determinar los parámetros energéticos relacionados al desempeño del dispositivo para derivar criterios de diseño y funcionamiento que integren las tres dimensiones establecidas para el análisis del desempeño de las estufas.

Mediante la definición de criterios mínimos necesarios para el diseño, la determinación de los aspectos energéticos más importantes y el conocimiento de las necesidades y preferencias de los usuarios se diseñará y evaluará un prototipo de estufa eficiente de leña.

## Marco teórico conceptual

La tecnología siempre ha estado influenciada por componentes sociales, ya sea que se trate de intereses políticos, económicos, intereses de los consumidores o usuarios, aspectos de mercadotecnia o de cualquier otro tipo. Por tanto, se dice que la tecnología está construida socialmente en cuanto a que la forma final de ésta se determina en gran medida por aspectos sociales (Pinch, 1997). De hecho en el proceso de desarrollo de un dispositivo éste va tomando ciertos significados permeados por la cultura local y las relaciones con el entorno, de tal forma que de una cultura a otra, un mismo dispositivo tecnológico puede tener significados distintos.

De acuerdo con Mackay (1997) el análisis cultural de la tecnología nos permite entender algunos aspectos y fenómenos que suceden en la sociedad, específicamente la importancia de una tecnología no sólo está en el objetivo de para el cual fue diseñada, sino también en los usos que las personas hagan de ella, "la tecnología lleva una doble vida: una que cumple con los propósitos de los diseñadores, y otra que funciona sus espaldas, con consecuencias no intencionales y posibilidades anticipadas" (Noble, 1984 citado por Mackay, 1997). Los dispositivos son pues, símbolos culturales,

son transmisores de significados, es necesario tomar esta perspectiva cultural para intentar entender el desarrollo tecnológico desde el punto de vista social, es decir en el que la sociedad participa de los cambios e innovaciones.

Una de las razones por las que una innovación tecnológica puede llegar a ser adoptada es porque la tecnología se hace parte tanto de la cultura como de los comportamientos y hábitos. En este sentido, cuando en el proceso de desarrollo tecnológico se cuenta con la participación de los usuarios en sus diferentes etapas, la posibilidad de éxito aumenta ya que existe una influencia entre el usuario y el dispositivo final. De tal modo que el cambio tecnológico es un proceso de cambio social, que transforma las necesidades, donde la sociedad y el cambio tecnológico se modelan mutuamente (Limón y Berrueta, 2005)

La Construcción Social de la Tecnología (COST) se basa en la premisa de que todas las innovaciones tecnológicas son en gran medida el resultado de las interacciones entre diversos actores sociales, como el efecto neutral de la evolución de la ciencia. Hay destacados elementos sociales que modifican la forma en que las tecnologías son construidas, como intereses y grupos sociales relevantes, sin embargo, desde sus inicios la COST se ha centrado en la etapa de diseño de la tecnología, y es necesario ampliarla para incluir la etapa de uso y adaptación de la tecnología (Pinch, 1997). De esta manera la COST y otros planteamientos podrán obtener una mejor comprensión sobre cómo ocurre el cambio tecnológico; cómo en diferentes grupos sociales se dan los procesos de adopción y apropiación de la tecnología; cómo se pueden lograr innovaciones que redunden en procesos de éxito tecnológico.

Con relación al tema de las estufas eficientes para el medio rural, a nivel nacional existe una clara preocupación por la problemática relacionada al uso de la leña en el sector residencial, sin embargo hace falta mucho para que los esfuerzos de implementar tecnologías eficientes sean exitosas en cuanto a la adopción y permanencia de las tecnologías. Normalmente los esfuerzos se enfocan a instalar o construir estufas y no se genera un proceso de evaluación integral que incluya la tecnología, el proceso y los impactos. Por esta razón, un enfoque basado en aspectos sociales y técnicos puede aportar elementos importantes para los procesos de promoción y difusión.

Desarrollar tecnología eficiente para el medio rural representa un gran reto, se requiere de un enfoque integrado, participativo y dinámico donde el conocimiento generado de manera colectiva redunde en la mejora del proceso de transferencia y adopción, sólo así se avanzará hacia un modelo de generación y desarrollo "sustentable".

## **Hipótesis**

El desarrollo y la evaluación de una tecnología en el ámbito rural no es un proceso lineal, sino un proceso interactivo y de constante retroalimentación que debe analizarse desde diferentes perspectivas. Dado que el desarrollo tecnológico no se debe a un sólo factor o a una causa, si no a un complejo proceso de aprendizaje social, se realizará un proceso de evaluación y rediseño con la experiencia del usuario y del promotor de la tecnología para lograr una mejora tecnológica de manera efectiva.

## **Contenidos de la Tesis**

El Capítulo 1 presenta una revisión general de la situación de la energía rural y el uso de la biomasa como combustible, se analizan los patrones de consumo de leña en México y en mundo y se presentan las características energéticas que hacen de la leña un combustible tan utilizado en el medio rural.

En el Capítulo 2 se da cuenta de las principales tecnologías para cocción con leña, se presentan las principales experiencias internacionales y nacionales en la implementación de programas de estufas eficientes así como los métodos de evaluación empleados. Se discute el concepto de "eficiencia" y las

metodologías utilizadas para evaluarla. Además se presentan los principios de diseño y funcionamiento de las estufas eficientes de leña que dan origen al desarrollo de nuevos modelos.

El Capítulo 3 describe el contexto en el que se desarrolla el estudio de caso del presente trabajo. Se centra en el Proyecto *Patsari*. Se muestran los componentes de dicho proyecto y su enfoque integral, también se muestra cómo los estudios de investigación como la presente tesis se integran en el proyecto apoyando el proceso de innovación, difusión y evaluación de la tecnología. Para ambos aspectos, en los Anexos 2 y 3 se presentan dos artículos internacionales que han sido publicados y que forman parte de la presente tesis.

En el Capítulo 4 se presenta la evaluación energética del desempeño de la tecnología para el caso de estudio, se muestran los resultados de la evaluación realizada en torno la eficiencia y el funcionamiento de las estufas de leña. Al final del capítulo se encuentra un artículo que ha sido publicado en una revista internacional indizada y que forma parte fundamental de este trabajo. Además se presenta algunos puntos de importancia relacionadas con las metodologías utilizadas internacionalmente para la evaluación de estos dispositivos así como los aspectos necesarios para realizar una evaluación completa e integral. De esto ultimo da cuenta el artículo internacional que se presenta en el Anexo 4, el cual complementa el proyecto de investigación doctoral.

Finalmente, el Capítulo 5 presenta el desarrollo de un modelo modificado de estufa eficiente de leña. Esta nueva estufa, llamada *Patsari Jimbani* (la “nueva Patsari”) supera los principales inconvenientes y las dificultades encontradas en el modelo de estufa difundido por el proyecto Patsari manteniendo los beneficios y ventajas documentados y reconocidos por las usuarias.

# CAPÍTULO 1

## ENERGÍA RURAL, BIOMASA Y ESTUFAS DE LEÑA

### 1.1 Energía rural y el consumo de leña en México y en el mundo

La leña, por su importancia económica, social y ambiental, constituye la principal fuente de energía del sector doméstico rural (Maser, 1993, 1995 y 1997). Se ha estimado que el consumo de leña en el país se encuentra entre los 320 y los 365 PJ/año y representa entre el 8% y el 10% del consumo nacional de energía final, y entre el 36% y el 45% de la energía consumida en el sector residencial; el 93% de leña es requerido por el sector doméstico y el resto por las pequeñas industrias (tabiquerías, hornos de cerámica, panaderías, destilerías, tortillerías, entre otras) (SENER, 2002; Díaz-Jiménez, 2000; Maser, 1993). En el ámbito familiar el consumo promedio es de 2 kg/cáp/día, equivalente a 60 GJ/año para una familia de seis personas. A escala mundial representa el 50% de la biomasa total demandada para energía (Trossero, 2002).

En México, se estima que 27 millones de personas, que corresponden a 89% de los hogares rurales y 11% de los urbanos, utilizan la leña como combustible; de los cuales, 17.5 millones de personas tienen a la leña como único energético para la cocción de alimentos (Díaz-Jiménez, 2000). La cocción de alimentos es el uso que representa la mayor parte del consumo de leña. Los requerimientos energéticos típicos para la cocción alcanzan 24 MJ/cáp/día.

En nuestro país ha existido una gran tendencia en la sustitución de los combustibles leña y petróleo por gas licuado de petróleo (gas LP) para la cocción. La realidad es que en las áreas rurales no se efectúa una sustitución total, debido básicamente a razones culturales (preferencias en el sabor), técnicas (dificultad o impedimentos económicos para cocinar ciertos alimentos), de seguridad (garantizar el abasto) o económicas (alto costo de la tecnología o el insumo); generalmente se realiza el "uso múltiple", es decir, se emplea simultáneamente leña y gas LP. Existe evidencia de que el gas LP sólo es complemento de la leña (Maser et al., 1997). Los usuarios mixtos gastan en promedio la misma cantidad de leña, o hasta 60% más que los usuarios exclusivos de leña.

#### 1.1.1 Consumo de leña en el sector rural

La energía suministrada por la biomasa representa entre el 12% y el 15%<sup>1</sup> de la energía total consumida en el mundo (Wereko-Brobby and Hagan, 1996; Hall D. O., et al., 1993); variando su aportación a nivel nacional desde el 50% hasta el 90% en la mayoría de los países en vías de desarrollo (Wereko-Brobby and Hagan, 1996). Su uso se concentra principalmente en áreas rurales y en las zonas urbanas pobres, básicamente se emplea para cocción de alimentos, calentamiento de agua, acondicionamiento de espacios y en pequeñas industrias (panaderías, alfarerías, tortillerías).

Asimismo, el uso de biomasa como energía es quizá el indicador más importante de las diferencias existentes entre las sociedades desarrolladas y en vías de desarrollo, esto es, las desarrolladas utilizan tecnología moderna para transformar la biomasa e incrementar sus propiedades energéticas, mientras que las sociedades en desarrollo continúan usando los biocombustibles en su forma natural con tecnologías de uso final poco eficientes.

Resultados del Sistema de Información de la Energía Forestal (Wood Energy Information System, WEIS), obtenidos por Horta y Trossero (1998), proporcionan los consumos de madera por regiones en países desarrollados y en vías de desarrollo. Se observa que la leña representa el 7% de la

---

<sup>1</sup> Este porcentaje representa aproximadamente 55 Exajoules por año.

energía primaria consumida, de la cual el 76% se usa en los países en vías de desarrollo y el resto en los desarrollados, en estos últimos representa tan sólo el 2% de la energía total consumida; en conjunto la biomasa contribuye aproximadamente con el 14% de la energía primaria, considerando todos los biocombustibles.

Casi el 60% de la madera extraída en el mundo se destina para fines energéticos; los países desarrollados utilizan alrededor del 31% de la madera producida para generar energía, mientras que los países en vías de desarrollo esta cifra es del 80%. En los países en desarrollo, donde vive el 77% de la población mundial se consume aproximadamente tres cuartas partes de la leña; casi el 44% de la leña consumida en el mundo es usada en los países asiáticos, en donde la leña representa el 81% de la madera extraída (Horta y Trossero, 1998).

En todos los países de América Latina el uso de madera (leña y carbón) como combustible es muy amplio, especialmente en las comunidades rurales. Uno de los mayores problemas, común a todos, es la falta de datos confiables sobre el uso de este energético, y en los pocos estudios existentes generalmente estos consumos están subestimados. La situación económica en estos países es muy similar, existe un gran sector de la población que vive en pequeñas comunidades rurales donde únicamente tienen acceso a los combustibles forestales; en algunos países, las personas de clase baja, que viven en las zonas semiurbanas consumen importantes cantidades de leña. Además de ser un recurso renovable (si se utiliza de manera sustentable) y disponible a escala local, en términos económicos representa un importante ahorro de divisas para el país; ofrece también, oportunidades de empleo a campesinos y personas involucradas en el proceso de producción, transporte, distribución y comercialización.

A lo largo de la historia la humanidad ha estado expuesta a emisiones provenientes de la combustión de los llamados “biocombustibles”; además de  $\text{CO}_2$ , la combustión directa en fogones abiertos, genera una gran cantidad de partículas, hidrocarburos aromáticos policíclicos y monóxido de carbono (CO), todos con efectos adversos a la salud; la mayor cantidad de contaminantes se concentra en el interior de las viviendas y sus efectos a la salud dependen de diversos factores (Smith, 2003).

Existen cinco tipos de sustancias contaminantes del aire cuyos efectos han sido estudiados ampliamente y se consideran nocivas para la salud: partículas suspendidas, óxidos de azufre (generalmente  $\text{SO}_2$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), hidrocarburos y el monóxido de carbono (CO). La combustión de leña emite cantidades significativas de partículas suspendidas, CO e hidrocarburos. Además hay evidencia de la relación entre la exposición a contaminantes y la incidencia de infecciones en las vías respiratorias superiores, otitis media, asma, cáncer de tracto nasofaríngeo y de la laringe, tuberculosis pulmonar, insuficiencia ponderal del recién nacido y mortalidad de lactantes, y cataratas e infecciones oculares (Bruce et al., 2000)

Las principales enfermedades asociadas a la inhalación de humo de leña en los hogares son (Riojas, et al., 2006):

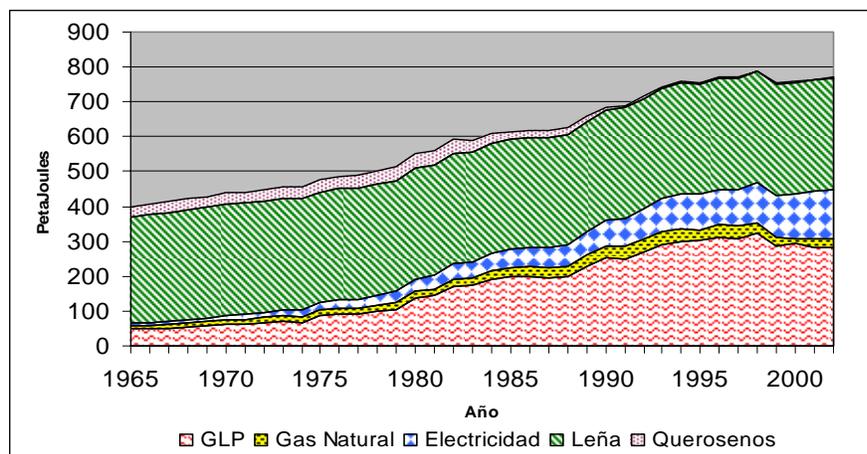
- Bronquitis crónica y obstrucción bronquial crónica: se presenta generalmente en los países desarrollados, sin embargo se considera que puede ser un factor determinante en la salud de la población.
- Infecciones respiratorias agudas: afecta principalmente a los niños de las zonas rurales.
- Bajo peso al nacer y trastornos perinatales: se incrementa la mortalidad infantil cuando los niños nacen con peso menor a 2.5 kg.
- Infecciones respiratorias agudas en niños.
- Cáncer de pulmón y naso-faringe: las elevadas exposiciones a hidrocarburos incrementan el riesgo de contraer cáncer en la población rural.
- Fibrosis pulmonar: afecta ambos pulmones, primero mediante inflamaciones y después cicatrizaciones que vuelven rígido al pulmón y lo imposibilitan para el intercambio de gases.

Si se compara la combustión de biomasa en los hogares con los efectos de la contaminación del aire por la combustión de combustibles fósiles, la primera, aparentemente, no tiene ningún efecto significativo en el medio ambiente a escala local o regional. Por su parte, en lo que se refiere a los gases de efecto invernadero, la utilización de biomasa obtenida de forma renovable es neutra en cuanto a la emisión de CO<sub>2</sub>, ya que en el proceso de combustión se libera la misma cantidad de CO<sub>2</sub> que absorbe del ambiente en su desarrollo (Charless, 1994). Sin embargo, la combustión incompleta de la biomasa produce emisiones de otros gases de efecto invernadero (en particular CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O), por lo que sí contribuye al cambio climático global, aunque en un grado mucho menor que la utilización de combustibles fósiles (Bhattacharya y Abdul Salam, 2002). Dada la falta de información en este campo, el mejor entendimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero por los fogones tradicionales (y por las alternativas a éstos) es una de las prioridades de investigación actuales.

### 1.1.2 Patrones de consumo de leña en México

En México se carece de información suficiente y precisa sobre el comportamiento de la demanda de recursos forestales, leña y carbón vegetal, debido esencialmente a la política energética enfocada a la modernización de los sistemas energéticos dependientes de los recursos fósiles.

Masera (1993) estimó para 1990, un consumo de leña de 365 PJ/año, equivalentes a 22.2 millones de ton/año, o también a 37.0 millones de m<sup>3</sup>/año que representa el 9.3% del consumo nacional de energía final y el 46% de la energía consumida en el sector residencial; el 93% de leña es requerido por el sector doméstico y el resto por las pequeñas industrias; el área rural participa con el 75% y el urbano apenas con el 15% (Masera, 1995). Es importante destacar que los datos proporcionados por el Balance Nacional de Energía subestiman considerablemente los consumos de biocombustibles, particularmente el de la leña, debido en gran parte a que únicamente se consideran los usuarios exclusivos de leña que reportan los censos generales de población elaborados por el INEGI, los usuarios mixtos (leña y gas LP) no se contemplan como usuarios de leña. En la Figura 1 se muestra la evolución de las principales fuentes de energía usada en el sector residencial mexicano para 1965-2002.



Fuente: SENER (2002) y Díaz-Jiménez (2000).

Figura 1. Consumo final de energía en el sector residencial (1965-2003) PJ/año

Como se ha mencionado, la mayor demanda de leña en el sector residencial se presenta en la cocción de alimentos, entonces, la evolución de los usuarios que cocinan con leña es un indicador real de la saturación de dicho combustible.

1. Masera (1995) estima que en 1990 alrededor de 25.6 millones de personas (el 34% de la población total) utilizaban leña para cocinar, de las cuales el 82% (21.1 millones) pertenecían al sector rural, en este sector el 91% de los hogares dependen de dicho combustible; como el

comportamiento de los usuarios ha sido casi constante, se espera que esta tendencia no cambie en varios años.

2. Existe una correlación inversa entre el uso de leña y el tamaño de la comunidad (Masera, 1997), esto es, aproximadamente el 39% de los usuarios exclusivos de leña se ubican en poblados con menos de 500 habitantes.
3. El comportamiento de la saturación de leña es diferente para cada región, en el norte del país existe una clara tendencia decreciente. Por otro lado, en las regiones centro-sur y sur de México que se caracterizan por tener un alto índice de usuarios de sólo leña, experimentaron crecimiento en el periodo 1980 a 1990, alcanzando valores mayores al 3% en Quintana Roo y Chiapas. La SEMIP (1988), consideraba que la saturación de usuarios de leña se encontraba en el rango del 66% al 93% en el norte del país, mientras que el sur alcanzaba el 97%.
4. Estudios realizados a nivel municipal entre 1980 y 1990 reportan que de los 2,382 municipios totales, el 43% de ellos (1,018) manifiestan un importante crecimiento en el número de viviendas que utilizan leña para cocción, como es de esperarse dicho crecimiento se presenta en mayor grado en la zona sureste de México; en tanto que en la Centro Occidente (Meseta Purhépecha), Sierra Tarahumara y la Huasteca el incremento es aislado.
5. El mercado de la leña no está bien definido y si existe, opera básicamente a nivel regional. La demanda de leña es aproximadamente 4 veces mayor que la madera comercial explotada legalmente.

El comportamiento de los consumos unitarios familiares se pueden describir de la siguiente forma:

1. El consumo promedio de leña conservadoramente es de 2 kg/cáp/día, equivalente a 60 GJ/año para una familia integrada por seis personas (Masera, 1993). Los consumos regionales per cápita oscilan entre 1.7 kg/día en Guerrero, 2.0 kg/día para Michoacán y 2.6 kg/día para Oaxaca (Masera, *et al.*, 1997); debido en parte a la adaptación de los usuarios a la escasez del recurso.
2. Del total de usuarios rurales que consumen leña, alrededor del 81% utiliza aún el fogón de tres piedras para cocinar y cuya eficiencia es del 17% (Dutt et al., 1989); esto ocasiona un elevado consumo familiar.

En las comunidades rurales es práctica común utilizar el fuego producto de la leña (quemada en un fogón de tres piedras, como se mencionó anteriormente) para diferentes usos finales, entre los principales se encuentran la cocción de alimentos, calentamiento de agua y calefacción (en zonas frías). Es el cocinado de alimentos, sin embargo, la actividad que mayor consumo de leña demanda, el 99% de consumidores rurales la utilizan para este fin y sólo el 50% la usa exclusivamente para la cocción.

Como la dieta rural aún está basada en el consumo de maíz, frijol y chile, los consumos energéticos característicos de estas zonas alcanzan los 24 MJ/cáp/día; y el proceso de elaboración de tortillas (cocimiento del nixtamal y la elaboración propia de tortillas) es el uso con mayor demanda de energía, aproximadamente el 57%. La demanda en los fogones de tres piedras oscila entre los 13 y 17 MJ/cáp/día para la elaboración de tortillas, mientras que para el cocimiento de frijoles se necesitan 8MJ/cáp/día. Las intensidades energéticas, llamadas también consumos específicos de combustible, varían entre 6 a 9 MJ/kg de maíz para la elaboración de nixtamal y alrededor de 30 a 37 MJ/kg de maíz para tortillas, y más de 120 MJ/kg de frijol (cocción).

### **1.1.3 Tendencias**

En la mayoría de entidades de México no existe un mercado desarrollado de la leña, sólo en Chiapas, Guerrero y Oaxaca existe comercialización con cierto grado de organización, principalmente por la demanda de las pequeñas industrias. Generalmente la mayor comercialización de leña se presenta en

regiones rurales que padecen escasez del recurso y en zonas urbanas y periurbanas en las que las pequeñas industrias demandan una cantidad considerable de este energético.

Aproximadamente, para 1987, el 85% del total de usuarios recolectaban la leña; en promedio el tiempo invertido en la recolección oscila entre 0.7 y 2.9 hr/familia/día, variando las distancias de aprovechamiento desde 1.9 hasta 10.3 km; la FAO reporta que la recolección requiere entre 4 y 6 jornales al mes. Según Masera (1993) sólo el 20 % de las familias emplea animales de carga para el transportar la leña, siendo muy común el acarreo mediante la fuerza humana (a espalda o a hombro), y afectando esta actividad a las mujeres y niños. Riegelhaupt (1996) estima que la recolección de leña implica alrededor de 300 millones de jornales al año, lo cual generaría aproximadamente un millón de empleos permanentes.

Los precios de la leña varían en cada región y estado, se puede decir como una burda aproximación que dichos costos oscilan entre \$150.00/ton (precio de 1996) que representan un mercado nacional de alrededor de \$280 millones de dólares anuales (contra US\$250 millones de la madera comercial), dicha comercialización generaría aproximadamente 60 millones de jornales pagados al año, los cuales representan 250 mil empleos permanentes (Riegelhaupt, 1996).

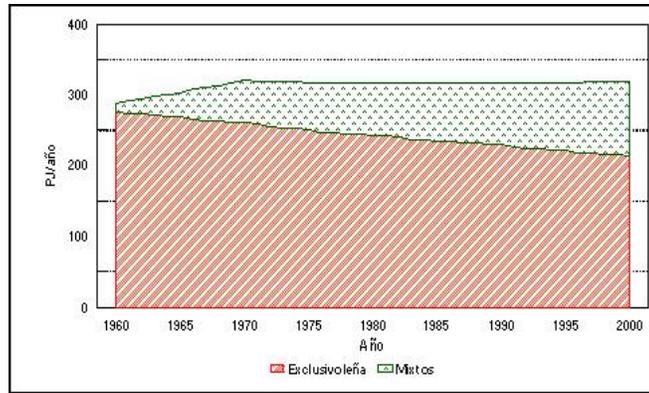
Las familias de menores ingresos invierten mayor cantidad de tiempo o dinero en la obtención de leña y como es lógico dependen en gran medida del recurso de menor calidad o de especies poco demandadas; por lo cual en este grupo se observa la mayor intensidad del trabajo realizado por mujeres y niños para la recolección de leña. Masera (1993) considera que las familias destinan cerca del 25% de sus ingresos a la adquisición de energía, en el estudio micro-regional de la FAO se obtuvo un promedio de 1.8 salarios mínimos semanales, esto es, el 26% de sus ingresos semanales.

En México ha existido una gran tendencia en la sustitución de los combustibles leña y petróleo diáfano por gas licuado de petróleo (gas LP) para la cocción y un poco menos la leña (ocote) por electricidad para iluminación. En las áreas rurales no se efectúa una sustitución total, debido básicamente a razones culturales (preferencias en el sabor), técnicas (dificultad para realizar ciertas tareas), de seguridad (garantizar el abasto) o económicos (alto costo de la tecnología); generalmente se realiza el “uso múltiple”, es decir, emplean simultáneamente leña y gas LP.

A pesar del constante crecimiento del uso del gas LP, existe evidencia de que sólo es complemento de la leña, el uso combinado proporciona ahorros promedio de leña de aproximadamente el 15% (Berrueta *et al* 2007; Masera *et al.*, 1997). Los usuarios mixtos (leña y gas) gastan en promedio la misma cantidad, o hasta 60% más que los usuarios exclusivos de leña. Si bien la proporción de la población del país que usa leña ha disminuido en las últimas décadas, en números absolutos los usuarios de leña han aumentado (en 3.3 millones entre 1960 y 1990).

La mayoría de los usuarios de leña la utilizan como combustible único para cocinar, pero existe una proporción cada vez mayor de usuarios mixtos que utilizan tanto leña como gas LP. Se estima que en el año 1990 el 30% de los usuarios de leña eran mixtos, tanto en el medio rural como en el urbano, y es muy probable que este porcentaje haya aumentado desde entonces (Díaz-Jiménez, 2000).

La Figura 2 muestra la evolución del consumo de leña por tipo de usuario, se observa que la demanda de leña por parte de los usuarios exclusivos muestra una tendencia decreciente, mientras que los usuarios mixtos manifiestan una ligera tendencia creciente. Los usuarios exclusivos de leña demandan el 67% de la leña usada en el sector residencial mientras que los usuarios mixtos el restante 33%.



Fuente: Adaptado de Díaz-Jiménez (2000)

Figura 2. Evolución del consumo de leña por tipo de usuario PJ/año (1960-2000)

Los usuarios mixtos por lo general utilizan la leña como combustible principal, y el gas como combustible complementario; usan leña para las tareas con mayor demanda energética (tortillas, nixtamal, frijoles), y el gas para tareas menores, por lo que la estufa de gas adquiere un papel parecido al que tiene el horno de microondas en las ciudades (Maser et al., 2000). De hecho, se estima que en promedio sólo el 16% de las necesidades caloríficas de los usuarios mixtos se cubren por medio del gas.

A menudo se supone que una vez realizada la inversión necesaria para la utilización del gas LP, la gente avanza un escalón en la escalera del avance tecnológico y abandona por completo la leña. La experiencia muestra que, por el contrario, el costo del gas, las deficiencias en su distribución y el arraigo cultural de la leña hacen que a menudo ésta siga siendo la fuente principal de energía, aun cuando la gente cuente con todo lo necesario para cocinar con gas. De hecho son frecuentes los casos de gente que regresa a la leña después de haberla abandonado. En este sentido, los usuarios mixtos deben considerarse un objetivo importante de las políticas relacionadas con la utilización de leña (Díaz-Jiménez, 2000).

Maser *et al.* (2003) muestran los municipios en los que hay un mayor número de usuarios de leña, aquéllos en los que el número de usuarios ha crecido significativamente en los últimos años y aquéllos en los que hay una limitada disponibilidad de leña en los ecosistemas, información que puede ser útil para el diseño de políticas.

## 1.2 Desarrollo e innovación de tecnología rural.

La evaluación de una tecnología en el ámbito rural no es un proceso lineal, por el contrario es un proceso interactivo y de constante retroalimentación, el desarrollo, la evaluación debe contemplar trabajo, en laboratorio y en campo, relacionado con diferentes dispositivos, debe analizarse desde diferentes perspectivas, energética, salud, ambiental y se tendrá que tomar en cuenta aspectos de tipo social y económico relacionados con los usuarios finales. Este tipo de evaluación da la pauta para fortalecer el proceso de innovación tecnológica. El desarrollo tecnológico no se debe a un solo factor o a una causa, pensarlo así sería limitar el amplio contexto en el que se genera el conocimiento y por tanto, la tecnología.

De acuerdo con Villavicencio (citado por Salado (2002)), el aprendizaje tecnológico contempla dos dimensiones: la primera se refiere a conocimientos que se concretizan materialmente en dispositivos, equipos o documentos, lo cual brinda la oportunidad de transmitirlos a otras personas. La segunda es con respecto a los conocimientos que poseen los usuarios directos de la tecnología. De esta forma, los usuarios logran ser parte del avance tecnológico en la medida que los desarrolladores de la tecnología regresen a ellos a "aprender" para después innovar. Así pues, el desarrollo tecnológico, pasa por diferentes etapas en un ciclo dinámico de retroalimentación constante. Al incidir en estas etapas se propicia una capacidad de hacer crecer el aprendizaje tecnológico cualitativa y cuantitativamente, y brinda la oportunidad de generar innovaciones (Salado, 2002).

El desarrollo tecnológico necesariamente conlleva un proceso de aprendizaje, éste tiene diversas formas que permiten comprender el complejo contexto de una tecnología, estas formas son (Salado, 2002):

- **Aprender haciendo.** En 1974 Arrow<sup>2</sup> introduce la noción de *learning by doing*, ahí se plantea que gran parte del aprendizaje se lleva a cabo al resolver problemas que se resuelven muchas veces “sobre la marcha”, a través de aprender a utilizar, de mejor manera, el equipo y herramientas.
- **Aprender usando.** Rosenberg<sup>3</sup> emplea en 1979 el término *learning by using*, el cual se refiere a la acumulación progresiva de habilidades y conocimientos, mediante la experiencia de utilizar equipos o procesos, de forma que cada vez se hace uso más eficiente de ellos.
- **Aprender interaccionando.** Lundvall<sup>4</sup> encuentra una relación estrecha entre *learning by doing* y *learning by using*, sugiere que estos procesos ocurren en un espacio determinado de interacción mutua que se va enriqueciendo con el tiempo. De esta manera se realiza un proceso de aprendizaje interaccionando, *learning by interacting*.
- **Aprender a aprender.** Stiglitz<sup>5</sup>, sugiere que el aprendizaje constituye una habilidad especializada que se desarrolla dentro del propio proceso de aprendizaje; la denomina aprender a aprender *learning to learn*, es decir que desarrollando la habilidad de apropiarse de conocimientos nuevos es posible sustituir las formas menos eficientes de hacer las cosas.

En sentido estricto, cuando se desarrolla una tecnología únicamente “desde el conocimiento”, se llega a la etapa de “aprendizaje antes de la práctica”, a partir del momento en que una nueva tecnología se incorpora en un contexto específico, surgen estas nuevas modalidades de aprendizaje englobadas como "*aprendizaje por la práctica*" (Nieto, 1999). Este aprendizaje surge espontáneamente en la realización de tareas repetitivas, mediante la práctica, y a través de la corrección de errores, se introducen pequeñas variaciones en el diseño inicial de los dispositivos de cara a mejorar su eficiencia y su funcionamiento. Asimismo, a partir de la experiencia, se da la posibilidad de mejorar la tecnología.

Villavicencio (2006) afirma que el proceso de aprendizaje tecnológico es un proceso colectivo y que éste se realiza cuando los usuarios directos están activamente involucrados en el proceso del desarrollo de una tecnología. Estos procesos colectivos de aprendizaje están limitados por el conjunto de relaciones sociales, prácticas y reglas que marcan las pautas de comportamiento e interacción de las personas.

Los efectos de estos procesos de aprendizaje se han observado, estudiado y medido, desde hace décadas en la mayoría de las industrias (automotriz, aeronáutica, petroquímica, microelectrónica, etc.) y han dado como resultado la progresiva disminución de los costos de producción y del precio de los productos (Nieto, 1999) sin embargo, en el ámbito rural estos procesos de aprendizaje no han sido documentados y mucho menos llevados al proceso de innovación de tecnología, se cree, equivocadamente, que por tratarse de tecnología dirigida a campesinos, muchas de las veces, sin estudios y en condiciones de marginación, poco o nada es lo que pueden aportar al desarrollo tecnológico.

---

<sup>2</sup> Arrow, Kenneth. *The limits of organization*. Nueva York, Estados Unidos de América, Norton and Company, 1974.

<sup>3</sup> Rosenberg, Nathan. *Tecnología y economía*. Barcelona, España, Adolfo Gili, 1979.

<sup>4</sup> Lundvall, Ben-Ake. "Innovation as an interactive process: from user-producer interaction to the national system of innovation", en: Dosi, Giovanni, et. al. *Technical change and economic theory*. Nueva York, Estados Unidos de América, Columbia University Press, 1988.

<sup>5</sup> Stiglitz, Frank. "Learning to learn", 1987.

### 1.3 Uso de la biomasa como combustible. Características energéticas de la leña

La biomasa es un recurso que puede ser aprovechado de una manera ambientalmente sustentable, genera pequeñas cantidades de sulfuros y  $\text{NO}_x$  (óxidos de nitrógeno), no produce  $\text{CO}_2$  (bióxido de carbono); por lo tanto, se puede decir que es un combustible limpio (Wereko-Brobby and Hagan, 1996). Como se menciona anteriormente, durante su combustión libera la misma cantidad de  $\text{CO}_2$  que absorbe del ambiente en su desarrollo; además de que, en los procesos naturales de descomposición de la madera se demanda la misma cantidad de oxígeno que mediante la combustión.

La mayoría de la biomasa requiere algún tipo de conversión para poder emplearla como combustible, únicamente la leña y los productos leñosos pueden utilizarse directamente mediante combustión directa, esta es la forma más antigua y sencilla empleada para aprovechar las propiedades energéticas de la biomasa, quemándola en presencia de un exceso de aire; sin embargo, carece de las ventajas generadas mediante los procesos de conversión, resultando por tanto una forma de uso poco eficiente; porque es necesario eliminar primero el exceso de humedad (mediante evaporación), además los dispositivos de uso final presentan grandes pérdidas, se demandan enormes cantidades de leña por actividad y el alto costo de los equipos industriales en relación con el calor generado.

El objetivo principal de la transformación es incrementar estas propiedades para que su uso como combustible sea óptimo; los procesos de conversión generalmente implican: i) disminución del contenido de humedad, incrementándose por lo tanto, el poder calorífico y ii) mejores características de manejo. Para determinar las características energéticas de la leña debemos considerar algunas variables físicas y químicas que las definen, las principales son (Camps y Marcos, 2002):

1) Físicas	a) Forma, tamaño y aspecto b) Contenido de humedad c) Superficie específica
2) Químicas	a) Composición química elemental b) Composición química por compuestos c) Poder calorífico
3) Físico-químicas	a) Combustibilidad: ♦ Coeficiente de conductividad térmica ♦ Temperaturas y tiempos de combustión ♦ Temperatura y tiempo de inflamación ♦ Temperatura máxima de llama b) Potencia calorífica

Algunas de estas variables afectan en mayor medida las características energéticas de la leña, a continuación se describen las más importantes:

#### 1.3.1 Características físicas

##### a) Forma, tamaño y aspecto

La forma de la leña influye de manera importante en la combustión, de manera general se puede decir que arde más deprisa si el diámetro no es grande, y que por lo contrario cuanto más gruesa es la leña más tardará en arder. Al tratarse la combustión de una reacción química la superficie de contacto entre el combustible (leña) y el comburente (aire) juega un papel fundamental, la forma es importante, ya que dicha superficie depende directamente de ésta.

##### b) Contenido de humedad

Desde el punto de vista del aprovechamiento energético de la leña, la humedad es una de las variables más importantes pues influye en el poder calorífico de la leña, determina la energía que se

puede obtener por medio de la combustión. Cuando se quema la biomasa, primero se necesita evaporar el agua antes de que el calor esté disponible.

El contenido de humedad (H), o humedad relativa, representa la cantidad de agua contenida en un combustible como un porcentaje del peso, puede expresarse de dos maneras, considerando una base seca "bs" o una base húmeda "bh". El contenido de humedad en base seca ( $H_{bs}$ ) está expresado por:

$$H_{bs} = \left( \frac{P_h - P_s}{P_s} \right) * 100 = \left( \frac{\text{Peso del agua en el combustible}}{\text{Peso seco del combustible}} \right)$$

Y el contenido de humedad en base húmeda ( $H_{bh}$ ), se da mediante la relación:

$$H_{bh} = \left( \frac{P_h - P_s}{P_h} \right) * 100 = \left( \frac{\text{Peso del agua en el combustible}}{\text{Peso total del combustible}} \right)$$

Donde  $P_h$  es el peso de la leña húmeda y  $P_s$  es el peso de esa misma leña después de haber sido secada en una estufa hasta haber perdido toda su humedad. De tal forma que:

$$H_{bh} = \left( \frac{H_{bs}}{(1+H_{bs})} \right) \quad \text{o} \quad H_{bs} = \left( \frac{H_{bh}}{(1-H_{bh})} \right)$$

Cuanto mayor es la humedad menor es el poder calorífico, esto se debe a que cuanto más humedad contenga la leña menor materia seca por unidad de masa se tendrá disponible, y por tanto menor calor suministrado. Por otro lado, cuanto más humedad se tenga, mas cantidad de agua habrá que evaporar, lo cual consume energía, por lo que la reacción de combustión invierte parte del calor producido en evaporar esa agua. La Figura 3 muestra la variación del valor calorífico para diferentes cifras del contenido de humedad. (Leach and Gowen, 1989).

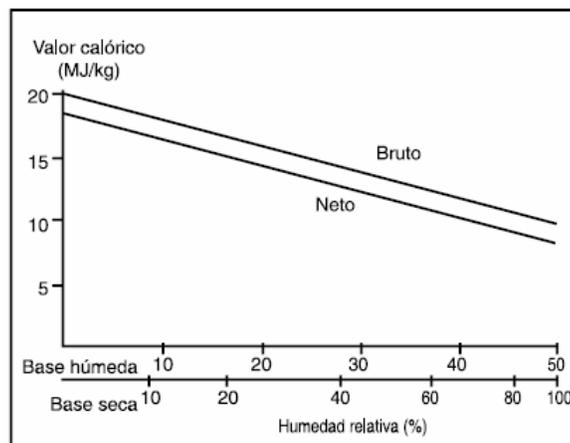


Figura 3. Valor calorífico en función de la humedad relativa<sup>6</sup>.

En la práctica, para utilizarla como combustible, es necesario "secarla" a un nivel cercano al equilibrio con el ambiente, que en general se encuentra entre 7 y 15% de humedad.

<sup>6</sup> El Valor calorífico Bruto varía con relación al Valor calorífico Neto ya que no considera la energía necesaria para la evaporación del agua contenida en el combustible y ni la energía requerida para la formación de vapor de agua a partir del hidrógeno.

### c) Superficie específica

La superficie sobre la cual se lleva a cabo la reacción de la combustión está en función, además de la forma y del tamaño, de las rugosidades, nudos y otras alteraciones de la leña, cuanto mayor y más homogénea sea una superficie específica la combustión será más rápida.

La combustión se facilita si la leña esta bien seca, si hay abundante aire, si la corteza no es muy gruesa y si la superficie de contacto es suficiente. La superficie específica puede modificarse, o aumentarse, rompiendo o trozando la leña, de este modo se consigue mayor superficie de contacto y mayor superficie para la evaporación del agua, haciendo que la leña combustione mejor.

### 1.3.2 Características químicas

#### a) Composición química elemental

La leña es producto de la reacción fotosintética de dióxido de carbono y agua, y consiste principalmente en 3 componentes básicos: carbono (49.5%), oxígeno (44.5%) e hidrógeno (6%), y en menor medida, nitrógeno (0.2-0.4%) y azufre (Baldwin, 1986). Si suponemos que únicamente hay carbono, oxígeno e hidrógeno, la fórmula empírica de la madera sería  $C_{11}H_{1.4}O_{0.66}$ .

La composición química elemental influye en el poder calorífico, en los gases emitidos durante la combustión y en la composición química de las cenizas. De tal forma que al tener poco contenido de azufre, a diferencia de otros órganos del árbol (hojas, flores o frutos), la combustión de la madera produce poco dióxido de azufre, por lo que, desde este punto de vista, es poco contaminante; lo mismo sucede con el nitrógeno al producir pocos óxidos de nitrógeno.

#### b) Composición química por compuestos

En general los componentes de la madera se presentan como polímeros complejos de las siguientes formas y en los siguientes porcentajes (FAO, 1993):

Celulosa	$(C_6H_{10}O_5)_x$	40-50%*
Hemicelulosa	$(C_5H_8O_4)_y$	15-25%*
Lignina	$(C_9H_{10}O_3(CH_3O)_{0.9-1.7})_z$	20-30%*

\* Las proporciones varían considerablemente dependiendo de la especie de leña.

La celulosa es un polímero lineal con una masa molecular superior a 100,000. Por su parte, la hemicelulosa no es un compuesto concreto, sino que bajo este término se engloba un conjunto de compuestos polimerizados de masa molecular inferior a 30,000. La lignina es el agente de unión de las fibras de celulosa, es un compuesto tridimensional (Camps y Marcos, 2002).

La composición química por compuestos, influye en los gases emitidos en la combustión y en la composición de las cenizas.

#### c) Poder calorífico

El poder calorífico se refiere a la cantidad de energía que desprende la unidad de masa de un combustible cuando éste se quema. Se mide en unidades de energía por unidad de masa (cal/g, J/g, etc.).

El poder calorífico de la leña depende del contenido de humedad y de sus tres principales constituyentes, La lignina tiene el valor más alto (26.63 MJ/kg), mientras que la celulosa y la hemicelulosa tienen un valor de 17.46 MJ/kg, por lo que este valor varía de una especie a otra dependiendo del porcentaje de cada componente. La proporción de oxígeno e hidrógeno en la celulosa es similar a la de una molécula de agua, por lo que no existe contribución del hidrogeno para

un mayor poder calorífico ya que éste depende del carbón y de otros compuestos resinosos de alto poder calorífico. (FAO, 1993).

Para madera completamente seca, la cantidad de energía por unidad de peso es más o menos igual para todas las especies, con un promedio de valor calorífico bruto de 20 MJ/kg para madera de tronco. Los valores pueden variar ligeramente de este promedio, según el contenido de ceniza: para ramas pequeñas, tienden a ser más bajos y más variables. Sin embargo, en la práctica, la humedad relativa es el factor más importante que determina el poder calorífico.

Comúnmente se utilizan dos tipos (Camps y Marcos, 2002):

- **Poder Calorífico Superior (PC<sub>S</sub>):** También es llamado calor de combustión superior e indica la relación entre la energía total liberada por la combustión y el peso del combustible, en este caso el agua de combustión es recogida en forma líquida.
- **Poder Calorífico Inferior (PC<sub>I</sub>):** Representa la cantidad efectiva de energía generada por la combustión, después de considerar energía utilizada para la evaporación de agua libre y combinada. Indica el calor desprendido por un kg de combustible, en una combustión en la que el agua del combustible se libera en forma de vapor

Obviamente el PC<sub>I</sub> es menor que el PC<sub>S</sub> porque no incluye i) la energía necesaria para la evaporación del agua contenida en el combustible y ii) la energía requerida para la formación de vapor de agua a partir del hidrógeno; por lo tanto, la diferencia entre el PC<sub>S</sub> y el PC<sub>I</sub> depende principalmente del contenido de humedad y de hidrógeno en el combustible. El poder calorífico de la madera, expresado en base seca, varía en una proporción muy pequeña, dependiendo, como ya se comentó, del contenido de humedad; el poder calorífico superior o bruto y el poder calorífico inferior o neto se expresan mediante las siguientes relaciones:

$$PC_S = (1 - H_{bh})H_o \qquad PC_I = (1 - 1.12H_{bh})H_o$$

Donde:

H<sub>o</sub> = Entalpía de la madera en base seca

PC<sub>S</sub> = Poder calorífico superior

PC<sub>I</sub> = Poder calorífico inferior

H<sub>bh</sub> = Contenido de humedad de la madera en base húmeda

La dependencia encargada de la elaboración del Balance Nacional de Energía (SEMIP y SENER actualmente) utiliza el poder calorífico superior (PC<sub>S</sub>) de los combustibles. Estas dependencias han utilizado diferentes PC<sub>S</sub> de la leña, a partir de 1965 y hasta 1993 se le asignó un valor de 4,400 kcal/kg (18.42 MJ/kg); posteriormente se usó un PC<sub>S</sub> de 3,460 kcal/kg (14.48 MJ/kg). Finalmente, en 1997 la SENER efectuó una corrección a toda la serie (1965-1997) en la que empleó un PC<sub>S</sub> igual a 14.44 MJ/kg.

El poder calorífico de la madera secada en horno difiere poco para distintas especies de árboles. Normalmente se asume una entalpía para la madera secada en horno, igual a H<sub>o</sub> = 20 MJ/kg (Almeida, 1990; Masera, 1993) y se utiliza el PC<sub>S</sub> de la madera por ser el valor que se utiliza en el BNE para poder comparar los resultados. Considerando la humedad promedio nacional igual a 22% en base húmeda, al aplicar la ecuación para PC<sub>S</sub>, se obtiene un PC<sub>S</sub> promedio nacional igual a 16 MJ/kg de leña (Díaz-Jiménez, 2000).

### 1.3.3 Características físico-químicas

#### a) Variables de combustibilidad

Las variables de combustibilidad más importantes son el coeficiente de conductividad térmica y las que se refieren a las temperaturas y tiempos de inicio de combustión, de inflamación, temperatura de llama, etc. (Camps y Marcos, 2002).

Se denomina *coeficiente de conductividad térmica* a una variable termodinámica que mide la rapidez de transmisión de calor por conducción. Por su parte, el *tiempo de combustión* es el tiempo que tarda en comenzar la combustión de un combustible mientras que la *temperatura de combustión* es aquella a la que un combustible comienza su combustión, ambas variables dependen de la naturaleza del combustible (composición química, superficie específica, coeficiente de conductividad térmica, etc.).

El tiempo de inflamación se refiere al tiempo que tarda un combustible en emitir una llama, lo cual sucede a la temperatura de inflamación. El comienzo de la combustión y el tiempo en alcanzar la *temperatura máxima de llama* están influenciados por el contenido de humedad de la leña, una vez que se ha evaporado el agua contenida es cuando comienzan a escapar vapores combustibles que finalmente forman la llama. En la Tabla 1 se presenta un esquema simplificado del modelo de combustión de la leña, en función de la temperatura de carbonización de la misma (Camps y Marcos, 2002):

Tabla 1. Modelo simplificado de la combustión de la leña

Temperatura (°C)	0-100	100-(190-210)	(190-210)-280	280-500	>500
Producto	<ul style="list-style-type: none"> <li>Materia sólida no carbonosa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Materia sólida</li> <li>Vapor de agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Materia sólida</li> <li>Gases inflamables mezclados con vapor de agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Materia sólida y carbonosa</li> <li>Gases inflamables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Carbón</li> </ul>
Tipo energético de reacción	Endotérmica	Endotérmica	Endotérmica	Exotérmica	Exotérmica

En general las maderas más densas tienen un coeficiente de conductividad térmica más elevado, sin embargo al quemarse se produce un residuo sólido carbonoso cuyo coeficiente de conductividad térmica es muy pequeño, cuando este residuo aumenta de espesor los tiempos de combustión se hacen más largos y la leña arderá más despacio manteniendo por más tiempo la combustión. Por esta razón, en muchas de las ocasiones, se prefiere la leña de roble, encino y eucalipto entre otras, frente a la de pino, ya que esta última es menos densa.

La velocidad de combustión también se ve influenciada por materiales inflamables contenidos en el interior de la leña, tal es el caso de la resina. Este material arde más rápido que la pared celular de la leña, razón por la cual, para otros usos se prefiere leña más resinosa (alfarería, panadería, etc.).

## b) Potencia calorífica

La *potencia calorífica* se refiere a la cantidad de calor desprendida por un combustible por unidad de masa y unidad de tiempo (kJ/kg.s, kW.s, kcal/kg.s.). Al iniciar la combustión se prefiere que la potencia calorífica sea grande para lograr encender la lumbre con rapidez, una vez que esto sucede se desea que se mantenga constante.

La potencia calorífica está en función de: a) el poder calorífico del combustible; b) la forma del combustible (superficie específica); c) la colocación del combustible respecto al comburente (aire), lo cual está en relación con la entrada de aire primario y secundario; d) el coeficiente de conductividad térmica; y e) de la tecnología de combustión, es decir el diseño de la cámara donde se realiza la combustión de la leña, y del tiro de la chimenea.

### 1.3.4 Proceso de combustión de la leña

La combustión de leña es un proceso muy complicado que no es uniforme, consta de cuando menos tres pasos dados por la evaporación del agua contenida en la leña, descomposición de las moléculas que forman la madera, generando compuestos volátiles que arden y carbón; y la combustión del carbón y volátiles sobrantes (Figura 4).

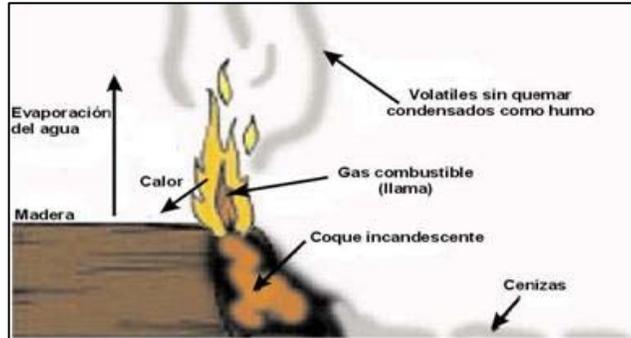


Figura 4. Componentes en la combustión de la madera.

Durante la reacción de la combustión, en la cual el oxígeno reacciona con los componentes químicos de la madera, se libera energía en forma de calor. La combustión es un proceso complejo en el cual los procesos de volatilización, descomposición y de combustión ocurren casi simultáneamente. La cantidad de energía liberada durante la reacción de combustión depende de la temperatura, de la presión, de los productos de la reacción y del estado del agua producido. Estos dos últimos factores son importantes porque la combustión incompleta dará lugar a la producción del monóxido de carbono y de otros materiales combustibles, que dan lugar a la pérdida de energía potencial del combustible. El estado del líquido o del vapor del agua, producido durante la combustión del hidrógeno en el combustible, tendrá efectos sobre el calor neto liberado.

Los productos la combustión de la pirólisis de la biomasa, en particular, carbón y volátiles, ocurre en dos maneras, la combustión de los volátiles y la combustión del carbón.

- La composición de los volátiles es variable y depende de la temperatura de la pirólisis y del tiempo que estos volátiles se sujetan a una temperatura elevada. Así, la combustión de volátiles es un proceso complejo. Cuanto más alta es la temperatura de la zona pirolítica, tanto más severo es la descomposición de las moléculas más grandes que en las más pequeñas, que alternadamente se queman más fácilmente. El fuego de la leña produce generalmente una llama difusa. Esto consiste en un jet del gas inflamable con una reacción de la combustión que ocurre en el interfaz del aire-gas, dando por resultado la formación de los productos gaseosos calientes de la combustión y calentando el resto del gas. Los productos de la combustión son luminosos debido a su alta temperatura dando por resultado una vertical que se eleva. Durante la subida, estos productos también arrastran un poco de aire circundante.
- Otro proceso, que ocurre simultáneamente, es la difusión del aire a causa de la diferencia en la presión parcial de los componentes. Esta difusión del aire en el material volátil sin quemar modifica la temperatura en la combustión del material volátil. Si la temperatura de la zona de la combustión no es suficientemente alta se forma el hollín y quedan compuestos químicos sin quemar. La temperatura puede bajar debajo de la temperatura de ignición debido al efecto del aire arrastrado o al contacto de la llama con una superficie fría.
- Cuando la combustión ocurre en la superficie, el dióxido de carbono se forma con la liberación del calor. Sin embargo, si la reacción de la combustión ocurre en la cama del combustible o en el carbón a temperatura alta, entonces el dióxido del carbono se reduce a monóxido de carbono. Para evitar esto, se debe quemar con aire secundario para lograr producir únicamente dióxido de

carbono y calor. Si no, dará lugar a la pérdida de calor potencial así como a emisiones contaminantes.

Durante la combustión a temperaturas de 250°C o superiores, el 80% de la masa de la leña se evapora en una mezcla de gases flamables, conocidos como volátiles, la liberación de este proceso se denomina pirólisis. Los residuos remanentes quedan en forma de carbón o de cenizas.

Cuando la temperatura es suficientemente alta y se cuenta con la cantidad necesaria de oxígeno los subproductos que se obtienen son agua y dióxido de carbono, pero si alguna de esas dos condiciones no se cumple la combustión es incompleta se sabe que, además de CO<sub>2</sub>, se emiten partículas, hidrocarburos aromáticos policíclicos, óxido nitroso, óxido de azufre y monóxido de carbono (CO), todos con efectos adversos a la salud.

En resumen se podría simplificar el proceso de la siguiente manera:

- Si un pedazo de leña se calienta hasta cerca de los 100°C, el agua que contiene hierve y se evapora o se va a las partes más frías del leño y escurre por la punta que está más lejos del fuego.
- Cerca de los 200°C comienza la descomposición de la hemicelulosa, seguida por la celulosa.
- A los 300°C la descomposición se hace extensiva. Alrededor del 8-15% de los compuestos permanecen como carbón fijo, el resto es liberado como gases volátiles. Además, 50% de la lignina permanece como carbón. Los volátiles producidos por esta descomposición escapan como humo o se recondensan.
- Cuando los gases se escapan se mezclan con oxígeno y se queman alrededor de los 550°C y producen una llama amarilla. El 14% de la energía total de la combustión es producto del calor radiante de la llama.
- La temperatura de los gases sobre la leña es típicamente de 1,100°C y está limitada por la pérdida de calor radiante y por la mezcla con aire frío del ambiente. Cuando los volátiles suben reaccionan formando hollín y humo y simultáneamente se queman al mezclarse con el oxígeno. La leña se quema en capas y cuando todo el carbón se ha quemado se producen las cenizas.

# CAPÍTULO 2

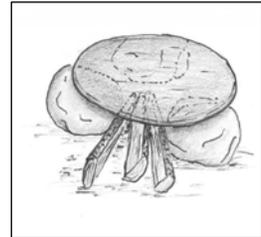
## TECNOLOGÍAS PARA COCCIÓN CON LEÑA Y SUS MÉTODOS DE EVALUACIÓN

### 2.1 Principales tipos de tecnologías

En general se puede agrupar a las tecnologías como de fuego abierto, cerrado y las mejoradas que poseen chimenea, en esta clasificación se incluyen los principales sistemas de cocción que son:

#### 2.1.1 Fogón de Tres Piedras

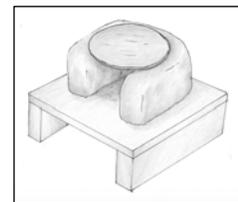
En muchas partes del mundo la cocción se realiza en un dispositivo de fuego abierto denominado “tres piedras”; existe evidencia suficiente del uso universal de esta estufa desde tiempos ancestrales y aún actualmente posee una significación religiosa para algunas culturas. El fuego en tres piedras comúnmente utiliza leña y residuos de cultivos, posee rangos de eficiencia tan bajos como 5%; mediciones recientes revelan que puede lograr eficiencias del 36%, pero los valores típicos de eficiencia energética oscilan entre 5 y 17% (Dutt y Navia, 1987). Más del 60% del calor generado se transmite al aire circundante.



En estos dispositivos la combustión suele ser de manera incompleta e incontrolada, genera gran cantidad de partículas y gases contaminantes que permanecen dentro de la cocina. El costo es prácticamente nulo. Algunas desventajas importantes son dispersión de las llamas y del calor causada por el viento, un bajo control del fuego, exposición al calor y al humo, y el riesgo de un sufrir quemaduras. Sin embargo, el fuego abierto provee además de calefacción en épocas de frío, de luz durante las noches y de un sitio de reunión que en muchos lugares tiene significados incluso religiosos.

#### 2.1.2 Estufas tradicionales

Comprende muchos tipos de dispositivos a fuego semi-cerrado que emplean leña o residuos de cultivos, su uso es muy extenso en el mundo. En Asia como en América Latina, por ejemplo, las estufas son hechas típicamente con lodo o barro y son construidas por los usuarios. Normalmente tienen forma de “U” o herradura, y aunque de cierta manera “encierran” el fuego en lo que sería la cámara de combustión, no poseen chimenea por lo que el humo y las partículas generadas en la combustión se esparcen por la cocina.



Mediante la prueba de ebullición de agua, en este tipo de estufas se logra un mejor funcionamiento que en las de fuego abierto, alcanzando eficiencias de alrededor del 20%. Esto se logra principalmente a que se disminuyen las pérdidas de calor debidas al aire circundante.

#### 2.1.3 Estufas mejoradas o eficientes

Este tipo de estufa es fruto de muchos intentos para mejorar la combustión de la leña, producir menor cantidad de humo y gastar menos combustible. La corriente interesada en el mejoramiento de las

estufas se originó antes de los años 1950's cuando la estufa conocida como "Hyderab Chula" se introdujo en la India, y en 1960 cuando la FAO desarrolló la estufa "Singer" para Indonesia; ambos diseños eran para estufas multihornillas (para varias ollas) que se conocían como "estufas construidas *in situ*" porque se construían en la cocina.

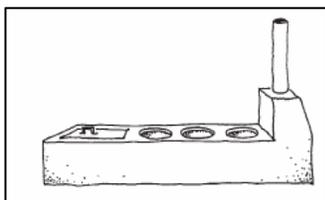
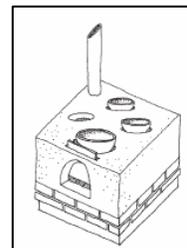
El uso de las estufas mejoradas beneficia principalmente a las mujeres y a aquellos dentro de la sociedad con un nivel de ingresos medio y bajo. Una estufa mejorada permite a los usuarios obtener directamente los siguientes beneficios (Masera, 1995; Magallanes, 2006; Berrueta, et al 2007, Johnson et al., 2007):

- ♦ Ahorro de combustible, ya que las eficiencias son mayores que las tecnologías tradicionales (hasta del 30-50%).
- ♦ Disminuir la presión local sobre los recursos forestales.
- ♦ Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera.
- ♦ Mejorar la salud al reducir la exposición al humo, reducir los dolores de espalda, las quemaduras y los enfriamientos.
- ♦ Utilizar materiales de construcción accesibles a las comunidades (barro, arena, piedra).
- ♦ Ahorrar dinero, especialmente en las familias que compran combustibles de biomasa.
- ♦ Reducir el esfuerzo al aligerar la carga de trabajo de las mujeres y los niños.
- ♦ Ahorrar el tiempo empleado en la recolección de la leña. Se podría aprovechar más tiempo en el cuidado de los niños, la educación y en actividades que generen ingresos.
- ♦ Mejorar la calidad de vida en los hogares al cocinar de manera más conveniente y facilitar la limpieza de la cocina y los trastes.

En esta categoría podemos encontrar las estufas de construcción "local o *in situ*" y las estufas "portátiles":

#### a) Estufa local o de construcción *in situ*

En esta categoría se engloban las estufas en las cuales los materiales empleados para la construcción dependen de cada región, es decir, de la disponibilidad de los recursos. En China pueden elaborarse con ladrillos y cemento, en Burkina Faso se hacen de concreto, en la India de lodo y en América Central se utiliza una mezcla de ceniza volcánica y arcilla que se le denomina "Lorena"; la mayoría posee chimenea y están diseñadas para dos o tres ollas; en promedio sus eficiencias son mayores que la de tres piedras, en una serie de pruebas de calentamiento de agua, en estufas construidas localmente se tuvieron eficiencias del 15% al 22%.

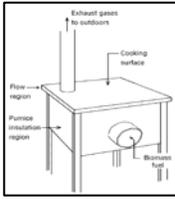


Un estudio empírico de estufas de tres hornillas realizado por el Indian Institute of Science indica que es posible lograr eficiencias mayores. Mediante la optimización de las dimensiones de una estufa llamada ASTRA ole (ASTRA es el Centre for the Application of Science and Technology to Rural Areas) se descubrió que es posible incrementar la eficiencia del 15% al 45%.

#### b) Estufas portátiles

En los últimos años se han desarrollado otros tipos de estufa de leña, la estufa que se puede producir artesanalmente en serie, y otra que es un diseño prefabricado, comúnmente se llama estufa montada y sólo se ensambla en las cocinas. Su elaboración suele ser económica al producirse en serie y mayores escalas, se puede tener mayor control sobre las dimensiones y características de la estufa





El primer modelo eficiente de metal fue diseñado en 1983 para utilizarse en Burkina Faso (Baldwin, 1986). Cada estufa utiliza un sólo tamaño de recipientes, los dispositivos de cocción no deben ser mayores al área de contacto con el fuego y a pesar de que se pueden utilizar ollas más pequeñas, no es recomendable debido a que disminuye la eficiencia.

Cuando se operan en forma correcta suelen ser muy eficientes, Baldwin registró eficiencias del 29% en una estufa metálica sencilla, 36% para una estufa de cerámica y 42% para una metálica aislada; existen otros modelos como Priyagni, Tara y Swosthee que alcanzan eficiencias del 43%. Debido a que el control de calidad es más estricto, se ha centralizado su fabricación y las estufas alcanzan eficiencias muy similares a los modelos de laboratorio; sin embargo, no debe perderse de vista que en las áreas rurales no se tiene acceso (no disponible o son muy caros) a este tipo de materiales, por lo que las estufas portátiles frecuentemente se elaboran de arcilla quemada (cocida).



Las estufas prefabricadas combinan algunas de las ventajas de las estufas construidas artesanalmente y las locales, las partes principales de la estufa (comúnmente cerámica), son elaboradas artesanalmente de acuerdo a indicaciones precisas, el usuario adquiere algunas partes y las ensambla en su cocina.

En resumen, muchas de las estufas mejoradas, son diseñadas para utilizarse con determinados equipos de cocción (ollas, sartenes, etc.) y cuando se emplea otro tamaño de recipientes la eficiencia puede caer drásticamente. Dentro de este tipo de estufas se encuentra la estufa tipo "Lorena", un diseño guatemalteco que, como su nombre lo indica esta construida de una mezcla de lodo y arena.

## 2.2 Experiencias en México y en el mundo

La baja eficiencia con la que se utiliza la leña de forma tradicional en fogones abiertos principalmente ha influido en los últimos treinta años a que se hayan desarrollado una gran variedad de opciones tecnológicas para mejorar la eficiencia de la cocción con leña; el objetivo principal era ahorrar combustible. De hecho, países como China, India y Kenya, cuentan con programas de diseminación de estufas muy establecidos que alcanzan a millones de hogares (Barnes et al., 1992).

Un beneficio adicional de las estufas eficientes que ha recibido atención creciente a nivel internacional es la reducción de la contaminación por humo asociado a la combustión de leña en fogones abiertos, característica que se traduce en mejoras sensibles a la salud de los pobladores rurales (particularmente mujeres y niños), en este caso el objetivo es sacar el humo de la cocina a través de una chimenea

### 2.2.1 Principales modelos de estufas eficientes en el ámbito internacional

Una de las primeras estufas mejoradas fue el "Magan Chula", introducida en India en 1947. Entre los programas de diseminación de estufas mejoradas más importantes destacan "The Chinese National Improved Cookstove Program" (CNISP), considerado como el programa más exitoso, cerca de 185 millones de estufas implementadas entre 1982 y 1998, aproximadamente 90% de todos los hogares rurales en China (Smith et al., 1994), también destaca "The Indian National Program of Improved Chulhas", que inició en 1983 y continuo hasta el 2000, y logró la implementación de más de 30 millones de estufas mejoradas.

Desde hace más de 10 años existen numerosos programas tanto en Asia, África y América Latina, aunque sin tanto impacto como los programas de China e India, sin embargo, en los últimos años ha

cobrado fuerzas nuevamente en el ámbito internacional. Ha surgido una “cruzada” global sobre estufas de leña eficientes y limpias, ahora impulsada fuertemente por los aspectos relacionados con la salud de los usuarios (Bruce *et al.*, 2000). Prueba de este creciente interés son el Programa de Energía Doméstica (Household Energy Program) de la Fundación Shell y la Asociación para el Aire Limpio (Partnership for Clean Indoor Air) surgida en la Cumbre Mundial para el Desarrollo Sustentable en Johannesburgo en 2002.

De los proyectos y modelos de estufas que destacan en América Latina está la estufa *Justa*, una estufa que ha sido desarrollada por AHDESA (Asociación Hondureña por el Desarrollo), Trees, Water, and People, y el Centro de Investigación Aprovecho. A diferencia de la estufa Lorena, la estufa Justa utiliza una plancha en donde se cocina (a diferencia de la estufa Lorena, donde se hacen agujeros y se ponen dentro las ollas cuando se cocina y un comal de barro que forma parte del cuerpo de la estufa). La estufa Justa es más eficiente que la Lorena por tener una cámara de combustión tipo *Rocket* (diseñado por Larry Winarsky del Instituto Aprovecho) y una capa de aislamiento alrededor del fuego para impedir la pérdida del calor (Bryden *et al.*, 2005). Sin embargo el calor está focalizado en un punto lo cual dificulta, para el caso de México, la elaboración de tortillas.

Otra variante del mismo modelo es el *Eco-Fogón*, éste se ha difundido ampliamente en Honduras, Nicaragua, Brasil, y Bolivia, fue diseñado por PROLEÑA, con la participación de Trees, Water, and People y Aprovecho. El *Eco-Fogón* es muy parecido a la estufa Justa, pero es de fabricación semi industrial a base de una estructura metálica y cámara de combustión de cerámica, se instala en las casas, a diferencia de la Justa y la Lorena que se construyen *in situ* ya que se construyen en la casa según la necesidad de la familia. En Guatemala, Helps International promueve la estufa *Onil*, la cual también utiliza el principio de la cámara de combustión *Rocket* y utiliza una estructura de concreto. La Figura 5 muestra algunas imágenes de las estufas mencionadas.



a) Estufa Lorena

b) Estufa Justa

c) Eco-Fogón

d) Estufa Onil

Figura 5. Estufas difundidas en Latinoamérica.

## 2.2.2 Experiencias en México de implementación de estufas eficientes

En México se han realizado algunos programas de difusión de este tipo de dispositivos tanto en el ámbito nacional como regional (Frausto, 1991, Navia, 1992, ORCA, 1989, entre otros). La difusión se ha concentrado en modificaciones al diseño conocido como “*Lorena*”. Diseño surgido en Guatemala, denominada así por los materiales utilizados para su elaboración: *lodo* y *arena*. La mayoría de estos programas comenzaron a mediados de los años ochenta, como el programa de estufas rurales de la Secretaría de Agricultura y no alcanzaron los resultados esperados. Las causas más comunes fueron: no entender las prioridades de los usuarios, enfocar los programas de difusión de estufas a sólo programas de “construcción” de dispositivos, olvidándose del seguimiento y monitoreo de los dispositivos. En muchos casos, la relación con los usuarios y el propio diseño técnico de las estufas no fue el apropiado.

La estufa Lorena ha mostrado viabilidad técnica y económica, además de una gran aceptación gracias a la adaptación del modelo original a las necesidades de la región. En el aspecto técnico, se hicieron pruebas de eficiencia energética y de combustión para determinar las medidas críticas para su

adecuado funcionamiento. Además, se experimentó con nuevos materiales de construcción: a la mezcla de lodo y arena se agregó cemento para acelerar el fraguado y darle mayor solidez.

Las estufas deben ser apropiadas para realizar varias tareas (calentar, hornear, freír) y permitir la preparación de alimentos en recipientes de distintas formas (ollas, sartenes, comales). Sin embargo existen tareas que demandan mayor cantidad de energía o de tiempo al cocinar, en México, como se ha mencionado, la elaboración de tortillas (cocimiento del nixtamal y la elaboración propia de tortillas) es el uso con mayor demanda de energía, aproximadamente el 57%.

La Figura 6 muestra el resultado de un estudio comparativo entre los fogones tradicionales y la estufa Lorena, donde se muestra que éstas últimas son eficientes para la manufactura de tortillas, tarea para la cual pueden ahorrar más del 40% del consumo de leña con respecto al fogón de tres piedras (Dutt et al., 1989, Masera y Navia, 1997). De hecho, esta última característica hace a las estufas Lorena particularmente atractivas para los usuarios mixtos de gas y leña. Los costos de las estufas tipo Lorena se han estimado en alrededor de 30 dólares incluyendo únicamente el dispositivo. En pruebas de campo se han reportado ahorros desde 34% hasta 40% del consumo familiar de leña comparado con estufas tradicionales (Dutt et al. 1989; Navia 1992; Masera et al., 1997). En México, cocinar tortillas representa más de la mitad del consumo de leña y las mujeres gastan entre dos y cuatro horas por día en esta tarea estando muy cerca de la estufa, respirando el humo (Masera, 1995).

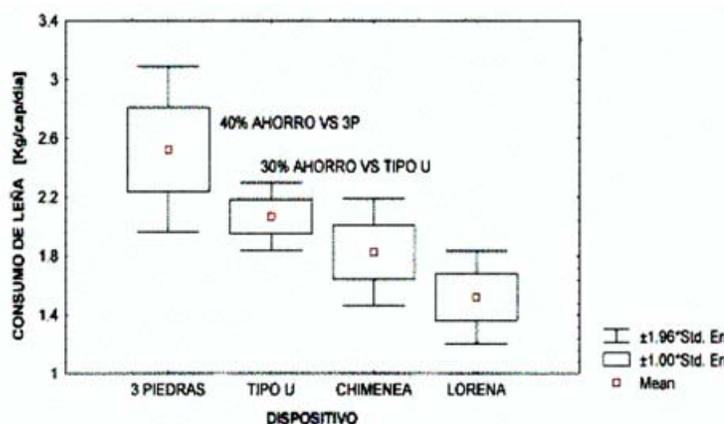


Figura 6. Ahorro promedio en la región del Lago de Pátzcuaro por el uso de la estufa Lorena. (Tomado de Masera et al., 1997).

Existe una experiencia limitada de los programas de estufas eficientes de leña en México (Olguín, 1994; Arias y Cervantes, 1994; Navia, 1992; Dutt et al., 1989). A principios de los años ochenta, instituciones gubernamentales efectuaron un esfuerzo a gran escala con resultados pobres y como consecuencia se abandonó el tema (Vargas, 1990). En los últimos años, se han desarrollado varias iniciativas en diferentes regiones de México, particularmente dentro de los estados de Michoacán, Chiapas y Oaxaca. Se ha trabajado con una diversidad de diseños de estufa y planes de diseminación (RETA, 2004; Cayetano, 1997; Díaz y Masera, 2003). La mayoría de estos grupos trabajan con alguna variante de la estufa Lorena y algunos en el sureste de México están promoviendo la estufa Justa y la Rocket portátil. En general, estos programas de estufas mejoradas se desarrollan en el ámbito local (a nivel de comunidades) o regional; y son comúnmente parte de iniciativas mayores dirigidas a la restauración de los bosques locales, la conservación de la biodiversidad o parte de las acciones de organizaciones campesinas.

Los esfuerzos se concentran principalmente en la construcción de estufas con poco o ningún seguimiento, las estufas son total o parcialmente subsidiadas, y se sigue haciendo énfasis en la autoconstrucción. Algunas de las instituciones que promueven estos programas han dado mayor importancia a las prioridades y necesidades de las usuarias y con esto se ha incrementado el nivel de aceptación de las estufas. El año pasado, el gobierno mexicano comenzó a reactivar sus actividades

en el tema, principalmente a través de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y la Comisión Nacional para la Prevención contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS). Como en el ámbito mundial, en México se ha tomado la salud de las familias como la principal preocupación para la promoción de las estufas eficientes.

El Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural de Apropiada A.C. (GIRA), una organización no gubernamental local y el Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIECO) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) han estado colaborando desde mediados de los años noventa para desarrollar y aplicar un programa multi-institucional y de largo plazo encaminado al desarrollo y promoción de un modelo sustentable para el uso de la leña en los hogares mexicanos; basado en el concepto de uso múltiple de combustibles (Maser et al., 2000).

En colaboración con el Grupo de Energía y Recursos (ERG) de la Universidad de California, Berkeley y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO); además de varias instituciones locales, GIRA y el CIECO han realizado estudios detallados sobre los patrones de uso de la leña y sus implicaciones socioculturales, económicas, ambientales y de salud (Maser et al., 1997; Saatkamp et al., 1998, Maser y Navia, 1997). También se ha obtenido información sobre la contaminación interior generada por los fogones tradicionales y las enfermedades asociadas a esas sustancias; así como la disminución de las concentraciones y los beneficios por usar tecnologías más limpias.

Un constante proceso de innovación y adaptación de tecnología ha llevado al desarrollo de una nueva estufa eficiente y limpia llamada “*Patsari*”. Esta estufa ha sido diseñada con la participación de las usuarias, promotores, técnicos e investigadores para asegurarse que cubre las necesidades de las familias. Asimismo, antes de difundirla masivamente, se construyeron varios prototipos en diferentes comunidades de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro, para validar su funcionamiento y la facilidad de adaptación por partes las usuarias (Maser et al., 2005). En el capítulo 3 se describe con mayor detalle las características de la estufa Patsari y del proyecto para su difusión.

## **2.3 Eficiencia y metodologías para la evaluación de estufas de leña**

### **2.3.1 “Eficiencia” y principales índices utilizados**

El concepto de eficiencia se basa en las consideraciones termodinámicas que se utilizan para evaluar el funcionamiento de un dispositivo. Es un concepto de ingeniería y según la primera ley de la termodinámica, la eficiencia de un dispositivo para una operación específica, es el cociente de la energía obtenida y la energía suministrada. Por otro lado, según la segunda ley, la eficiencia es el cociente de la salida real del trabajo y la salida posible máxima del trabajo, para la misma tarea. Mientras que la primera ley de la eficiencia proporciona el desempeño energético, la segunda ley proporciona la eficiencia de los dispositivos para realizar una tarea dada.

Con base en lo anterior, y de manera general, podemos decir que para una estufa de leña la entrada es la energía de la leña utilizada y la salida es el alimento cocinado. Ambas cantidades no son fáciles de medir en una estufa de este tipo (FAO, 1993).

Primeramente habrá que considerar la energía de entrada. Hay dos aspectos importantes de estos sistemas que lo hacen difícil. El primero de ellos se refiere al hecho de que un dispositivo de combustible sólido de la capacidad que estamos considerando no es un sistema de alimentación continuo. Es decir el combustible no está disponible todo de un momento, el usuario tiene que introducir el combustible en la estufa y hacer esto frecuentemente. El número de operaciones que reaprovisionan de combustible puede ser grande. Esto hace difícil de supervisar la entrada del sistema con un suficiente grado de confiabilidad. Al cocinar, la leña tarda en quemarse y se requiere empujar los pedazos frecuentemente para mantener el fuego. El otro aspecto se refiere al tipo de combustible que se utiliza, el cual, debido a su procedencia es muy heterogéneo, y el tamaño y las cantidades que se utilizan son muy variadas, además el contenido de humedad hace más difícil la operación del dispositivo en condiciones controladas.

Por muchos años se han sugerido diversas metodologías para evaluar el funcionamiento de una estufa, y se ha intentado expresar por un solo número designado generalmente como la “*eficiencia*”. Pero el sistema de una estufa de leña es demasiado complejo como para ser capturado por un número. Los componentes del sistema son el usuario, el combustible, la combinación de la olla-estufa, los componentes de la estufa (chimenea, cuerpo, conductos, etc.), y el alimento que se cocinará. Cada componente tiene su entrada al sistema y afecta el resultado. La ejecución de pruebas en el sistema entero es muy compleja y producirá resultados que son muy difíciles de interpretar.

En una estufa de leña, el calor es generado por la combustión parcial de la madera. Algo del calor generado es transferido, por radiación y convección, de la cama de fuego y los gases al recipiente, y algo de él se utiliza para cocinar el alimento. De aquí se desprende, como una primera aproximación, diferentes conceptos de eficiencia o eficiencias parciales que pueden ser consideradas para este tipo de dispositivos (VITA, 1985):

$$\begin{aligned}
 \text{eficiencia de combustión } (\eta_c) &= \frac{\text{Calor generado por la combustión}}{\text{Energía potencial de la leña}} \\
 \text{eficiencia de transferencia de calor } (\eta_t) &= \frac{\text{Calor total en el recipiente}}{\text{Calor total generado}} \\
 \text{eficiencia del recipiente } (\eta_r) &= \frac{\text{Calor neto que entró al recipiente}}{\text{Calor total generado}} \\
 \text{eficiencia de control } (\eta_{cc}) &= \frac{\text{Calor absorbido por el alimento}}{\text{Calor neto que entró en el recipiente}} \\
 \text{eficiencia de cocinado } (\eta_c) &= \frac{\text{Calor absorbido por el alimento}}{\text{Energía potencial de la leña}} \\
 \text{eficiencia "total" } (\eta_T) &= (\eta_c) \times (\eta_t) \times (\eta_r) \\
 \text{eficiencia "final" } (\eta) &= (\eta_{cc}) \times (\eta_c) \times (\eta_t) \times (\eta_r)
 \end{aligned}$$

Ninguna de estas “eficiencias” son sencillas de determinar por sí mismas, por lo cual se han generado indicadores del funcionamiento de los dispositivos que, si bien son más sencillos de evaluar e interpretar, son más útiles para quien desarrolla este tipo de tecnología. Uno de estos indicadores utilizado como índice del funcionamiento de una estufa de leña es el **consumo específico de energía**, que se define como la cantidad de energía requerida para realizar una tarea de cocinado determinada.

Cuando se aplican estos indicadores, se debe tener presente que la eficiencia no es una cantidad física absoluta sino un cociente que uno mismo define y que depende de las condiciones bajo las cuales un proceso ocurre y de cómo se mide la entrada-salida.

### 2.3.2 Metodologías para la evaluación de estufas de leña

Durante muchos años el principal objetivo de la implementación de estufas eficientes de leña ha sido el ahorro en el consumo de combustible y la disminución de los efectos negativos ambientales y de salud asociados al uso de leña. Las metodologías para evaluar las tecnologías se han enfocado en comparar la estufa tradicional localmente utilizada *versus* la estufa mejorada.

Existen diversas metodologías para la evaluación de estufas de leña, tales como: Woodburning Stove Group Standard, Thailand Standard Method for Testing Cooking Stove Performance, State Standard of the People’s of China, Indian Standard on Solid Biomass Chulha-Specification y la más reciente,

Stove Performance Testing Protocol (Shell, 2004). Todas ellas han intentado combinar dos puntos de vista relacionados con la tecnología, uno desde la perspectiva de los desarrolladores de tecnología interesados en conocer la eficiencia y la potencia del dispositivo, y otro desde la perspectiva del usuario, interesado en ahorrar combustible y cocinar más cómodamente. Este acercamiento no ha sido sencillo y aún existen puntos de discusión al respecto, sobre todo cuando el objetivo de evaluar va más allá de conocer el funcionamiento de una estufa, es decir, con un enfoque de innovación y mejora de la tecnología.

Todas las metodologías mencionadas se han basado en la que ha sido la más aceptada internacionalmente, la cual fue desarrollada en los años ochenta por Volunteers in Technical Assistance (VITA, 1985) y Baldwin (1986) y que ha sido recientemente actualizada por la Universidad de California y el Aprovecho Research Center (Shell, 2004). El objetivo de esta metodología es evaluar el desempeño de estufas eficientes de leña mediante la aplicación de tres pruebas estándar:

- (1) **Prueba de ebullición de agua, PEA** (Water Boiling Test, WBT)
- (2) **Prueba de cocinado controlado, PCC** (Controlled Cooking Test, CCT) y,
- (3) **Prueba de funcionamiento en cocina, PFC** (Kitchen Performance Test, KPT).

Estas pruebas predicen el comportamiento de los dispositivos en condiciones controladas de laboratorio (PEA y PCC) y en condiciones reales de uso (PFC). A continuación se describe brevemente cada prueba, en el Anexo 1 se describen de manera detallada.

### 1) Prueba de ebullición de agua (PEA):

Es una prueba de simulación de cocinado donde el agua toma el lugar de los alimentos. A partir de esta prueba se calcula un índice denominado eficiencia térmica ( $\eta_t$ ) también llamado *porcentaje de calor utilizado* (PHU), el cual se utiliza como un indicador de la eficiencia de la estufa. La prueba consta de una fase de alto poder en la cual llevamos cierta cantidad de agua hasta la temperatura de ebullición lo más rápidamente posible y una fase de bajo poder en la cual mantenemos hirviendo el agua durante 45 minutos. La prueba consta de tres etapas:

- a. La primera etapa (*alto poder-inicio en frío*), se inicia con la estufa a temperatura ambiente y, utilizando una cantidad conocida de leña, se pone a hervir agua en una olla de tamaño determinado verificando el tiempo y la cantidad de leña consumida para esta tarea.
- b. Para la segunda etapa (*alto poder-inicio en caliente*), se coloca nuevamente la olla con la misma cantidad de agua a temperatura ambiente y, con la estufa caliente, se pone a hervir el agua contabilizando el tiempo y el combustible utilizado. Estas dos fases son para identificar diferencias en funcionamiento entre una estufa cuando está fría y cuando está caliente.
- c. La última etapa (*bajo poder-fuego lento*) consiste en mantener (con la estufa caliente) una misma cantidad de agua durante 45 minutos a una temperatura 3 grados por debajo del punto de ebullición, simulando una tarea de cocinado "a fuego lento".

La eficiencia térmica se calcula de la siguiente manera: multiplicando la masa total de agua (P), por el calor específico del agua ( $4.186 \text{ J/g}^\circ\text{C}$ ) y el cambio en la temperatura ( $T_f - T_i$ ); más el producto de la masa de agua evaporada ( $W_v$ ) multiplicado por el calor latente de evaporación ( $2260 \text{ J/g}$ ). El denominador corresponde al producto del equivalente de leña seca consumida ( $f_d$ ) multiplicado por el valor calorífico neto correspondiente al tipo de leña utilizada en la prueba (LHV) ( $\text{MJ/kg}$ ).

$$\eta_t = \frac{4.186 * (P) * (T_f - T_i) + 2260 * (W_v)}{f_d * LHV}$$

## 2) Prueba de cocinado controlado (PCC):

Es una prueba para el consumo de combustible en una tarea de cocinado específica, se utiliza para comparar el funcionamiento en la preparación de una comida estandarizada en diferentes dispositivos.

Se calcula el peso de leña consumida por peso de alimentos preparados como índice de funcionamiento de cada estufa. Este indicador se denomina consumo específico de combustible (CEC), se refiere a la cantidad de combustible requerido para llevar a cabo una tarea de cocinado. Se calcula el peso de leña consumida (equivalente seco) por peso de alimentos preparados (kg):

$$CEC = \frac{F_d}{W_f}$$

F<sub>d</sub>: Equivalente de leña seca consumida  
W<sub>f</sub>: Peso total de alimento preparado

La prueba de cocinado controlado (PCC) está diseñada para evaluar el funcionamiento de la estufa mejorada en relación con estufas comunes o tradicionales en la ejecución de una tarea simple que simule la práctica real de cocinado de algún alimento tipo. La prueba está diseñada de tal manera que se minimice la influencia de otros factores y pueda ser reproducido.

## 3) Prueba de funcionamiento en cocina (PFC):

Esta prueba evalúa el comportamiento de las estufas en condiciones reales de operación, se analiza el consumo de energía por parte de una familia durante un ciclo y se evalúan aspectos relacionados al funcionamiento de la estufa y factores referentes al uso de combustible, salud, costumbres de alimentación, condiciones de vida, aceptación de la tecnología, entre otros. El índice que se obtiene es el consumo específico diario y se refiere a la cantidad de leña consumida por adulto estándar por día (kg leña/cáp/día)

La evaluación del consumo de combustible se realiza para encontrar diferencias en el uso de combustible entre hogares que usan estufas tradicionales y hogares que usan la nueva estufa, así como la utilización de diferentes combustibles. A fin de comparar las estufas, la prueba puede realizarse de dos maneras:

- Haciendo mediciones diarias de consumo de combustible en la estufa tradicional durante una semana y luego hacer otra vez las mediciones una vez que se ha construido la estufa mejorada y compararlas. Esto se denomina estudio de tipo longitudinal.
- La segunda alternativa es comparar el uso de combustible en dos grupos de familias durante una semana: un grupo que use la estufa tradicional y el otro grupo que use la estufa mejorada. Esto es un estudio con grupo de control de tipo transversal, donde el grupo de control son las familias que todavía usan la estufa tradicional. Para este caso es necesario encontrar dos grupos de usuarios que condiciones socioeconómicas y ambientales similares, asumiendo que estas variables influyen en el consumo de leña.

El uso de leña se evaluará durante siete días consecutivos, en una muestra de hogares previamente seleccionada. El primer día se pesa la leña (y se registra el contenido de humedad) que se usará el día dos. A partir del día dos se mide el consumo de leña, (leña inicial menos leña final), así como el número de personas que comieron en el hogar (por sexo y edad). En hogares que utilizan además de leña gas LP, se registra también el contenido inicial del cilindro de gas utilizado (en kg), el cual se volverá a registrar después de los siete días.

El índice que se obtiene es el **consumo específico diario** y se refiere a la cantidad de leña (o gas) consumida por adulto estándar por día (kg/cáp/día). El concepto de adulto estándar corresponde a un factor que se aplica debido a que el consumo de combustible de un niño, de una mujer o de un anciano se considera menor que el de un hombre adulto. Esta corrección se realiza para cada uno de los miembros de la familia según la Tabla 2.

Tabla 2. Factor de corrección para Adulto Estándar

	<b>Factor de corrección</b>
Niños: 0-14 años	0.5
Mujeres: más 14 años	0.8
Hombres: 15-59 años	1.0
Hombres: más de 59 años	0.8

Fuente: FAO (1983)

Esta metodología es útil para conocer el comportamiento y el funcionamiento de las estufas de leña en diferentes condiciones de operación, es posible comparar diferentes dispositivos y conocer el impacto que el uso de ellos tiene en la vida de los usuarios finales.

## 2.4 Principios de diseño de estufas

Como se menciona anteriormente, las características de la combustión y la pirolisis en la leña dependen en gran medida de la proporción de sus componentes, pero también de las condiciones del proceso de combustión, el cual consiste en la liberación de la energía térmica del combustible (FAO, 1993). Existen varios factores importantes que influyen la combustión, tales como: a) las características físicas y químicas del combustible; b) la relación combustible/aire; c) la temperatura de la flama; d) el modo de suministro del combustible y; e) el suministro de aire primario y secundario. El punto a) es una condición propia del combustible, pero los otros puntos, b) a e), son condicionados en gran medida por el dispositivo utilizado, en este caso la estufa.

De manera general las estufas deben ser apropiadas para realizar varias tareas (calentar, cocer, freír, hornear, hervir, etc.) y permitir la preparación de alimentos en recipientes de distintas formas (ollas, sartenes, comales, etc.) y materiales (barro, metal, peltre). Los factores que determinan que tan apropiado es el sistema son diversos, destacan, la velocidad de cocinado, control adecuado del fuego y del calor de salida, la seguridad de la estufa, la vida útil y la facilidad de proporcionarle mantenimiento y por supuesto, el combustible utilizado (cantidad y tamaño).

### 2.4.1 Principios básicos de funcionamiento

De acuerdo con Díaz-Jiménez y Masera (2001b) el funcionamiento de una estufa mejorada de leña puede esquematizarse de la siguiente manera: básicamente está formada por una cámara de combustión (CC), hornillas (una hornilla principal "Hp" y una o dos hornillas secundarias "Hs"), túneles interiores (T) y chimenea (Ch) (Figura 7). En la CC se quema la leña y los productos de la combustión transfieren calor a la hornilla principal (H1), a las paredes, a las hornillas secundarias (HS) y finalmente a la chimenea, la cual permite eliminar los productos de la combustión hacia el ambiente.

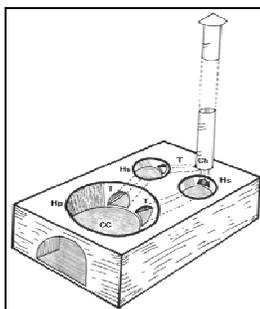


Figura 7. Esquema general de una estufa de leña mejorada

Dentro de la estufa ocurren fenómenos de transporte de masa, momento y energía, transferencia de calor por conducción, convección y radiación; reacciones químicas y transiciones de fase. Todos procesos irreversibles y fuera de equilibrio.

Respecto a la transferencia de calor el balance cualitativo de energía se resume como: el calor generado por la leña proviene de la combustión y está dado por el valor calorífico de la leña menos las pérdidas de energía para la formación de vapor de agua a partir del hidrógeno y las pérdidas de calor debidas a la combustión incompleta.

Este calor neto proporciona la energía para el cocinado, sin embargo antes de calentar los recipientes, existen pérdidas en el cuerpo de la estufa y en el ambiente por la chimenea. Esta relación puede expresarse de la siguiente manera (Sheinbaum, 1988):

$$Q_{ollas} + Q_{paredes} + Q_{gas} = Q_{total} - Q_{combinc} + Q_{evap} + Q_{hidr}$$

Donde:

- $Q_{ollas}$  = Calor que se transfiere a las ollas por conducción y radiación principalmente. Este será el calor útil que llega a la olla. A éste habrá que restarle las pérdidas por convección, radiación y evaporación de la propia olla.
- $Q_{paredes}$  = Calor a las paredes. Cuando la estufa está fría se pierde energía en calentar el cuerpo de ésta. Cuando se calienta, la diferencia de temperatura entre el exterior de la estufa y el ambiente provoca pérdidas por radiación y convección.
- $Q_{gas}$  = Calor transportado por el flujo de gases de combustión. Las pérdidas de calor se presentan por la diferencia de entalpía de calor debido a la diferencia entre el aire que entra a la estufa y los gases calientes que salen por la chimenea.
- $Q_{total}$  = Calor total. Es el valor calorífico superior de la leña.
- $Q_{combinc}$  = Calor perdido debido a la combustión incompleta de la leña. Parte del potencial de calentamiento de la leña se pierde debido a los productos incompletos de la combustión, como el CO y no se queman completamente.
- $Q_{evap}$  = Calor perdido por evaporación del contenido de humedad de la leña. La leña seca tiene en promedio un contenido de humedad del 15%. Esto provoca que parte del calor de combustión se utilice en evaporarla.
- $Q_{hidr}$  = Calor perdido para evaporar el agua producida por la combustión del hidrógeno contenido en la leña.

Los diferentes aspectos mencionados: proceso de combustión, mecanismos y pérdidas en la transferencia de calor, configuración del dispositivo, materiales, etc., permiten establecer ciertos principios básicos de diseño de estufas que, en la medida de lo posible, habrán de tomarse en cuenta. Algunos de estos principios han dado lugar al desarrollo de distintos dispositivos en todo el mundo.

De acuerdo con Bryden, *et al* (2005) mejorar la eficiencia de combustión no es aparentemente una ayuda para que la estufa use menos combustible. Por el contrario, mejorar la eficiencia en la transferencia de calor a la olla sí produce una gran diferencia. Mejorar la eficiencia en la combustión es necesario para reducir el humo y las emisiones que perjudican la salud. Por su parte mejorar la eficiencia en la transferencia de calor puede drásticamente reducir el consumo de combustible. Ambas funciones pueden ser realizadas en una estufa bien diseñada.

Los dos factores más importantes para poder elevar la cantidad de calor que entra a una olla o un comal son: 1) mantener los gases que tocan las superficies tan calientes como sea posible y, 2) forzar

que los gases calientes rocen contra la superficie rápidamente, no lentamente. Para lograr aprovechar la energía proveniente de la combustión de la leña en las tareas de cocinado y tener la menor cantidad de pérdidas de calor, no basta tener un combustible en condiciones óptimas, o un buen diseño de la cámara de combustión, es necesario tomar en cuenta una serie de factores que tienen que ver con la configuración del dispositivo, la manera de transferir el calor y la forma de conducir los gases de combustión, para esto es necesario tomar en cuenta en el diseño lo siguiente (Bryden et al., 2005):

1. **Dimensiones y material de la cámara de combustión**, que asegure mantener las temperaturas adecuadas, para lograrlo es necesario aislar alrededor del fuego para ayudar a que la combustión tenga la mayor temperatura posible. Un fuego más caliente quema más gases y produce menos humo. Colocar una chimenea interna y aislada directamente arriba del fuego puede contribuir a una mejor combustión. La chimenea debe ser aproximadamente tres veces más alta que el diámetro de la cama donde este el fuego. Colocar una chimenea corta encima del fuego estimula una fuerte corriente de aire y ayuda a que el fuego sea caliente. El humo entrará en contacto con las llamas en esta chimenea interior y se quemaran completamente, reduciendo las emisiones.
2. **Entradas de aire primario y secundario**, que permitan tener aire suficiente o en exceso para completar la combustión sin que éste enfríe los gases de combustión. De ser posible, la leña que se va a quemar no debería estar sobre el piso de la cámara de combustión para que el aire pueda pasar por debajo de los leños y a través del carbón. Se debe limitar la cantidad de aire frío que entra a la cámara de combustión usando una entrada para la leña lo más pequeño posible. Una cierta cantidad de exceso de aire es necesaria para obtener una combustión completa. Pre-calentar al aire ayuda mantener una combustión limpia.
3. **Conductos interiores**, que permitan el paso de los gases calientes y transfieran el calor a las hornillas, ollas u otras superficies en donde se encuentren los alimentos que se desean cocinar. Aumentar la transferencia de calor a la olla asegurando que la temperatura de los gases que fluyen por la estufa esté lo más caliente posible. Es necesario aislar todos los espacios por donde fluyen los gases, si hay suficiente área dentro de la estufa por donde pueda pasar el calor, los gases que salen de la chimenea saldrán más fríos.
4. **Chimenea** para la salida de los humos, esta debe asegurar que el flujo de los gases tenga la velocidad suficiente para que una vez que transfieran el calor salgan hacia el exterior. Se debe procurar mantener la velocidad de los gases calientes que salen por la chimenea y que rozan contra la olla. Los gases veloces pasan por una capa de aire quieto que previene que gases con menos velocidad toquen la superficie de la olla o plancha.

## 2.5 Retos y oportunidades en el diseño y evaluación de estufas eficientes

Cientos de estufas eficientes han sido diseñadas y diseminadas alrededor del mundo, generalmente estas estufas se evalúan con métodos de laboratorio y se asume que su funcionamiento será igual en campo. Son muy pocos los programas que han medido la adopción de las estufas y sus impactos en condiciones reales. Las estimaciones en la reducción en el consumo de leña se han basado en pruebas de funcionamiento y pruebas de laboratorio o pruebas de campo extremadamente controladas.

Las pruebas de funcionamiento de las estufas pueden ayudar a los programas de implementación masiva de estufas eficientes tanto en los retos de diseño como de difusión. Las pruebas de laboratorio son vitales durante las etapas de diseño de los programas y de la tecnología. Éstas proveen información sobre la eficiencia con la cual diversos modelos de estufas transfieren la energía del proceso de la combustión al alimento. Además, permiten explorar rápidamente el funcionamiento de diversos materiales y la geometría de las estufas. En contraste, las pruebas en el campo proporcionan una visión de la realidad que permite a los diseñadores conocer el comportamiento de las estufas estando en manos de las usuarias. Este complemento de “visiones” resulta ser extremadamente útil y necesario.

La PEA se ha utilizado a menudo como la prueba estándar para toda la actividad de la estufa a expensas de pruebas de campo, sin embargo, la PEA es una herramienta para entender los principios de funcionamiento de la estufa y del efecto al cambiar ciertos parámetros del diseño. Con base en la evidencia, los ahorros reales del combustible derivados solamente de PEA son inexactos. A excepción del consumo de combustible en la prueba de baja potencia, existe poca evidencia de una relación simple entre la eficiencia o el consumo de combustible de las pruebas de laboratorio y las de campo. Además, la adopción de la estufa y el uso dependen de muchos otros factores incluyendo clima, normas culturales, combustibles y preferencias específicas del alimento que se cocina.

Indicadores como el consumo de combustible obtenido de pruebas de laboratorio en diferentes situaciones controladas de operación, aunque tienen el potencial de ser utilizado como predictor de los ahorros reales del combustible, requieren de evaluaciones integrales que permitan encontrar asociaciones entre los resultados de laboratorio y los de campo, es necesario antes de que un indicador derivado de pruebas laboratorio se pueda recomendar como predictor del consumo de combustible contar con mayor información procedente de otras fuentes (Bailis, et al., 2007) .

Uno de los mayores retos es combinar en el diseño de una estufa los objetivos técnicos, ambientales, sociales y económicos. Podemos mencionar entre los principales objetivos técnicos: (a) lograr la máxima eficiencia del proceso de combustión y, (b) que la transferencia de calor de la fuente al dispositivo de cocción (olla) sea la mayor posible. Por su parte los objetivos de tipo social y económico son: (a) tener el menor costo posible; (b) ser aceptado por la mayoría de los usuarios, (c) ofrecer beneficios reales (disminución del consumo de leña y de riesgos a la salud), (d) ser fáciles de producir o adquirir en las localidades y, (e) ser rentables para el usuario. Objetivos ambientales: (a) reducir emisiones perjudiciales al ambiente como los gases de efecto invernadero y, (b) disminuir la contaminación en el interior de las viviendas.

Para garantizar el buen funcionamiento del dispositivo, no sólo deben tomarse en cuenta aspectos netamente técnicos sino también aspectos sociales y culturales, tales como hábitos y prácticas de cocinado, costumbres alimenticias, preferencias relacionadas con el sabor de los alimentos, utensilios de cocina e incluso significados religiosos en torno al fuego y los alimentos (Díaz-Jiménez y Masera, 2001a). Por estas razones es necesario un proceso de investigación constante que incluya a investigadores de diversas disciplinas así como la participación de los usuarios, promotores y técnicos.

En años recientes han sido enormes los esfuerzos por desarrollar reglas específicas de diseño partiendo de la teoría, pero como los procesos de combustión y de transferencia de calor son tan complejos, la teoría ha estado limitada a explicar el proceso. Además, existe una dificultad intrínseca en la teoría para incorporar los objetivos sociales en el desarrollo de determinada tecnología. De hecho, aun existen aspectos no resueltos en el diseño de estufas eficientes de leña relacionados con los principios básicos de combustión, transferencia de calor y funcionamiento. Evaluaciones recientes (Berrueta, et al., 2007; Bailis, et al., 2007) muestran cómo un análisis puramente experimental o de laboratorio es insuficiente e inadecuado para entender la dinámica real del uso, los procesos de adopción y evolución de los dispositivos, los impactos a mediano y largo plazo y las transformaciones que se originan en términos sociales y culturales.

# CAPÍTULO 3

## ESTUDIO DE CASO: PROYECTO PATSARI, MICHOACÁN

### 3.1 Descripción de la zona de estudio

El Proyecto Patsari se desarrolla en la Región Purhépecha del estado de Michoacán, la cual tiene un área de 653,547 has de las cuales 323,068 has son bosques. La vegetación consiste sobre todo en bosques de Pino-Roble. En el año 2000, la población total era de 732,480 habitantes, distribuidos en 927 comunidades y 19 municipios. En zonas rurales cerca del 95% de los hogares utilizan leña como fuente energética primaria.

La Región Purhépecha se distingue por la presencia de lagos, ciénegas, sierras, llanos y volcanes aislados. Allí se encuentra la principal elevación del estado de Michoacán, el volcán Tancítaro (3,840 msnm), y los cerros Patamban, El Tecolote, El Zirate, El Frijol, La Virgen y El Capén, además del famoso volcán Parícutín, que hizo erupción en 1943.

Debido a estas características, más del 80% de la superficie presenta climas templados y semifríos, con precipitaciones entre los 1,000 y 1,200 mm cúbicos por año. Los lagos de Pátzcuaro y Zirahuén constituyen otro importante elemento que contribuye a la diversidad del paisaje regional; sus áreas de captación son cuencas cerradas, que comprenden casi la totalidad de los municipios de Pátzcuaro, Erongarícuaro, Quiroga y Tzintzuntzan y parte de Salvador Escalante, Tingambato y Nahuatzen (Figura 8).

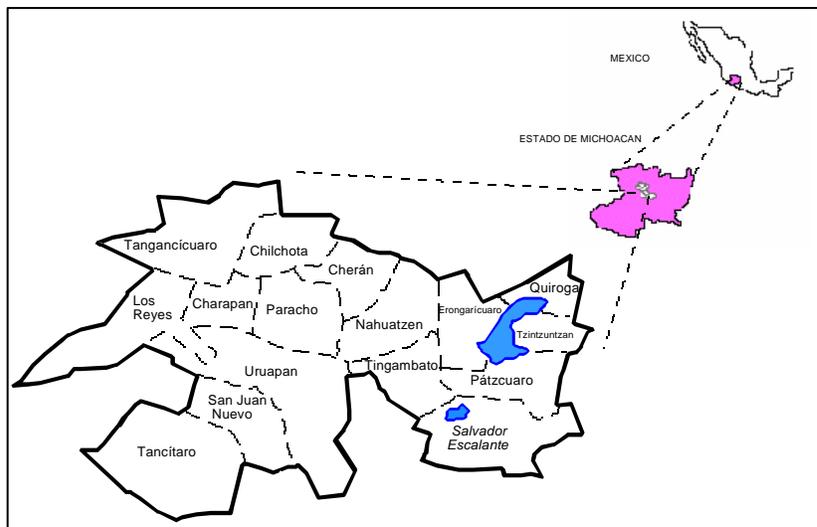


Figura 8. Localización de la Región Purhépecha, Michoacán.

En estos municipios la gran mayoría de la población es indígena y conserva muchas de las tradiciones de la etnia Purhépecha. Su alimentación está basada en maíz, frijol y pescado, sobre todo las comunidades que viven alrededor del lago de Pátzcuaro. En las comunidades normalmente no se tienen servicio de agua potable, consumen el agua de los manantiales, hay muy pocos hospitales regionales que no cuentan con todos los medicamentos necesarios. Sólo algunas comunidades indígenas cuentan con los servicios básicos de agua, luz y drenaje; para servicios de salud y educación se tienen que trasladar a lugares cercanos, pero más grandes (Uruapan, Pátzcuaro o Morelia).

Es en esta región donde se desarrolla el proyecto denominado “*Mejoramiento del nivel de vida de los hogares rurales, mediante el uso sustentable de la leña*” que actualmente ejecuta el CIECO-UNAM en coordinación con GIRA, A.C. dicho proyecto se ha dado a la tarea de desarrollar, difundir, evaluar y monitorear la implementación de un modelo de estufa eficiente de leña llamado *Patsari* (Figura 9).



Figura 9. Estufa *Patsari*

La Estufa *Patsari* es una tecnología propia que es resultado de un proceso participativo de innovación y desarrollo tecnológico en el que han participado, en coordinación con GIRA, A.C y el Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIECO), el Instituto de Ingeniería (II), ambos de la UNAM, técnicos comunitarios, promotores y amas de casa de la región Purhépecha del estado de Michoacán. En junio de 2006 el Proyecto *Patsari* fue galardonado con el 1er lugar del Premio Ashden para la Energía Sostenible, uno de los principales premios mundiales a la energía ecológica.

Este proyecto trabaja simultáneamente con las usuarias finales, micro-empresarios, industrias familiares dedicadas a la elaboración de tortilla, ONG's y con las autoridades locales para: a) facilitar la diseminación y adopción de estufas de leña limpias y eficientes, mediante mecanismos replicables; b) fortalecer las micro-empresas locales; c) reducir los impactos a la salud y al ambiente asociados al uso de leña; y d) sensibilizar y capacitar a mujeres y constructores locales en la promoción, difusión, construcción, uso y mantenimiento de las estufas eficientes de leña.

Este esfuerzo cuenta además con la colaboración de las siguientes instituciones: Universidad de California, Irvine; Instituto de Ingeniería, UNAM; Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) y el Instituto Nacional de Ecología (INE). El respaldo financiero ha sido proporcionado por el Programa de Energía Doméstica de la Fundación Shell y por instituciones mexicanas como CONACYT, CONAFOR, COFEPRIS, COINBIO e INE entre otras.

### 3.2 Proyecto *Patsari*, un enfoque “sistémico” e integral

Como se mencionó anteriormente, la energía residencial y el uso de estufas eficientes están nuevamente abriendo camino en la agenda internacional, ahora impulsados por diversos intereses entre los que destacan los aspectos locales como el medio ambiente, cuestiones socioculturales y particularmente la salud de las familias, hasta cuestiones globales vinculadas a las emisiones de gases de efecto invernadero. Para enfrentar estos retos, el CIEco-UNAM en coordinación con GIRA, A.C. han implementado un programa de estufas eficientes con un enfoque “sistémico” e integral.

Este programa representa un esfuerzo multi-institucional dirigido a mejorar la sustentabilidad de la energía residencial en el México rural. En el Anexo 2 se encuentra el artículo publicado en Energy for Sustainable Development (Maser et al, 2005) titulado “***From cookstoves to cooking system: the integrated program on sustainable household energy use in Mexico***”, que forma parte de la presente investigación. A continuación se destacan los aspectos más importantes del Proyecto *Patsari* que se encuentran contenidos en dicha publicación.

La experiencia ha mostrado que un programa exitoso de estufas eficientes de leña debe ir más allá de la construcción o instalación de éstas, debe ser un programa integral que analice con detalle el “sistema de cocinado”. Para comprender este aspecto se debe trabajar simultáneamente en temas como: la innovación de tecnología, esquemas de financiamiento y desarrollo de mercados; sin olvidarse del seguimiento y evaluación de los beneficios reales tanto a la salud de las familias como al ambiente local y global. Estos programas también deben fomentar enfoques participativos en los cuales se involucre a las mujeres para brindar una adecuada atención a las prioridades y preferencias de las usuarias así como para entender la dinámica sociocultural que se da en el proceso de cocinado de los alimentos en una familia rural, lo anterior representa el enfoque del Proyecto **Patsari**.

Los componentes principales del Proyecto **Patsari** son: (a) innovación de tecnología, (b) generación de un paquete para la difusión de estufas eficientes y desarrollo de mercados, (c) desarrollo de pequeñas empresas, (d) seguimiento y evaluación, y (e) fortalecimiento del programa. Uno de los resultados importantes es el desarrollo y difusión de un nuevo modelo de estufa eficiente llamada “Patsari”.

A continuación se describen los principales componentes de este proyecto:

#### **a) Innovación de tecnología**

Una de las metas principales del programa es realizar un proceso continuo de innovación. Para ello, se ha construido un Laboratorio de Estufas, donde se prueban los nuevos diseños y materiales. Entre las pruebas se incluyen los perfiles de emisiones de contaminantes así como medidas detalladas del desempeño termodinámico de las estufas. Mediante un proceso participativo en el cual se realizan pruebas en el Laboratorio y en campo, y a partir de una retroalimentación constante se ha logrado crear nuevos modelos de estufas. Así se desarrolló el modelo de estufa llamado **Patsari**; La estufa Patsari está orientada a la difusión masiva, es construida con la ayuda de un molde metálico e incluye varias piezas fijas hechas a la medida.

#### **b) Diseminación de estufas**

La diseminación de las estufas está basada en un enfoque participativo que pretende establecer pequeños negocios que operen de manera sustentable. Los actores principales en el proceso de diseminación son los constructores de estufas, las usuarias y los fabricantes de las piezas fijas de la estufa. El primer paso es la capacitación a constructores de estufas. Para asegurar la calidad de las estufas construidas, a cada estufa se le asigna un número de identificación y se llena una ficha técnica con información sobre la familia y la construcción de la estufa. Posteriormente se realizan vistas de seguimiento. Para ayudar a crear el mercado de las estufas eficientes el programa incluye dos mecanismos: a) sensibilización y talleres de capacitación a las usuarias (paquete de capacitación) y b) un mecanismo financiero (paquete financiero). El incentivo económico es fundamental para acelerar la adopción de las estufas eficientes.

#### **c) Desarrollo de pequeñas empresas**

La adecuada integración del “sistema de cocinado” ha requerido la incorporación de proveedores locales para los accesorios de la estufa. Se trabaja con herreros para la elaboración de los moldes, la chimenea y la base de la chimenea. Mediante la interacción con estas pequeñas empresas se ha logrado una retroalimentación muy importante para facilitar la elaboración de algunas piezas con el fin de garantizar su durabilidad. Asimismo, trabajar con estas pequeñas empresas aporta dos grandes ventajas: a) asegura la calidad, confiabilidad y los costos de las partes que se producirán en grandes cantidades, y b) fomentan la creación de empleo local y la generación de ingresos adicionales en la región.

#### **d) Seguimiento y evaluación**

Se ha realizado un esfuerzo especial para documentar y monitorear los beneficios reales generados por las estufas. Para esto se han realizado diversos estudios de investigación que se han integrado a un “paquete de monitoreo” desarrollado en colaboración con la Universidad de California, la Universidad de Liverpool, el Centro de Investigación Aprovecho, el Instituto Nacional de Ecología, el Instituto de Ingeniería y el Instituto Nacional de Salud Pública. Este paquete incluye: a) pruebas de funcionamiento de las estufas tanto en condiciones de laboratorio como de campo; b) el monitoreo de la contaminación intramuros, buscando la reducción de la concentración de partículas (PM2.5) y el monóxido de carbón; c) impactos a la salud, estudio a familias para detectar los beneficios de las estufas Patsari, principalmente la reducción de infecciones respiratorias agudas y otras enfermedades asociadas a la inhalación de humo de leña; y d) preferencias de las usuarias y su percepción en los cambios en su calidad de vida.

Adicionalmente se realiza el análisis del impacto global de los programas de diseminación de estufas mejoradas, tema que requiere mayor investigación. Específicamente, se busca determinar los factores de emisión y emisiones anuales de los principales gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> e hidrocarburos no metánicos: HCNM

#### **e) Fortalecimiento del programa**

Se pretende impulsar el uso sustentable de la leña en México. Para lograrlo, se está desarrollando un modelo de promoción y difusión de estufas que pueda ser aplicado a otras regiones del país sin importar el tamaño del proyecto. Asimismo, se pretende construir un Centro para la Investigación y Difusión de Estufas de leña, cuyos objetivos serán el intercambio de experiencias, brindar capacitación, ser un centro de pruebas y certificación de estufas; así como el diseño permanente de nuevos modelos.

Además se coordina la formación de una Red Nacional de Estufas de leña en colaboración con la Red Mexicana de Bioenergía y la Asociación Nacional de Energía Solar. Esta Red servirá para definir una serie de normas técnicas, de seguridad y salud para las estufas mejoradas así como para fomentar el intercambio de experiencias y acercamiento entre los diferentes grupos que trabajan en México. Igualmente se está trabajando para influir en las políticas nacionales relacionadas con el uso de la leña como combustible.

#### **Retos principales que enfrenta el Proyecto Patsari**

Con relación a la implementación de esta tecnología, han existido programas de estufas previos en los que la aportación de las familias consiste únicamente en participar con mano de obra. Por estos motivos los usuarios se resisten a pagar por una tecnología que en el pasado fue “gratuita”. Por otra parte, el mejoramiento de las condiciones de la cocina no es una actividad prioritaria para las familias ya que está asociada al trabajo de la mujer, el cual sigue sin valorarse adecuadamente; a pesar de que la mayoría de las familias considera que el humo es un problema.

La adopción de las nuevas estufas está asociada con cambios mayores en la cocina, las personas ven a la estufa Patsari como un bien material muy importante en el hogar, por lo que se construyen nuevas cocinas para la estufa, o se arregla la anterior, o se coloca la estufa Patsari junto a la estufa de gas, la cual generalmente está en el comedor donde las familias se reúnen para comer y platicar. Cuando esto ocurre, la adopción de la estufa Patsari es básicamente un proceso unidireccional: los hogares observan muy rápido los cambios de la limpieza de la cocina y es muy difícil que regresen al uso del fuego abierto. Paradójicamente, antes de adquirir su estufa, muchas familias prefieren tener la cocina construida o modificarla, lo cual implica una inversión económica considerable, lo cual demora la difusión de la estufa Patsari.

Actualmente se está trabajando para superar estos problemas y barreras que limitan el proceso de difusión de las estufas. Por ejemplo, se colabora estrechamente con las clínicas locales, para reforzar

la sensibilización y conciencia de las usuarias sobre la contaminación interior y sus efectos a la salud. Asimismo, se ha hecho más robusto el proceso de promoción-difusión de estufas buscando esquemas financieros para disminuir la inversión inicial.

### Lecciones aprendidas en el Proyecto Patsari

Los programas de difusión de estufas están pasando de ser meros proyectos de construcción a programas integrales que buscan mejorar la salud de las familias, así como brindar beneficios ambientales y socioeconómicos. Para que estos programas tengan éxito es necesario partir de un enfoque sistémico e interdisciplinario en el cual se contemple la innovación tecnológica, las necesidades y prioridades de las usuarias, el desarrollo de mercados, así como mecanismos financieros innovadores. También deben existir esfuerzos en el desarrollo y aplicación de esquemas de seguimiento y evaluación de la tecnología y del programa, para garantizar el óptimo funcionamiento y conocer los beneficios reales.

Existe la necesidad de apoyar programas de innovación y desarrollo continuo, donde las instituciones de investigación trabajen muy estrechamente con organizaciones locales que conocen con mayor detalle la problemática, para lograr nuevas estufas más limpias, económicas y sobre todo que cubran las necesidades de las familias. También se requieren encontrar mecanismos financieros innovadores y creativos que ayuden a superar el problema de la inversión inicial para la adquisición de las estufas.

Respecto a las usuarias, éstas deben tener una fuerte concientización sobre la problemática de la leña, así como de los beneficios de las estufas; pero sobre todo de la operación y mantenimiento de la tecnología. Finalmente, para que estos programas de mediano y largo plazo tengan éxito es necesario incluir el contexto político e insertar estos programas en un contexto de desarrollo rural sustentable.

### 3.3 Integración de estudios de investigación al Proyecto Patsari

Los estudios de investigación que se han realizado como parte del “paquete de monitoreo” han sido parte fundamental en el desarrollo del proyecto Patsari. Estos estudios han permitido conocer desde diversos ángulos y perspectivas todos los componentes del proyecto así como la compleja problemática asociada a la cocción de alimentos en el medio rural. Se da cuenta de ello en el artículo publicado en Energy for Sustainable Development (Masera et al, 2007) titulado “**Impact of “Patsari” improved cookstoves on Indoor Air Quality in Michoacan, Mexico**”, el cual se encuentra en el Anexo 3 y forma también parte de la presente investigación.

En dicho artículo se demuestra que la estufa Patsari proporciona medios eficaces para reducir la contaminación atmosférica en el interior de las cocinas y que las ventajas potenciales de instalar estas estufas son considerables. La Figura 10 muestra un diagrama conceptual del enfoque integrado del proyecto, muestra cómo el proceso de desarrollo y difusión de la estufa se retroalimenta de los resultados de los estudios de investigación.

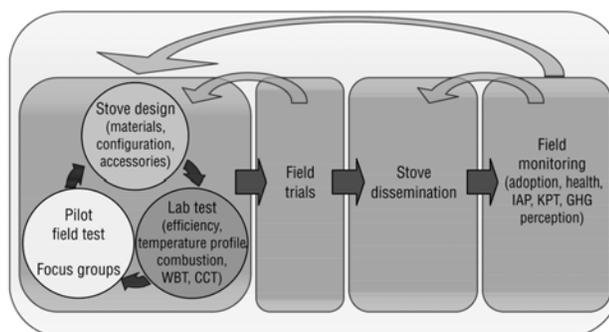


Figura 10. Diagrama conceptual de la integración del Proyecto Patsari (tomado de Masera et al., 2007)  
WBT =PEA; CCT = PCC; KPT = PFC; IAP = Contaminación Atmosférica Interior; GHG = Emisiones de gases de efecto invernadero

El seguimiento y la evaluación de la estufa ha sido un componente crítico del proceso de la difusión desde el inicio del programa hace más de quince años, esto fue reconocido como elemento integral dentro de un proceso dinámico de innovación, desarrollo, y difusión de la estufa. Más el monitoreo ha sido reconocido por las agencias financiadoras como algo crítico para medir el impacto de las intervenciones.

El trabajo de diseño, las pruebas de laboratorio y los pilotos que se realizan en campo se validan y se enriquecen con el aprendizaje en el proceso de difusión, asimismo, los estudios de monitoreo proporcionan información que permiten ajustar la estrategia de difusión y al mismo tiempo mantener un esquema de innovación y desarrollo que permite el mejoramiento continuo de la tecnología.

Este enfoque que ha tenido el Proyecto Patsari en relación al monitoreo y la evaluación de la tecnología ha impulsado de manera continua la innovación tecnológica, la presente tesis es una muestra del fruto de la integralidad de este proyecto.

# CAPÍTULO 4

## EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA Caso de Estudio: *Estufa Patsari*

### 4.1. Evaluación del desempeño energético de estufas eficientes de leña

Para realizar la evaluación del desempeño de dispositivos para cocción con leña se cuenta con 3 pruebas aprobadas internacionalmente que son: **Prueba de Ebullición de Agua, PEA** (Water Boiling Test, WBT) para la eficiencia térmica y la potencia; **Prueba de Cocinado Controlado, PCC** (Controlled Cooking Test, CCT) para el consumo específico de combustible en tareas de cocinado locales, y **Prueba de Funcionamiento en Cocina, PFC** (Kitchen Performance Test, KPT) para evaluar el comportamiento de las estufas en condiciones de campo y detectar ahorros de combustible. En el Anexo 1 se describen ampliamente estas pruebas y en el Anexo 6 se muestran los formatos y cuestionarios utilizados para documentar las mediciones realizadas.

Son muy pocos los estudios que analizan el funcionamiento de una misma estufa de manera integral. Normalmente utilizan únicamente alguna de las pruebas lo que da una visión parcial del desempeño del dispositivo. La eficiencia térmica en sí misma no es un buen indicador, el consumo de combustible es un indicador más adecuado, pero tampoco puede ser único. Los ahorros que se encuentran en mediciones realizadas en campo confirman que las pruebas de laboratorio no son suficientes y que solamente el análisis integral de los resultados de las tres pruebas estándar nos permite conocer el desempeño de la estufa.

Al final de este capítulo se presenta el artículo que fue publicado en Renewable Energy sobre este tema (Berrueta et al., 2007) y que es parte fundamental de esta tesis, se titula: “**Energy performance of woodburning cookstoves in Michoacan, México**”. A continuación se presentan la información más importante desarrollada en la publicación mencionada.

#### 4.1.1. Objetivos

Realizar la evaluación integral del desempeño energético de la estufa eficiente de leña Patsari comparándola con los fogones tradicionales utilizados en el Región Purhépecha del estado de Michoacán.

#### 4.1.2. Metodología

La evaluación de los dispositivos se llevará a cabo utilizando tres perspectivas de análisis del sistema de cocinado:

- a) La estufa como un dispositivo aislado,
- b) La eficacia de la estufa para realizar las principales tareas de cocinado y,
- c) El comportamiento de la estufa como parte de un sistema de cocinado de una familia rural.

La evaluación de las tecnologías se realizará con base en la aplicación de las tres pruebas estándar incluidas en protocolos internacionales específicos para este tipo de dispositivos: Prueba de Ebullición de Agua (PEA), Prueba de Cocinado Controlado (PCC) y Prueba de Funcionamiento en Cocina (PFC).

Las pruebas de laboratorio (PEA y PCC) fueron realizadas en el laboratorio de estufas de GIRA, A.C., se utilizó en todas la pruebas leña de encino secada al aire a temperatura ambiente, las repeticiones de cada prueba fueron hechas por las mismas personas, las estufas utilizadas (fuego abierto y

Patsari) fueron, para ambas pruebas, las mismas con los mismos accesorios. Las pruebas de campo (PFC) se realizaron en dos comunidades rurales de la Meseta Purhépecha del estado de Michoacán.

### **Prueba de Ebullición de Agua (PEA):**

Es una prueba de simulación de cocinado donde el agua toma el lugar de los alimentos. A partir de esta prueba se calcula el índice de calor utilizado (PCU) como indicador de la eficiencia de la estufa, así como otros parámetros de funcionamiento.

- Se efectuaron las tres fases que considera la prueba según el protocolo del Anexo 1: Alto poder – inicio en frío (HPcs), Alto poder – inicio en caliente (HPhs) y Bajo poder – fuego lento (LP). Se incluyeron las modificaciones para estufas multi-hornillas. Se evaluaron los dos modelos de estufas de fuego abierto más utilizados en la región, “3 piedras” (3P) y el “tipo U”, y se evaluó la estufa eficiente Patsari en su versión con comal de metal. La prueba completa incluyó 3 repeticiones para cada tecnología, cocinando 3 litros de agua en cada fase, con leña de encino secada al aire.

### **Prueba de Cocinado Controlado (PCC)**

Es una prueba para el consumo de combustible en una tarea de cocinado específica, se utiliza para comparar el funcionamiento en la preparación de una comida estandarizada en diferentes estufas. Se calcula el peso de leña consumida por peso de alimentos preparados como índice de funcionamiento de cada estufa. Este indicador se denomina consumo específico de combustible (CEC).

- Se llevó a cabo la prueba para tortillas de maíz hechas a mano, esta tarea de cocinado es una de las más importantes en la vida de las familias rurales y de mayor demanda energética (Maserá et al., 1997). Se evaluaron los modelos de estufas de fuego abierto “3 piedras” (3P) y el “tipo U”, y se evaluó la estufa mejorada Patsari con dos variantes, una con comal de barro y la otra con comal de metal. La prueba se hizo en seis ocasiones para cada tecnología. Una señora de una comunidad cercana cocinó, de la manera tradicional, 1 kg de tortillas en cada ocasión en las diferentes estufas. Se registraron los parámetros de tiempo empleado en la tarea, cantidad de leña utilizada, carbón remanente y cantidad de alimento cocinado, según el protocolo del Anexo 1, de igual manera que la prueba anterior se utilizó leña de encino secada al aire.

### **Prueba de Funcionamiento en Cocina (PFC)**

Esta prueba evalúa el funcionamiento de las estufas en condiciones reales de operación, se analiza el consumo de energía por parte de una familia durante un ciclo y se evalúan aspectos relacionados al funcionamiento de la estufa y factores referentes al uso de combustible, salud, costumbres de alimentación, condiciones de vida, aceptación de la tecnología, entre otros.

- La PFC fue un estudio longitudinal en 2 comunidades de la Meseta Purhépecha, la prueba incluyó de manera complementaria la evaluación del consumo energético de familias que utilizan múltiples combustibles para cocinar, diferenciándolas de familias que utilizan únicamente leña. Se monitoreó el consumo diario de ambos combustible durante 7 días, según el protocolo del Anexo 1, antes y después de la introducción de la estufa Patsari. Se visitaron durante una semana a las familias seleccionadas registrando la cantidad de leña y gas LP consumido de un día a otro, también se registraron el número de personas que comieron durante el día diferenciado por sexo y edad.
- La medición inicial (Etapa 1) se hizo para una muestra de 43 familias, el 53% corresponde a usuarias exclusivas de leña y el 47% a usuarias mixtas (leña y gas LP). Esta medición sirve como línea base, ya que todas corresponden a usuarias de fogón tradicional, principalmente del tipo U. En estos hogares se utiliza principalmente leña de encino y de pino, esta última proveniente muchas veces de residuos de aserraderos o carpinterías. Se

realizó una segunda medición en una etapa intermedia (Etapa 2), a 6 meses de uso de la estufa Patsari, la muestra incluyó 41 familias (28 exclusivas y 13 mixtas), muchas de ellas formaban parte de la muestra inicial, pero por diversas razones (migración, falta de leña, o no querer participar en el estudio), fue necesario, reemplazar algunas familias, e incluso algunas cambiaron de grupo, de ser usuarias mixtas pasaron a ser a usuarias exclusivas por dejar de usar gas LP. A un año de uso de la estufa Patsari se realizó la última medición (Etapa 3), en la cual se midió el consumo de combustible a 19 familias, de las cuales 14 participaron en la 3 etapas (8 exclusivas y 6 mixtas).

#### **4.1.3. Resultados**

(Los resultados de las pruebas, Tablas y Figuras, se encuentran en artículo al final de este capítulo, se mencionan los aspectos más relevantes)

##### **Prueba de Ebullición de Agua (PEA)**

En las tres fases de la prueba, el fogón tipo U y el 3P tuvieron eficiencias térmicas entre 13%-19%, lo que puede considerarse como un valor medio-bajo, pero fueron consistentes a lo largo de la tarea de cocinado. Por su parte, la Patsari presentó en la fase de alto poder eficiencias más bajas (7 y 17%). La potencia de los dispositivos varió entre 6.4 kW (Tipo U) y 9 kW (3P y Patsari) para inicio frío y entre 4.4 kW (Patsari) y 8.1 kW (Tipo U) para inicio caliente.

En la fase de bajo poder, la estufa Patsari duplica la eficiencia en relación a los fogones tradicionales (30% vs 15% y 19%) y disminuye a la mitad el consumo de combustible. El comportamiento de la Patsari varía en función del tiempo que la estufa lleve encendida, esto se debe principalmente a que es una estufa masiva construida con barro-arena, los cuales absorben inicialmente calor que no es transferido al recipiente. Una vez que la estufa se estabiliza térmicamente en su rango de operación resulta ser más eficiente.

La potencia en esta fase varía de 2.3 kW para las Patsaris a 3.8 kW para el Tipo U. La potencia en la estufa Patsari va disminuyendo en relación al aumento en la eficiencia térmica, lo cual no sucede en las estufas de fuego abierto, en las cuales a niveles de potencia distintos se logra la misma eficiencia. La Patsari logra eficiencias mayores con menor potencia, por ser una estufa masiva y retener calor latente que ayuda a disminuir las pérdidas de energía una vez que la estufa se ha estabilizado térmicamente.

Con base en esta prueba se puede concluir que las tecnologías de fuego abierto (3P) o semi-abierto (U) son particularmente aptas para tareas de cocinado que requieren rapidez (hervir agua, freír, etc.), sin embargo en tareas que requieren un cocimiento lento, tales como cocer frijoles, caldos, tortillas, etc., la estufa Patsari resulta más eficiente. Asimismo, se espera un mejor desempeño de esta última estufa -en cuanto a consumo de combustible y eficiencia térmica- cuando se usa de manera continua, es decir evitando que la estufa se enfríe.

##### **Prueba de Cocinado Controlado (PCC)**

La estufa Patsari de una entrada con comal de metal fue la de menor consumo de combustible para hacer tortillas ( $0.64 \pm 0.07$  kg leña/kg tortilla), seguida por la Patsari con comal de barro, el fogón 3P y el tipo U. Hacer tortillas demanda entre 12.89 y 36.98 MJ/kg de energía según el dispositivo. Los ahorros alcanzados por la Patsari fueron del 55% y 65% comparado con el tipo U, y 44% y 57% comparado con 3P con un nivel de confianza del 95%.

La estufa Patsari muestra un aprovechamiento de energía muy superior a los fogones tradicionales para esta tarea de cocinado, que requiere alto poder. Esto se traduce en ahorros significativos de combustible, lo cual es importante para los usuarios, puesto que la elaboración de tortillas es la tarea energética con mayor demanda de energía en las familias rurales de México. Asimismo, la elaboración de tortillas no se realiza con gas LP incluso en familias que cuentan con este último combustible.

## **Prueba de Funcionamiento en Cocina (PFC)**

En la etapa 1 no se encontraron diferencias significativas en las dos comunidades estudiadas usando una prueba de t de student para  $p > 0.05$ . Por lo tanto, se consideró ambas comunidades como una muestra única. Por lo contrario, al comparar usuarios exclusivos de leña con usuarios mixtos se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), por lo que se decidió entonces considerar a la muestra comprendida por dos grandes grupos de usuarios: mixtos y exclusivos de leña. El promedio en el consumo de leña para usuarios exclusivos por astd, es de  $3.4 \pm 0.81$  kg/astd/día (equivalente a 54.1 MJ) y de  $2.3 \pm 1.09$  kg/astd/día (36.9MJ) para usuarios mixtos. Los usuarios mixtos tienen además un consumo promedio diario de gas LP por adulto estándar de 0.09 kg (4.84 MJ).

En relación al consumo de energía los usuarios mixtos consumen en promedio 32% menos en leña y 23% menos en energía total, que los usuarios exclusivos. La diferencia (o ahorro) se debe principalmente a la eficiencia en el uso del gas, pero lo cierto es que la leña es utilizada para las tareas de cocinado que demandan mayor consumo de energía y que el gas sólo supe el 12% de los requerimientos energéticos de una familia.

Para la etapa 3, cuando las familias tenían un año de utilizar la estufa Patsari, la mayoría de los hogares seleccionados utilizan esta tecnología diariamente, pero cabe mencionar que para algunas tareas (calentar agua para bañarse, cocer nixtamal, cocinar cantidades grandes de comida, calentar el ambiente, etc.) aún utilizan, en menor medida, el fuego abierto. Los usuarios exclusivos muestran ahora un consumo de leña de 1.12 kg/astd/día, mientras que los mixtos consumen 0.8 kg/astd/día. En cuanto a consumo de gas LP, ahora se utiliza únicamente 0.03 kg/astd/día que representa un ahorro de más del 60%.

El ahorro en el consumo de combustible y energía, en los dos grupos de usuarios por la introducción de estufas eficientes de leña, son del orden del 67% tanto para usuarios exclusivos como para usuarios mixtos. Estos últimos, al utilizar una estufa de leña mejorada, siguen utilizando el gas LP para cubrir el 12% de sus necesidades energéticas de cocción. Al utilizar una estufa eficiente de leña, con los beneficios que ésta tiene, se tiende a abandonar o disminuir el uso del gas LP. De esta forma se logran tener ahorros tanto en el consumo de combustible como en el consumo de energía.

### **4.1.4. Discusión y conclusiones**

De acuerdo con algunos autores existen numerosos factores que deben ser considerados para determinar si una estufa mejorada es mejor o no que la tecnología tradicional, tales como la habilidad para realizar las tareas de cocinado, la reducción de emisiones, el ahorro de combustible y la aceptación por parte de las usuarias. Es por esto que la evaluación debe hacerse desde varios puntos de vista, algunos orientados al laboratorio (eficiencia, potencia) y otros orientados al usuario (consumo de combustible, funcionamiento). En el caso de la estufa Patsari, la coloca como una de baja eficiencia para tareas que requieren alto poder, incluso peor que las estufas tradicionales. Sin embargo los resultados en bajo poder en conjunto con PCC coloca a la Patsari como una estufa eficiente capaz de lograr ahorros significativos de combustible. Estudios realizados anteriormente en Michoacán por Masera (1995) mostraron consumos y ahorros similares para la estufa Lorena (13.83 MJ/kg) con relación a fogón abierto (29.21 MJ/kg)

Los ahorros de más del 60% encontrado en la PFC confirman que las pruebas de laboratorio no son suficientes y que solamente el análisis integral de los resultados de las tres pruebas estándar (PEA, PCC y PFC) nos permite conocer el desempeño general de la estufa.

Un aspecto original de este estudio es diferenciar tipos de usuarios. El comportamiento en el ahorro en el consumo de leña y de gas LP por la introducción de la estufa Patsari es diferente en ambos grupos, el uso de una estufa de leña más eficiente, que además proporciona diversos beneficios como expulsar el humo del interior de los hogares, se traduce en la disminución del uso de la estufa de gas dado que algunos platillos que se pueden preparar en la estufa de gas ahora se hacen en la estufa mejorada.

Se pudo observar que entre quienes utilizan únicamente leña y quienes además utilizan gas LP existe solo un pequeño ahorro por el uso múltiple de combustibles. Los mayores ahorros se logran al utilizar tecnología más eficiente. Cuando se combinan combustibles y tecnologías eficientes (estufa Patsari y gas LP) se logran ahorros en el consumo de energía del orden del 74%.

Los beneficios que tendría una estufa de gas, como serían ahorro en energía o un ambiente más limpio, no se reflejan automáticamente, las familias rurales continúan usando la leña para las principales tareas. El gas LP representa una erogación de dinero y aunque desde el punto de vista energético es más conveniente, desde el punto de vista económico no es considerado así. Por tanto, las ganancias energéticas y los beneficios de usar una “mejor” tecnología como el gas LP en sustitución de la leña no son los que se esperan “teórica” o “técnicamente”.

Lejos de abandonar la tecnología tradicional se hace un “uso mixto de combustibles y de tecnologías”, de tal forma que el enfoque de la “escala de preferencias” (fuel ladder) o “la sustitución de combustibles” (fuel switching) (Barnes et al., 1992; Masera y Navia, 1997) no describe la dinámica compleja del uso de combustibles en el sector rural. El “uso múltiple de combustibles”, permite obtener las ventajas de ambos combustibles, tradicionales y modernos. Las estufas de leña mejoradas tienen por lo tanto un nicho importante dentro de los hogares que ya han adoptado el uso de combustibles modernos (Masera et al., 2000).

#### **4.2. Discusión y comentarios relacionados a los Protocolos Estándares de evaluación**

Con base en la evaluación realizada sobre el desempeño de la estufa Patsari, las comparaciones hechas con relación a los fogones tradicionales y en la aplicación de las pruebas internacionales que se han tomado como estándares para estos fines, se presentan algunos puntos de atención que deberán ser tomados en cuenta al aplicar estos protocolos.

Esta información se encuentra más detalladamente en el Anexo 6 donde se presenta el artículo publicado en Energy for Sustainable Development que forma parte de la presente investigación y que lleva por título: “**Performance Testing as a Tool to Monitor Improved Stove Interventions: Experiences of the Shell Foundation’s Household Energy and Health Project**” (Bailis et al., 2007). En él se integran los resultados de 3 estudios paralelos que fueron llevados a cabo en México y en India donde se aplicaron los mismos protocolos de evaluación, se realiza un análisis de los resultados y se discute el alcance y las limitaciones de cada prueba.

De manera general es posible decir que es importante entender que los resultados derivados de las pruebas de laboratorio no se pueden utilizar *a priori* para predecir funcionamiento en el campo. La evidencia presentada demuestra que, para este tipo de estufas, hay poca asociación observable entre el funcionamiento del laboratorio y el funcionamiento en campo, principalmente en los estudios de laboratorio de alta potencia. Una explicación posible de este resultado es que las estufas estudiadas son de alta masa (cuerpo a base de barro). Es también importante mencionar que un desempeño pobre en el laboratorio no es necesariamente indicativo de alto consumo de combustible en el campo, particularmente donde las estufas no se diseñan para tareas de cocción rápida (alto poder). Como resultado de las pruebas de campo se demostró en ambos países que las familias que usaban las estufas eficientes han reducido su consumo de combustible en un promedio de 19 a 66%.

La PEA es una herramienta útil para los desarrolladores y diseñadores de estufas, es adecuada para entender los principios básicos de funcionamiento y los efectos de cambiar ciertos parámetros del diseño de la estufa. Sin embargo la PEA se ha utilizado a menudo como “la prueba estándar” para todo el funcionamiento de la estufa a expensas de las pruebas de campo. Con base en la evidencia de los estudios realizados, los ahorros reales del combustible derivados solamente de PEA son inexactos. A excepción del consumo específico de combustible en las pruebas de baja potencia, se encontró poca evidencia de una relación simple entre la eficiencia o el consumo de combustible en las pruebas de campo y el consumo de combustible en las pruebas de laboratorio. De hecho, la mayoría de las correlaciones son tan débiles que no es posible utilizar los resultados de estos estudios para predecir si las pruebas de laboratorio sobrestiman o subestiman el consumo de combustible real.

Por su parte la PCC se debe promover como medida más apropiada localmente, los resultados son más cercanos al funcionamiento real de la estufa. La combinación de los resultados de la PEA y PCC pueden, de manera más realista, predecir el comportamiento de los dispositivos en condiciones reales, tomando en consideración que existe una combinación de procesos de cocinado (alto y bajo poder) en los diferentes platillos que se cocinan localmente.

Algunas veces e prefiere utiliza la PEA para caracterizar el desempeño de una estufa y calcular el consumo de combustible. Se argumenta que las otras pruebas, PCC y PFC, son difíciles de realizar y en algunos casos costosas. Si bien es cierto que realizar una prueba de PFC requiere de mayores recursos (humanos y económicos), sin embargo, como quedo demostrado, para estufas como la Patsari, la PEA no predice el comportamiento y los ahorros reales, por lo que es necesario complementar con las otras pruebas. Normalmente una PFC se realiza con 7 días de mediciones continuas, con la finalidad de simplificar la prueba, mediante el análisis de las mediciones realizadas podemos observar que en el día 4 se obtienen valores cercanos al valor promedio de consumo de leña por astd y que la variación entre las mediciones se reduce, de manera que es posible realizar la prueba únicamente con 4 días de medición en lugar de 7 obteniendo datos confiables sobre el consumo de combustible. De esta forma se puede lograr un ahorro significativo en el esfuerzo requerido para realizar la prueba y se logra tener una evaluación más integral de los dispositivos.



ELSEVIER

ScienceDirect

Renewable Energy ■■■■■ ■■■■■

RENEWABLE  
ENERGY[www.elsevier.com/locate/renene](http://www.elsevier.com/locate/renene)

## Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico

Víctor M. Berrueta<sup>a,\*</sup>, Rufus D. Edwards<sup>b</sup>, Omar R. Masera<sup>c</sup>

<sup>a</sup>*División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, National Autonomous University of Mexico (UNAM), Mexico*

<sup>b</sup>*Epidemiology Department, School of Medicine, University of California at Irvine, CA, USA*

<sup>c</sup>*Center for Ecosystems Research, National Autonomous University of Mexico (UNAM) and Interdisciplinary Group on Appropriate Rural Technology (GIRA), Mexico*

Received 10 February 2007; accepted 30 April 2007

### Abstract

There have been few detailed assessments of the actual impacts of improved stove interventions in rural communities, although many improved stove projects have reported overall efficiencies from tests in simulated kitchens using water-boiling tests (WBTs). This paper presents an integrated energy evaluation of the Patsari cookstove, an efficient wood-burning cookstove developed in Mexico that has recently obtained international recognition, in comparison to traditional cookstoves in rural communities of Michoacan, Mexico. The evaluation uses three standard protocols: the WBT, which quantifies thermal efficiency and firepower; the controlled cooking test (CCT), which measures specific energy consumption associated with local cooking tasks, and the kitchen performance test (KPT), which evaluates the behavior of the stoves in-field conditions and estimates fuel savings. The results showed that the WBT gave little indication of the overall performance of the stove in rural communities. Field testing in rural communities is of critical importance, therefore, in estimating the benefits of improved stoves. In the CCT for tortilla making, the main cooking task in Mexican rural households, Patsari stoves showed fuelwood savings ranging from 44% to 65% in relation to traditional open fires ( $n = 6$ ;  $P < 0.05$ ). These savings were similar in magnitude to the average energy savings from KPT before and after Patsari adoption of 67% ( $n = 23$ ;  $P < 0.05$ ) in rural households exclusively using fuelwood. Similar energy savings of 66% for fuelwood and 64% for LPG, respectively, were also observed in households using mixed fuels. With sound technical design, critical input from local users and proper dissemination strategies, therefore, improved stoves can significantly contribute to improvements in the quality of life of rural people with potential benefits to the surrounding environment.

© 2007 Elsevier Ltd. All rights reserved.

*Keywords:* Stove efficiency; Energy performance; Water boiling test; Kitchen performance test; Biomass; Latin America

### 1. Introduction

Biomass represents between 50% and 90% of primary energy consumption in developing countries, and 12% and 15% of global primary energy consumption [1]. Three-quarters of the global biomass used for energy is consumed in developing countries, where 77% of the world's popula-

tion lives, mainly in rural areas and in poor urban zones for cooking, water heating, space heating, and thermal power generation in a large variety of small industries (i.e., brick making, pottery, and others). Approximately 27 million rural people in Mexico still use biomass for cooking [2], where fuelwood represents approximately 80% of energy used by rural households and 50% of total energy use in rural communities [3].

The most frequently used fuelwood technology remains the open fire. Unfortunately, people that use these technologies are exposed to emissions originating from inefficient combustion that are associated with serious adverse health

\*Corresponding author. Centro Comercial El Parian 17, Colonia Morelos, Pátzcuaro, Michoacán, México. 61609.  
Tel./fax: + 52 434 3423216.

E-mail address: [vberrueta@oikos.unam.mx](mailto:vberrueta@oikos.unam.mx) (V.M. Berrueta).

effects, affecting mainly women and young children. Damage associated with smoke from open combustion results predominantly from acute respiratory infections, which cause nearly 1.2 million premature deaths annually among children less than 5 years of age [4,5]. In Mexico, making tortillas represents more than half of fuelwood consumption, and women spend between 2 and 4 h/day on this task in close proximity to the stove, breathing smoke. Women that have home industries making tortillas to sell, which can be up to 20% of women in some communities, may spend as many as 8 h/day in these conditions [6]. Fuelwood use also presents other problems due to the cost or to the time and effort required to collect it, and in rural Mexican communities people spend an average of 15–20% of their income purchasing fuelwood [7].

Approximately 18.7 million rural people rely exclusively on fuelwood for energy, with the remainder using it principally in combination with LPG (8.5 million). Recently, LPG penetration has increased, particularly in larger semi-urban centers, where income levels and technology penetration are higher and fuelwood resources are more limited. In rural areas, however, LPG is almost always used in combination with traditional energy sources where mixed users generally use fuelwood as their main fuel for tasks with higher energy output, and LPG as a secondary fuel for smaller tasks such as heating milk for breakfast. In these communities, LPG tends to be a supplementary rather than a substitute energy source, due to an inadequate distribution network, high fuel costs, and inadequate adaptation of LPG stoves to local cooking practices, giving rise to more marginal reductions in fuelwood consumption and indoor pollution. Although with economic development increased adoption of LPG might be expected, economic development may not directly translate to increased LPG usage as the kitchen has a low priority inside the family [8,9]. With fuelwood usage likely to continue in rural Mexican communities, at least in the coming decades, there is a critical need to introduce effective measures that reduce the burden of health effects as a result of exposure to fuelwood combustion byproducts.

For several decades, improved stoves have been promoted to reduce fuelwood use and to improve quality of life for rural people. Initial evaluations of these efforts were mixed on the effectiveness of both stove designs and dissemination programs [10,11]. Since health, GHG, and fuel-saving benefits of improved wood-burning stoves are related to increased efficiency, evaluation of energy performance is critical to developing more effective technologies. Measuring the energy performance of a wood-burning stove is deceptively difficult, however, as the tests should reflect the conditions under which the stove would be used in real households. While a standardized global test may seem at first desirable to compare across programs, in practice, since cooking and stove usage are quite different between different regions, and even more so at national and global levels, this has proved quite challenging.

There has been little systematic evaluation of fuel saving and energy implications during daily activities in real communities that have converted from a traditional to an improved stove. Likewise, multiple fuel usage, transitional stove adoption patterns, or the ways in which families make use of different technologies to fulfill their food-cooking requirements have rarely been incorporated. Since use of multiple fuels is a common step in the transition from traditional to improved stoves, in agreement with social theories of technology dissemination through populations, evaluating these stages is critical to understanding the impacts of the transition.

As part of a comprehensive program of stove evaluation and monitoring, which includes evaluation of reductions in health impacts, personal exposures, indoor air pollution concentrations, greenhouse gas emissions, and improved families' life [12], this paper presents an energy performance evaluation of the "Patsari" multi-pot wood-burning cookstove. The "Patsari" project won the Ashden Health and Welfare prize for Sustainable Energy in June of 2006,<sup>1</sup> and has been disseminated in Mexico through a multi-institutional program since 2003. To obtain a more comprehensive picture of the impact of the stove, we present an integrated analysis where laboratory thermal efficiency tests are compared to both controlled cooking tests (CCT) and kitchen performance tests (KPTs) in rural communities in a before and after intervention assessment.

## 2. Methodology

### 2.1. Description of stoves

#### 2.1.1. Traditional stoves

Cooking in this region of Mexico is typically performed on open fires surrounded by three-stone fire (TSF) (Fig. 1) and open fires with U-shaped surrounds (U-type) (Fig. 2). The U-shaped surrounds are built by the users in many regions of Mexico and are typically made of mud or clay. Although to some extent they "enclose" the fire in a kind of combustion chamber, they do not possess a chimney and combustion is incomplete and uncontrolled, generating a great quantity of particles and gases that are emitted directly into the kitchen. In both cases the pot or the comal<sup>2</sup> is placed on the three stones or the U-shaped surround and an open fire lit beneath it. The TSF thermal efficiency typically oscillates between 5% and 17% [13–15].

#### 2.1.2. Patsari stove

GIRA<sup>3</sup> and CIECO<sup>4</sup> developed an efficient wood-burning cookstove called the "Patsari," which in the

<sup>1</sup><http://www.ashdenawards.org/winners/gira>

<sup>2</sup>A comal is a large metal or ceramic flat surface on which tortillas are cooked.

<sup>3</sup>Interdisciplinary Group on Appropriate Rural Technology (GIRA, A.C.), [www.gira.org.mx](http://www.gira.org.mx).

<sup>4</sup>Center for Ecosystems Research (CIECO), National Autonomous University of Mexico (UNAM), [www.oikos.unam.mx](http://www.oikos.unam.mx).



Fig. 1. Traditional cookstove, three-stone fire (TSF).



Fig. 2. Traditional cookstove (U-type).

Purhepecha language means “the one that keeps,” referring to the fact that the device “keeps” (takes care of) users’ health, environment, and economy. Patsari is an improved design of the Lorena-style cookstove [12]. Although there are multiple models, the Patsari stoves tested here were built using brick and cement, with integrated metal comals that are sealed with clay to avoid smoke leaks into the kitchen, and a chimney to vent smoke from the kitchen. The external dimensions of the stoves were 80 cm wide by 100 cm in length, with a height of 27 cm. The stove has a main combustion chamber 20 cm tall with a metal comal that is 52 cm in diameter, ideal for cooking tortillas. One model of Patsari have adicional a smaller chamber with a metal comal 35 cm in diameter, designed to hold pots and used to cook beans, soups and for other tasks like boiling water. Both have two secondary chambers (or furnaces) for small pots too (Fig. 3a and b). For the CCT an additional model with clay comal was tested to evaluate the effects of comal composition on tortilla cooking.

## 2.2. Stove performance tests

Three standard tests were used in this study based on recent modifications<sup>5</sup> to approaches developed in the 1980s by VITA [16] and elaborated by Baldwin [17]: (a) the water boiling test (WBT), which measures the time and fuel needed to boil a certain quantity of water under controlled conditions. This tests was in principle intended at the design phase for relatively fast feedback on design modifications, and may not reflect conditions under which the stove is used for cooking in communities; (b) the CCT, which more appropriately measures fuel consumption associated with the performance of a specific cooking tasks, but is hard to compare across regions or food types; and (c) the KPT, which is designed to evaluate family fuelwood consumption under real usage conditions in local communities, but is more difficult to perform and requires more resources and cooperation of local users. Changes to earlier versions of the tests included some minor procedural changes, the introduction of a “standard cooking pot,” and the use of modern, but fairly inexpensive, measuring equipment.

The laboratory tests (WBT and CCT) were carried out in a simulated kitchen testing facility at GIRA’s laboratory in Patzcuaro Michoacan, Mexico, using fuels purchased locally. All Patsari and open fire test iterations were performed by the same person and used oak fuelwood, air dried at ambient temperature. The field tests (KPT) were carried out in two rural communities of the Meseta Purhepecha of the state of Michoacan, Mexico.

### 2.2.1. Water boiling test

The WBT has three components: a test at high power that is conducted with both cold and warm start conditions and a test at low-power to simulate slow cooking tasks or task that require low heat. The tests were modified to accommodate multi-pot stoves, with three repetitions of each phase of the test for each fire/stove type. In the high-power cold start, the test begins with the stove at room temperature and uses a pre-weighed bundle of wood to boil 3 L of water in a standard pot. In the high-power warm start, a fire is reset immediately after the WBT cold start phase and the test repeated to identify differences in performance between a stove when it is cold and when it is warm. Lastly in the low-power simmering phase, a fire is reset using a pre-weighed bundle of wood after the high-power tests and used to simmer water 3 °C below boiling for 45 min.

The WBT assesses the thermal efficiency ( $H$ ), the firepower ( $P$ ), and the specific fuel consumption (SC) of the stove, where *Thermal efficiency* ( $H$ ) is a ratio of the work done by heating and evaporating water to the energy

<sup>5</sup>Procedures, changes relative to earlier versions of tests, and analysis spreadsheets are available at [http://ceihd.berkeley.edu/heh.stove\\_perf\\_eval.htm](http://ceihd.berkeley.edu/heh.stove_perf_eval.htm).

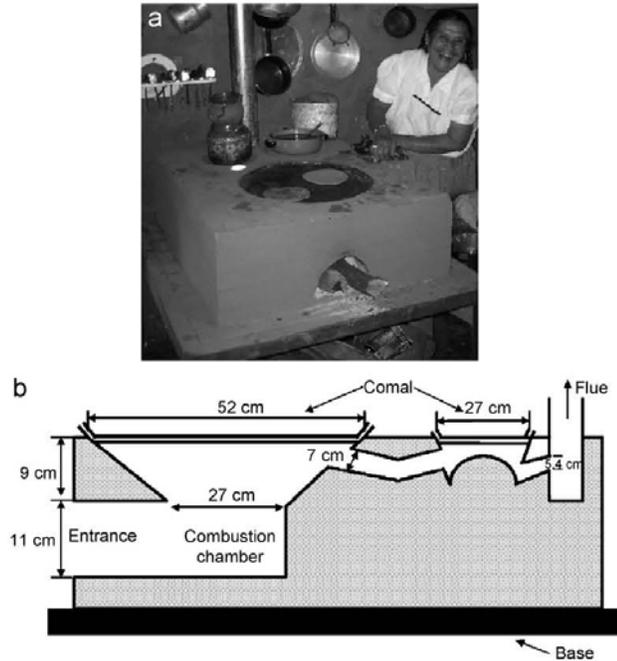


Fig. 3. (a) Patsari cookstove, (b) cross-sectional view of the Patsari cookstove.

consumed by burning wood, mathematically,

$$H = \frac{4.186 W_w (T_f - T_i) + 2260 W_v}{f_d \times \text{LHV}},$$

where  $W_w$  is the mass of water in the pot, the specific heat of water (4.186 J/g °C), and the change in water temperature ( $T_f - T_i$ ), the product of the amount of water evaporated from the pot ( $W_v$ ), and the latent heat of evaporation of water (2260 J/g). The dry-wood equivalent consumed during each phase of the test ( $f_d$ ) and the LHV, lower heating value (also called net heating value).

*Firepower* ( $P$ ) is a ratio of the wood energy consumed by the stove per unit time (in W) during each phase of the test, mathematically,

$$P = \frac{f_d \times \text{LHV}}{60(t_f - t_i)},$$

where  $(t_f - t_i)$  is the duration of the specific test phase.

*Specific fuel consumption* ( $SC$ ) is the ratio of the amount of fuelwood consumed to the amount of water remaining at the end of the trial, can be defined for any number of cooking tasks, and should be considered “the fuelwood required to produce a unit output” whether the output is boiled water, cooked beans, tortillas, or loaves of bread. In this case specific fuel consumption refers to a measure of the amount of wood required to produce 1 L (or kilo) of

boiling water, mathematically,

$$SC = \frac{f_d}{W_{wf}},$$

where  $W_{wf}$  is the mass of water boiled.

### 2.2.2. Controlled cooking test

The CCT is a test designed to evaluate stove performance as a woman from a local community conducts specific local cooking tasks and provides a range of performance metrics that may be used to evaluate different designs of stoves including fuel consumption (SC), residual charcoal, quantity of food cooked, and time used in the task. While this test gives a good indication of stove performance in local communities, it is hard to compare stove performance across communities and stove types. Mathematically, SC is expressed (on a dry basis) as

$$SC = \frac{f_d - [C_h(Ho_{fw}/Ho_{ch})]}{1 \text{ kg}_{\text{Tortillas}}},$$

where  $C_h$  is the amount of residual charcoal resulting from the combustion of fuelwood;  $Ho_{fw}$  the enthalpy of fuelwood (20 MJ/kg); and  $Ho_{ch}$  the enthalpy of charcoal (28 MJ/kg).

Cooking of handmade corn tortillas was evaluated in the CCT as this activity is one of the most important in the life of rural families in México and one of the major energy demands [6,7]. A woman from a nearby community cooked 1 kg of tortillas each time in the different stoves, using

Table 1  
Sample composition and average household size for the three phases of the longitudinal kitchen performance test (KPT) ( $\pm$ SD)

	Device	Type of user	Sample size	Average household size	Average household size (standard adults)
Phase 1	Traditional cookstove	Exclusive	23	7.1 $\pm$ 0.4	5.2 $\pm$ 0.3
		Mixed	20	6.5 $\pm$ 0.7	4.7 $\pm$ 0.5
Phase 2	Patsari	Exclusive	21	6.8 $\pm$ 0.7	4.9 $\pm$ 0.6
		Mixed	11	5.7 $\pm$ 0.9	4.2 $\pm$ 0.7
Phase 3	Patsari	Exclusive	8	6.5 $\pm$ 0.8	4.6 $\pm$ 0.6
		Mixed	6	6.5 $\pm$ 0.8	4.6 $\pm$ 0.6

Note: Exclusive: exclusive fuelwood user. Mixed: user of both fuelwood and LPG.

traditional methods. The test was repeated six times for each fire/stove type using TSF, U-type fires, and Patsari stoves with both metal and clay comals. Measurements also included the moisture content of fuelwood, ambient temperature, time needed to cook the dish, and time to light the fire in the case of fuelwood.

### 2.2.3. Kitchen performance test

The KPT is a field-based test, designed to evaluate actual stove performance under conditions in local communities, in which daily fuel use and coking tasks are monitored in community households over a specified time frame, usually 1 week. In the central Mexican highlands in the state of Michoacan, 15 municipalities were selected where reliance on biomass fuels for primary energy provision was over 80% [12]. From these municipalities 600 households were randomly selected in six Purepecha communities for participation in a case-control assessment of the effects of the improved Patsari stove on respiratory health effects [18]. For KPT, 23 households exclusively using fuelwood were selected randomly from the cases in the health study in two communities of the Meseta Purhepecha: Comachuen and La Mohonera. From the same communities 14 households that used a combination of fuelwood and LPG that were participating in the health study and an additional 6 households that had purchased the improved stove were selected, making a total of 20 households using mixed fuelwood and LPG. In all households oak and pine were main fuelwoods used.

The KPT was a longitudinal evaluation of energy consumption to control for between household variability.<sup>6</sup> While a pilot study suggested that smaller samples were sufficient for statistically significant differences in per capita energy consumption, oversampling of open fire stoves was conducted in the initial phase, to account for drop out due to migration, lack of wood availability, and other factors. Sample numbers were reduced in subsequent phases due to resource limitations in following all households through all three phases. Results do not represent

reductions in per capita community or population energy consumptions, therefore, but are indicative of users of the stove. The KPT was performed in three phases: (a) Phase 1, as a baseline when the family used an open fire or open fire in a traditional U-shaped stove (dry season), with 43 households (53% exclusive fuelwood users and 47% mixed users); (b) Phase 2, an intermediate phase 6 months after installation of the improved Patsari stove (rainy season), with 32 households (66% exclusive and 34% mixed); and (c) Phase 3, after 1 year of use, with 14 households (57% exclusive and 43% mixed users) (Table 1).

The daily consumption of LPG and fuelwood used by each family was monitored over a 7-day period, before and after the introduction of Patsari cookstove. In addition, the number of people for whom food was prepared at each meal was recorded, differentiated by sex and age. To obtain fuel consumption per capita, an equivalence factor called a *standard adult*<sup>7</sup> was used, which relates the fractional food requirement (and energy needed to cook the food) for a child, woman, or elderly person to that of an adult man of reproductive age. Fuelwood was not provided to families to minimize bias in family fuel consumption. In Phases 2 and 3, it was common that some families used Patsari and traditional cookstoves combined.

## 3. Results

### 3.1. Water boiling test

Table 2 shows results of WBT performed for each stove type. The U-type open fire and the TSF had relatively consistent thermal efficiencies in the three test phases from 13% to 19%, which were in relatively good agreement with reported efficiencies [13–15]. In the low-power phase, however, specific fuel consumption was much greater for the open fires and U-shaped stoves than in the high-power phases, although there was large variability in the measurements. The Patsari, however, demonstrated much lower efficiencies (7%) in the high-power cold start and somewhat

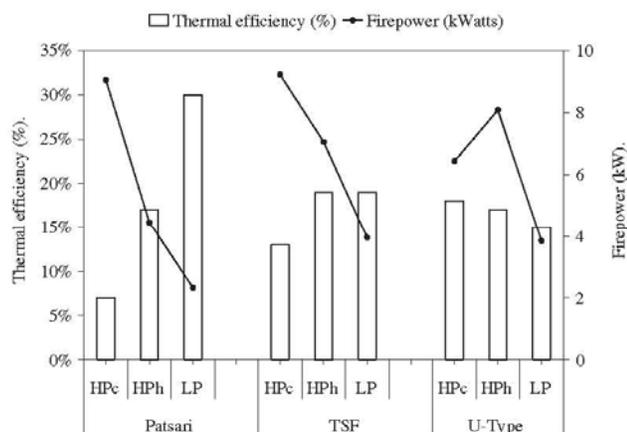
<sup>6</sup>Current methods do not include multiple fuel use, but evaluate the consumption of fuelwood. In the present study LPG consumption was also evaluated to account for different technologies used by these communities to meet energy requirements for cooking.

<sup>7</sup>Standard adult equivalence factors defined in terms of sex and age: child: 0–14 years, 0.5; female: over 14 years, 0.8; male: 15–59 years, 1.0; male: over 59 years, 0.8. (Guidelines for Woodfuel Surveys, for FAO by Keith Openshaw).

**Table 2**  
Water boiling test results of improved wood cookstove (Patsari) and open fires (three-stone fire and U-type) ( $\pm$ SD)

	Thermal efficiency (%)	Specific fuel consumption (kg wood/kg water)	Firepower (kW)
<b>High-power phase cold start</b>			
Patsari	7 $\pm$ 0.6	0.49 $\pm$ 0.8	9.1 $\pm$ 1.2
TSF	13 $\pm$ 3.7	0.19 $\pm$ 0.2	9.2 $\pm$ 0.6
U-type	18 $\pm$ 0.9	0.13 $\pm$ 0.1	6.4 $\pm$ 1.2
<b>High-power phase warm start</b>			
Patsari	17 $\pm$ 3.9	0.18 $\pm$ 0.4	4.4 $\pm$ 0.5
TSF	19 $\pm$ 4.2	0.13 $\pm$ 0.3	7.1 $\pm$ 1.5
U-type	17 $\pm$ 0.7	0.14 $\pm$ 0.1	8.1 $\pm$ 0.4
<b>Low-power phase simmer</b>			
Patsari	30 $\pm$ 11.7	0.19 $\pm$ 0.1	2.3 $\pm$ 1.1
TSF	19 $\pm$ 6.8	0.29 $\pm$ 0.5	3.9 $\pm$ 0.8
U-type	15 $\pm$ 1.3	0.28 $\pm$ 0.4	3.8 $\pm$ 0.6

Note: In all tests  $n = 3$ .



**Fig. 4.** Water boiling test results of different cooking devices. Comparison of thermal efficiency vs. firepower. Note: HP, high-power phase; c, cold start; h, hot start. Bringing the water to boil when the stove is cold and when the stove is hot, respectively. LP (low-power phase). Simmering the water for 45 min at constant near-boiling to boiling temperature.

lower efficiencies in the high-power warm start (17%) compared to the low-power phases (30%). In addition, the Patsari showed much lower specific fuel consumption in the low-power phase relative to the high-power cold start. The power of the devices varied between 6.4 kW (U-type) and 9 kW (TSF and Patsari) for the cold start phase, and among 4.4 kW (Patsari) and 8.1 kW (U-type) for the hot start. While the firepower in the cold start phases was similar for Patsari and TSF with much lower thermal efficiency for the Patsari, in the warm start phase the thermal efficiencies were similar, but the firepower for the Patsari stove was much lower than the open fire and U-shaped stove (Fig. 4).

### 3.2. Controlled cooking test

Table 3 and Fig. 5 shows fuelwood and energy consumption in six repeat CCT of tortillas performed for each stove

type. Patsari stoves showed a considerably lower fuelwood and energy consumption compared to TSF and U-shaped stoves. The single entrance Patsari stove with metal comal showed the lowest fuel consumption for making tortillas ( $0.64 \pm 0.07$  fuelwood kg/tortilla kg), followed by the clay comal Patsari, the TSF, and the U-type. The savings achieved by the Patsari were 55% and 65% in comparison with the U-type, and 44% and 57% compared with the TSF, and were statistically significant at 95% confidence level.

### 3.3. Kitchen performance test

Table 1 shows characteristics of households that participated in the KPT. Average household size (measured in standard adults) ranged from 4.2 to 5.2 members. The sample size decreased from Phases 1 to 3 due to participant dropouts, migration, lack of availability of fuelwood when

Table 3  
Fuelwood and energy consumed for a standard cooking task ( $\pm$ SD)

Device	<i>n</i>	Fuelwood for tortilla task (kg/kg)	Energy consumed (MJ/kg)	Savings compared to U-type (%)	Savings compared to TSF (%)
Patsari, metal comal	6	0.64 $\pm$ 0.07	12.89 $\pm$ 1.32	65	57
Patsari, clay comal	6	0.84 $\pm$ 0.16	16.72 $\pm$ 3.18	55	44
TSF	6	1.49 $\pm$ 0.40	29.86 $\pm$ 8.08	19	–
U-type	6	1.85 $\pm$ 0.41	36.98 $\pm$ 8.13	–	–

Note: We use 20 MJ/kg (oven-dry) and 28 MJ/kg as the heating value of wood and charcoal respectively (adapted from Masera et al., 2005).

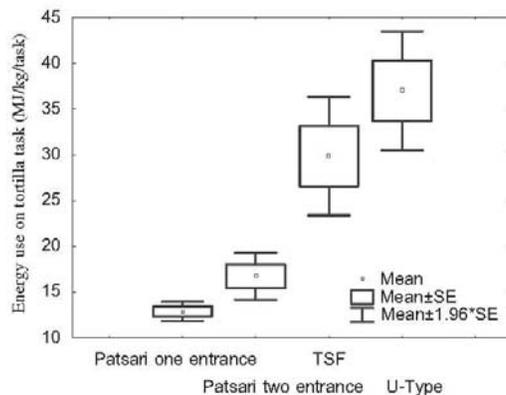


Fig. 5. Controlled cooking test. Energy (MJ) use for tortilla making by cooking device (adapted from Masera et al., 2005).

the test was conducted, and other reasons. In a few instances mixed users stopped using LPG in Phases 2 and 3.

### 3.3.1. Phase 1: traditional stove user's measurement

In this phase, there were no significant differences between participating households in the two study communities ( $n = 23$ , exclusive;  $n = 20$ , mixed; Student's  $p > 0.05$ ). In contrast, as shown in Fig. 6, exclusive fuelwood users showed significantly higher fuelwood consumption relative to mixed users of fuelwood and LPG (Student's  $p < 0.05$ ). Average per capita fuelwood consumption was  $3.4 \pm 0.8$  kg/cap/day (equivalent to 54.1 MJ/cap/day) for exclusive users and  $2.3 \pm 1.1$  kg/cap/day (41.8 MJ/cap/day) for mixed users, respectively. Mixed users had, in addition, an average per capita daily consumption of LPG of 0.09 kg (4.84 MJ/cap/day).

### 3.3.2. Phase 2: measurement after 6 months using Patsari stove

The second phase was carried out in the rainy season; as discussed above some families still used the traditional stove and others were using the Patsari stove regularly. Table 4 shows the comparison between Phases 1 and 2 for those households that were available for the test and were also already using the Patsari stove (alone or in combination with traditional cookstoves). Significant fuel and

energy savings were obtained with regard to the traditional cookstoves. Exclusive Patsari users showed 57% savings compared to their previous consumption using traditional cookstoves. Mixed users saved 48% on fuelwood and 30% on LPG, for an aggregate 46% savings in energy use. Similar savings were obtained when restricted to paired analysis.

### 3.3.3. Phase 3: measurement after 1 year using the Patsari stove

Table 5 shows fuelwood and energy consumption a year after the introduction of the Patsari stove, and energy savings relative to open fires or U-shaped stoves. Exclusive fuelwood users consumed 1.1 kg/cap/day of fuelwood while mixed users consumed 0.8 kg/cap/day. Savings in fuel and energy consumption for those using wood-burning efficient cookstoves were 67% for exclusive users and 66% for mixed users. The latter use LPG to cover 12% of their energy needs for cooking and consumption declined to only 0.03 kg/cap/day, representing a savings of more than 60%. Similar savings were obtained for exclusive users when restricted to paired analysis, but were slightly lower for LPG (51%).

## 4. Discussion

There has been little formal in-field evaluation of the effectiveness of improved stoves as an intervention, as it is both challenging and complex to measure the degree to which new improved stove technologies improve conditions in rural households, through replacing traditional methods. It is not only challenging to recruit statistically representative study participants in areas where individual behaviors in cooking activities and housing conditions vary widely as a result of non-standardized construction norms, but also resource intensive to keep sampling equipment and personnel in the field to follow households over time, relying on goodwill of communities for participation.

As a result of these difficulties, most stove projects resort to laboratory-based WBTs that assess the thermal efficiency of the stove as an indicator of stove performance and fuel saving, which has a tendency to be used as an absolute metric of the value of the improved stove. Efficiency by itself is not a good indicator, however, and although fuel consumption provides more information [19], the 67% savings found in the KPT demonstrate that

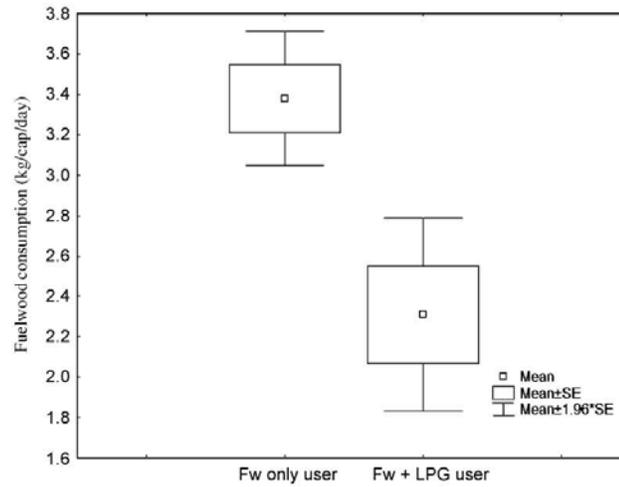


Fig. 6. Kitchen performance test. Fuelwood ( $F_w$ ) used in the baseline by type of user.

Table 4  
Kitchen performance test

Type of users	$n$	Traditional cookstove (before)		$n$	Patsari (after)		Savings	
		kg <sub>f<sub>w</sub></sub> /cap/day	MJ/cap/day		kg <sub>f<sub>w</sub></sub> /cap/day	MJ/cap/day	Fw (%)	LPG
Exclusive	23	3.4 ± 0.8	54.1 ± 13.0	21	1.4 ± 0.6	23.1 ± 9.7	57	n.a.
Mixed	20	2.3 ± 1.1	41.8 ± 17.5	11	1.2 ± 0.8	22.5 ± 10.6	48	30%

Average daily fuel and energy consumed per standard adult in homes with traditional stoves and in homes after 6 months of Patsari usage (±SD).

Table 5  
Kitchen performance test

Type of users	$n$	Traditional cookstove (before)		$n$	Patsari (after)		Savings	
		kg <sub>f<sub>w</sub></sub> /cap/day	MJ/cap/day		kg <sub>f<sub>w</sub></sub> /cap/day	MJ/cap/day	Fw (%)	LPG
Exclusive	23	3.4 ± 0.8	54.1 ± 13.0	8	1.1 ± 0.4	17.9 ± 6.7	67	n.a.
Mixed	20	2.3 ± 1.1	41.8 ± 17.5	6	0.8 ± 0.3	14.1 ± 3.3	66	64%

Average daily fuel and energy consumed per standard adult in homes with traditional stoves and in homes after 1 year of Patsari usage (±SD).

laboratory tests are not enough and in-field evaluations of performance in rural communities are essential. Although challenging in approach, this study demonstrates, therefore, the utility of an integrated approach to testing stove performance in rural communities in which results from the two laboratory tests (WBT, CCT) are used to inform on in-field evaluations of stove performance in the KPT.

#### 4.1. Reductions in energy use and multiple fuel usage

Many families used both the traditional stove in combination with the Patsari, especially for high-power tasks such as heating water for bathing, making nixtamal, and heating the home during cold periods. In spite of the

continued use of open fires for some tasks, the reductions in fuelwood and per capita energy consumption represent considerable fuel savings in these households (67%). Clearly, on a community or population basis per capita reductions for the whole community would be expected to be lower, depending on the degree of stove adoption and use, and the reductions here are indicative of reductions in households using the stoves.

Similarly, although LPG stoves were present in a large fraction of the rural households in these communities, these households continued to use the traditional open fire stoves, rather the LPG stove tends to be used for specific cooking tasks (usually heating water for tea, or short cooking or reheating tasks). While LPG stoves have been

widely promoted as options to achieve significant health benefits in rural communities, in practice these benefits are not fully realized due to the continued presence of very polluting open fires in the same room. Fig. 7 demonstrates through per capita energy consumption how an integrated strategy for multiple stove promotion based on specific local cooking requirements can achieve greater benefits to these communities. Reflecting current promotion of LPG stoves in communities, per capita energy consumption in households in which LPG stoves were present was 24% less than traditional open fire stoves. On the other hand, after installation of the Patsari stove per capita energy consumption was 67% less than the traditional open fire stoves, and even reached 74% in households where LPG was also present. Policies directed at the dissemination of only LPG will therefore result in much smaller energy reductions and virtually no health gains than an integrated strategy where improved wood-burning stoves are combined with strategies for gradually shifting to LPG on specific cooking tasks. These last strategies will also reach a much wider social basis and result in larger health, environmental, and GHG emission benefits. Clearly, these integrated strategies could also include multiple wood-burning stoves targeted at specific local cooking needs, such as inclusion of secondary high-power improved stoves for water heating for bathing, or similar tasks.

The KPT was originally designed to accommodate only one fuel. While in some parts of the world households still rely on only one fuel for cooking, use of more than one fuel and multiple stoves is probably the most common case. Since introduction of an improved stove would be expected to impact total household energy consumption across all stoves and fuels, assessment of the overall impact in real

households was required to provide robust data on the effectiveness of the stove. The KPT protocols were adapted, therefore, to deal with multiple stoves and fuels and results are presented in terms of total energy consumption and energy savings, in addition to the masses of individual fuels used or savings reported by previous stove projects. In addition, in this study users of the improved stove that used mixed fuels and those that exclusively used fuelwood have been differentiated to illustrate the potential bias in estimates that may result from not accounting for other energy sources. For these communities in Mexico, therefore, not only would overall energy use be underestimated through not assessing the LPG consumption, but the energy savings in LPG use that result from installation of the improved stove would not be credited to the performance of the improved stove. This is of considerable importance in estimation of greenhouse benefits and potential carbon credits that may accrue to defray the cost of the improved stove, in addition to the financial benefits of reduced LPG consumption to the household.

#### 4.2. High-power vs. low-power

The Patsari stove demonstrated low thermal efficiencies for tasks that require high-power, performing less well than traditional stoves, a situation found in other studies [20,21]. Studies on the Lorena stove in Michoacan by Masera [6] showed similar consumption and savings (13.83 MJ/kg) in relation to the TSF (29.21 MJ/kg). The results of the high-power phases of the WBT, however, were not indicative of the actual performance in households in the field in the KPT, or with results of the CCT, which indicated that the

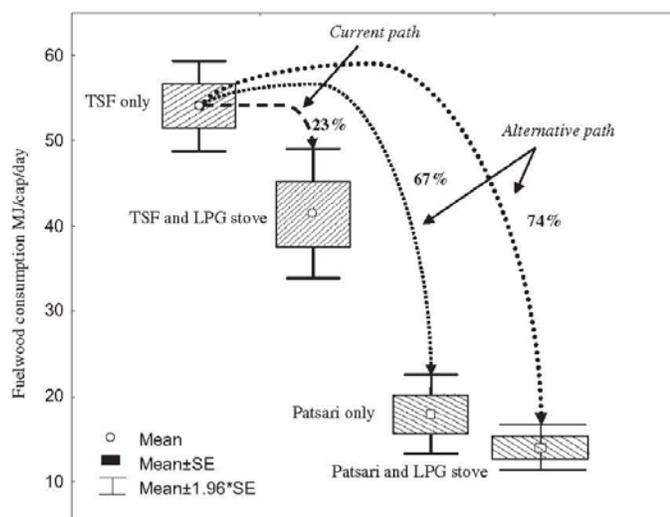


Fig. 7. Energy savings according to different fuel and technology transitions. The arrows show the average energy savings achieved by local households when partly switching from traditional stoves to (a) LPG, (b) Patsari stoves, or (c) both LPG and Patsari stoves. Savings are relative to the consumption of households using traditional stoves.

stove was efficient for local cooking practices and capable of achieving significant fuel savings.

Thermal efficiency of the Patsari stove averaged 17% in high-power and up to 30% in low-power phases. Thermal efficiencies of the “Plancha” stove from Guatemala showed a similar pattern where efficiencies in the high-power phase of the WBT (9%) were considerably lower than those in the low-power phase (16%) [20,21]. The magnitude of the difference, however, was much greater for the Patsari, although both improved stoves, the Plancha and the Patsari, are Lorena-style stoves and built with similar materials (bricks, clay, and sand). The differences in thermal efficiency are probably the result of improved combustion chambers in the design of the Patsari, which appear to improve operational conditions such that fuel savings in the field are greater than 60% and are comparable to 50–75% reported by Ayoub [13] for a metallic stove.

In these communities in Mexico cooking accounts for the bulk of fuelwood consumption (usually from 80% to 95%), with tortilla making accounting for 43% of total fuelwood use (57% including the preparation of the tortilla mix *nixtamal*), for which the average family in Cherranatzicuri and Jaracuaro villages needs more than 4 kg of fuelwood daily [6]. The second most energy intensive task is the preparation of beans, which are first cleaned, washed, and simmered for 3.5–4 h in a ceramic pot, during which water is frequently added. Since these low-power tasks account for so much of the fuelwood and energy requirements for cooking, it is perhaps not surprising that, in the WBT, the low power simmering phase was a better indicator of fuel efficiency in the field compared to the high-power WBTs, which showed no relationship to actual fuel savings estimated by the KPT. This raises fundamental questions about the utility of the high-power WBTs as indicators of stove performance in communities. Perhaps more importantly it suggests that stoves that have been promoted on the basis of fuel savings demonstrated by laboratory WBTs are likely not realizing these savings in practice. In a similar manner, many greenhouse gas and air pollution emissions estimates that are also based on laboratory WBTs also do not represent the situation in real communities [22]. At a minimum, more emphasis should be placed on the low-power phase of the test unless it is demonstrated that specific local cooking in households derives the majority of energy consumption from high-power cooking tasks. Although measurement of exact quantities of wood used for each cooking task would be very invasive to residents of the households during a KPT, in future stove performance studies CCTs on common cooking tasks could be performed to determine the proportion of cooking tasks using high-power to the proportion using low-power as a prelude to using the WBT. Of course, the KPT would be better suited to assess the effectiveness of the stove in achieving fuelwood savings, but the CCT may aid designers in interpreting the results of the WBT in the design phase.

#### 4.3. Cold start vs. hot start

The WBT includes both cold start and hot start phases. The relevance of each phase, however, is also dependent on cooking practices in local communities. In many households in these communities the fire is lit around 5 a.m. in the morning and will remain warm through most of the day, although perhaps not as warm as in the second phase of the WBT when the stove was lit very recently. Although the thermal efficiencies of the high-power warm start phase are likely to be more representative of the majority of daily activities, therefore, this phase was still not indicative of the fuel savings demonstrated by the low-power phase WBT and the KPT. Thermal efficiencies for Patsaris, TSF, and U-type stoves were quite similar during this phase.

#### 4.4. Length of KPT

Performing a KPT is both time- and resource-intensive, and often the reason given for selecting less informative stove performance tests (SPTs) [19]. Conducting the KPT on a longitudinal basis, however, remains the only current test that evaluates energy performance of the stove in communities. Further, since few reported studies in the literature have extensively performed the KPT, a continuing issue is what the optimal sampling time would be for the KPT that minimizes impact on participants (and expense and effort required for conducting the KPT), while achieving maximum benefit in reduction of variability between and within households. This is not only important for sample size calculations in reducing the number of households that are needed to show statistically significant differences, but also important in reducing potential sampling bias in estimating the energy performance of the improved stove. Minimizing the impact on participants also increases the likelihood of participant retention in the study, which also has resource implications in reducing the over sampling necessary in the initial stages.

With little data with which to evaluate the optimal period to perform the KPT, the current study conducted the KPT on a daily basis for a 7-day period, determined primarily to cover a week's activities rather than from statistical rationales. As a result of the daily measurements, the utility of the KPT sampling time in collecting representative data can be evaluated, especially given the decline in study participation over the 1-year period. Fig. 8 shows the cumulative average fuel consumption for exclusive users of open fires over successive 24-h periods. The coefficient of variation reduced from 0.54 to 0.24 by the end of the sampling period. By the fourth day, 84% of the reduction in the coefficient of variation had occurred and the average fuel consumption was 3.51 compared to the average at the end of the sampling period of 3.39. Thus, if the KPT was performed for 4 days instead of the full sampling period a maximum potential bias of 3.5% in average fuel consumption estimates might be incurred, with a corresponding increase of 5% in the coefficient of

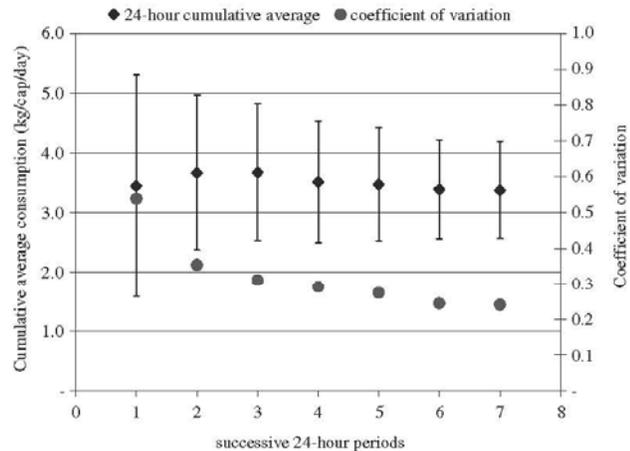


Fig. 8. Cumulative per capita average fuelwood consumption on successive days during the KPT.

variation. Using the coefficients of variation here, this increase of 5% would imply an approximate increase of six households to observe 20% difference in mean fuel consumption.

In general, there were no significant differences in energy consumed per capita between weekdays and weekends. In a few cases the consumption of energy in the home increased on the weekend as the husband or children usually worked or studied away from home and returned during the weekend. Conversely, in rare cases the family was outside the home on Saturday or Sunday and did not cook, but within the households measured here no differences were observed. While other areas may differ therefore, in this area, choosing 4 days for a KPT irrespective of day of the week would give a good approximation of energy consumption. Clearly seasonal differences are important, however, and resources would be better spent on measuring on multiple occasions if annual average energy consumption was desired. For a before and after longitudinal study, measurements should occur after a year of use, or at least in the same season, to avoid these seasonal differences and bias in estimates. Unfortunately, this has significant resource implications for performing stove effectiveness tests as participant drop out rates as a result of migration, absence for work, and lack of willingness tend to increase over the longer time frame, necessitating an increased sample size to account for these losses. Even greater increases in sample size would be required, however, if a cross-sectional design was used due to considerable between-home variability, although the homes could be sampled concurrently, resulting in a study that could be completed in a shorter time frame.

## 5. Conclusions

The Patsari stove offers clear benefits with respect to traditional stoves, with an average reduction in energy

consumption of 67% in households exclusively using fuelwood. Average reduction in energy consumption reached 66% for fuelwood and 64% for LPG in households using mixed fuels, and fuelwood savings ranged from 44% to 65% in the CCT for tortilla making, the main cooking task in Mexican rural households.

Methodologically, our study shows that the high-power phases of the WBT were not indicative of the fuel consumption in rural communities. Although the low-power phase of the WBT was more indicative, it still underestimated the fuel savings in rural communities. Field testing in rural communities, such as the KPT, is of critical importance, therefore, in estimating the benefits of improved stoves. Although laboratory testing using simulated cooking activities has been developed as a metric to compare stoves across regions, it is of questionable benefit in estimating the real fuel saving of the stove. While it is useful in the design phase, the interpretation of WBT results should be combined with CCT testing of the relative importance of high- and low-power cooking phases in local cooking activities. Ideally, the KPT should be reduced in length to 4 days of assessment and performed during the same season in before and after interventions in these communities, to reduce participant impact. Finally, the decrease in the use of other secondary fuels like LPG when an improved fuelwood stove was introduced confirms that total household energy consumption across all stoves and fuels should be assessed to provide robust data on the effectiveness of the stove.

Since success of an improved stove program ultimately is defined by the numbers of stoves in actual usage in communities, rather than simply the number of stoves that are disseminated and built, stove performance should be evaluated from multiple perspectives and not solely on thermal efficiency or fuel consumption. In particular, both stove performance and acceptance by local communities should be incorporated in the evaluation.

### Acknowledgments

We want to extend our gratitude to the families of the rural communities from the Meseta Purhepecha of Michoacán, who taught us a great deal about fuelwood use and the process of technology adoption. The authors express their gratitude to the Interdisciplinary Group on Appropriate Rural Technology (GIRA, A.C.) and to the Center for Ecosystems Research (CIECO) of the National Autonomous University of Mexico (UNAM), for both human and logistic support and by providing the necessary infrastructure to realize this study. We are also grateful for the financing offered by the National Council of Science and Technology of Mexico (CONACYT Fondo Sectorial de Investigación Ambiental, Project 23640), the PAPIIT Program, UNAM (Project IN109807), the UC MEXUS CONACYT collaborative grant program, and Shell Foundation. We also recognize and thank the methodological backup offered by Aprovecho Research Center and the University of California as part of the “Household Energy Program” of the Shell Foundation.

### References

- [1] Werekro-Brobby ChY, Hagen EB. Biomass conversion and technology. England: Wiley; 1996.
- [2] Horta LA, Trossero MA. Introducing WEIS: the FAO wood energy information system. Biomass energy: data, analysis and trends; 1998.
- [3] Díaz R. Consumo de leña en el sector residencial de México. Evolución histórica y emisiones de CO<sub>2</sub>. Tesis Maestría en Ingeniería. México, D.F. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM; 2000.
- [4] Smith KR. Indoor air pollution and acute respiratory infections. *Indian Pediatr* 2003;40(9):815–9.
- [5] Smith KR, Mehta S. The burden of disease from indoor air pollution in developing countries: comparison of estimates. *Int J Hyg Environ Health* 2003;206(4–5):279–89.
- [6] Masera O. Socioeconomic and environmental implications of fuelwood use dynamics and fuel switching in rural Mexico. Berkeley, CA: University of California; 1995.
- [7] Masera O, Navía J, Arias T, Riegelhaupt E. Dendroenergía para el Desarrollo Rural: Patrones de Consumo de Leña en Tres Microregiones de México. Proyecto: FAO/MEX/TCP/4553(A), Síntesis de Resultados, Pátzcuaro, Michoacán, 1997.
- [8] Masera O, Saatkamp B, Kammen D. From linear fuel switching to multiple cooking strategies: a critique and alternative to the energy ladder model. *World Dev* 2000;28(12):2083–103.
- [9] Saatkamp BD, Masera O, Kammen DM. Energy and health transitions in development: fuel use, stove technology, and morbidity in Jarácuaro, Mexico. *Energy Sustain Dev* 1999;4(2):7–16.
- [10] Smith KR. Biomass cookstoves in global perspectives: energy, health, and global warming, en: Organización Mundial de la Salud (OMC). Indoor air pollution from biomass fuel. Ginebra: Documento de trabajo; 1992.
- [11] Manibog F. Improved cooking stoves in developing countries: problems and opportunities. *Annu Rev Energy* 1984;9:199–227.
- [12] 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.
- [13] Ayoub J, Brunet E. Performance of large portable metal woodstoves for community kitchens. *Renew Energy* 1996;7(1):71–80.
- [14] Ballard-Tremere G, Jawurek HH. Comparison of five rural, wood-burning cooking devices. *Biomass Bioenergy* 1996;11(5):419–30.
- [15] Dutt G, Navia J. La combustión de biomasa y la estufa mejorada. Documento de trabajo No. 6, Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiaada. Mexico: A.C. Pátzcuaro Michoacán; 1987.
- [16] Volunteers in Technical Assistance (VITA). Testing the efficiency of wood-burning cookstoves. Arlington, VA: Provisional International Standards; 1985.
- [17] Baldwin SF. Biomass stoves: engineering design, development, and dissemination. Princeton, NJ: Center for Energy and Environmental Studies; 1986.
- [18] GIRA—CIECO. Promoting clean multiple fuel cooking for improved rural livelihoods in Latin America. Final report monitoring studies. Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiaada, A.C. Pátzcuaro Michoacán, Mexico, 2006.
- [19] Visser P. The testing of cookstoves: data of water-boiling test as a basis to calculate fuel consumption. *Energy Sustain Dev* 2005;9(1):16–24.
- [20] Boy E, Bruce N, Smith KR, Hernandez R. Fuel efficiency p fan improved wood-burning stove in rural Guatemala: implications for health, environment and development. *Energy Sustain Dev* 2000;4(2):23–31.
- [21] McCracken JP, Smith KR. Emissions and efficiency of improved woodburning cookstoves in highland Guatemala. *Environ Int* 1998;24(7):739–47.
- [22] Edwards RD, 2006. Emissions of air pollution and GHG from the household sector. Workshop held at SINCIERE Opening, November 22–23, 2006, Beijing, China.

# CAPÍTULO 5

## PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA ESTUFA EFICIENTE DE LEÑA

### 5.1 Síntesis de la Evaluación de la Estufa Patsari

La estufa Patsari demostró ser más eficiente que los fogones tradicionales en tareas de bajo poder, y menos eficiente que estos últimos en alto poder, particularmente en pruebas de “inicio en frío”. En la PCC para tortillas, la estufa Patsari demostró ahorros del 59% al 67% con relación a los fogones tradicionales. En el PFC la estufa Patsari mostró ahorros en el consumo de energía del 67% tanto para usuarios exclusivos de leña como para usuarios mixtos (Berrueta et al., 2007). Estos últimos utilizan el gas LP únicamente para cubrir el 12% de sus necesidades energéticas de cocción y su uso tiende a disminuir al utilizar la estufa Patsari.

Estudios de investigación realizados en el marco del proyecto Patsari, permitieron completar la evaluación de la estufa y aportar elementos para el desarrollo de un nuevo diseño de estufa eficiente que mantuviera los aspectos positivos de la tecnología y superara los negativos. Los estudios a los que se hace mención, sus principales resultados y las aportaciones en relación con la tecnología son:

- **Evaluación de los impactos a la salud** por el uso de fogones tradicionales y estufas Patsari en comunidades de la Meseta Purhépecha (Riojas, *et al.*, 2006), principales resultados:
  - Las mujeres usuarias de estufas Patsari tienen en promedio entre 20% y 30% menos riesgo de presentar síntomas de enfermedades respiratorias superiores, y 35% y 58% menos riesgo en ardor de ojos y ojos llorosos respectivamente, que las mujeres que usan un fogón.
  - Los niños que viven en casa donde se usa Patsari tienen entre 10% y 15% menos riesgo de presentar tos y dolor de garganta.
- **Evaluación de la contaminación intramuros** por humo de leña (Zuk, *et al.*, 2006, Masera, *et al.*, 2007, Armendáriz, *et al.*, 2007), principales resultados:
  - Una estufa Patsari contribuye entre el 70 y el 95% en la reducción de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  en el interior de las cocinas, de un promedio de  $1.02 \text{ mg/m}^3$  a  $0.34 \text{ a } 1.02 \text{ mg/m}^3$ .
  - La exposición personal a partículas  $PM_{2.5}$  se disminuye en 50% (de  $211 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  a  $106 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ )<sup>1</sup>.
  - Con relación a los niveles de Monóxido de Carbono se disminuyen en un 66%; (de 8.8 ppm a 3.02 ppm) cerca de la estufa y 69% (2.21 ppm a 1.09 ppm) en mediciones personales<sup>2</sup>.
- **Evaluación de la percepción sobre la calidad de vida** de las familias por la introducción de estufas Patsari (Troncoso, *et al.*, 2006; Magallanes, 2006), principales resultados:
  - El principal beneficio que las usuarias perciben al cambiar de tecnología es sacar el humo fuera de la cocina y tener un ambiente más limpio en la cocina.
  - Se reconocen otros beneficios que van más allá de las molestias que ocasiona el humo en la salud o el ahorro en el combustible, como: tener una cocina bonita, que ahora la familia pasan más tiempo reunida en la cocina mientras la mujer cocina.
  - Se reconoce que es un cambio que requiere de un proceso de aprendizaje (sensibilización, seguimiento, capacitación) y de acompañamiento.
- **Evaluación del impacto en los gases de efecto invernadero** por la combustión de biomasa y el potencial de mitigación por estufas Patsari (Johnson, *et al.*, 2007), principales resultados:

<sup>1</sup> El valor permitido por la norma para un ambiente limpio es de  $65 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  (Zuk et al., 2006)

<sup>2</sup> Para este gas, la EPA propone valores máximos permisibles de 9 ppm (o  $10 \text{ mg/m}^3$ ) en ocho horas (USEPA, 1997).

- Una estufa Patsari puede evitar entre 5 y 8 ton de emisiones de CO2 equivalente por año.

Los resultados de los estudios llevados a cabo contribuyen a entender la complejidad de los aspectos relacionados con la difusión de estufas eficientes de leña. Lograr que en el medio rural se concreten los beneficios que una tecnología tiene por si misma no es trivial. La estufa tiene que estar adaptada a las condiciones del usuario para que éste la utilice apropiadamente, esto implica que el diseño sea flexible, que responda a las necesidades concretas y que sea capaz de sufrir adaptaciones.

Con base en las aportaciones de los diferentes estudios realizados y del presente proyecto de investigación se presentan las fortalezas y debilidades encontradas en la estufa Patsari con relación a los fogones tradicionales (Tabla 3).

Tabla 3. Fortalezas y Debilidades de la Estufa Patsari.

Aspecto evaluado	Fortalezas	Debilidades
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proceso de construcción</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Se utiliza un molde metálico que asegura las dimensiones interiores de la estufa.</li> <li>– El principal componente de la estufa es barro el cual suele ser de bajo costo y en ocasiones no tiene ningún costo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– El molde es pesado y tiene muchos componentes.</li> <li>– Existen regiones donde el barro no es de buena calidad y es necesario transportarlo, por la cantidad necesaria para cada estufa, esto no es conveniente.</li> <li>– La mezcla húmeda que se utiliza requiere de hasta 5 días para secar y se pueda utilizar estufa, esto desanima a las usuarias y además obliga al constructor a regresar a la casa a encender la estufa, ocasionando gastos adicionales.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operación y mantenimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Una vez encendido el fuego la estufa calienta lo suficiente para cocinar todo tipo de alimentos.</li> <li>– El mantenimiento que se tiene que dar es de limpieza básica, no se requiere herramienta especial.</li> <li>– Si la estufa se utiliza de manera constante (todos los días) el calor residual facilita que de un día a otro se alcance la temperatura de operación rápidamente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La estufa requiere utilizar leña delgada y seca, si no se cuenta con ella se vuelve difícil encender el fuego.</li> <li>– Debido a la masa de la estufa y al calor que absorbe al inicio, tarda mucho en calentar por lo que cocinar platillos sencillos que requieren cierta rapidez no son prácticos de hacerse en la estufa.</li> <li>– La estufa es muy sensible a la falta de mantenimiento, sin este, regresa humo por la entrada de leña, no calienta bien, etc. Se requiere dar mantenimiento constante (hasta 2 veces por semana)</li> <li>– Las usuarias requieren de un acompañamiento cercano durante los primeros 2 meses de uso de la estufa.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Versatilidad y durabilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La configuración de los comales permite cocinar varios platillos a la vez.</li> <li>– Los comales metálicos tienen una duración de más de 2 años, el costo no es alto y son comerciales por lo que el reemplazo de los mismos es factible de hacerse por las mismas usuarias.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La estufa es sensible a la calidad de los materiales y de la construcción, si estos no son los adecuados se deteriora rápidamente, se desmorona o puede llegar a romperse en corto tiempo.</li> <li>– El mantenimiento mismo de la estufa ocasiona que ésta se desmorone en algunas partes interiores (túneles, cámara de combustión) ocasionando su deterioro.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costos directos e indirectos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Al utilizarse accesorios comerciales (comales, tubos, gorro de chimenea) es posible conseguir mejores precios en compras de mayoreo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– En comunidades apartadas se incrementa mucho los costos de transporte para el abasto de materiales y traslado de constructores.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beneficios asociados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– La estufa expulsa de manera efectiva el humo fuera de la cocina evitando riesgos de contraer enfermedades.</li> <li>– Al estar encerrado el fuego en una cámara de combustión el riesgo por quemaduras se elimina.</li> <li>– El ahorro de combustible es notorio cuando la estufa se utiliza de manera cotidiana.</li> <li>– Al utilizar leña seca se logra una buena combustión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Aún hay tareas de cocinado que las usuarias prefieren hacerlas con el fogón abierto (nixtamal, cocer frijol, calentar agua para bañarse)</li> <li>– La falta de mantenimiento y el mal uso de la estufa ocasionan que haya fuga de humo y que éste se quede en el interior de la cocina.</li> </ul>

Los resultados presentados demuestran que, adecuadamente diseñadas y diseminadas, las estufas Patsari pueden contribuir significativamente al mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes rurales y de su entorno, así como contribuir a la mitigación de problemas ambientales de tipo global. Sin embargo, el modelo de estufa Patsari a base de la mezcla barro-arena-cemento, con todos los aspectos positivos detectados en los estudios de investigación realizados (salud, contaminación interior, emisiones, calidad de vida), en términos de diseño, presenta debilidades y diversos aspectos que dificultan su implementación a mayor escala, por supuesto, también brinda sin lugar a dudas beneficios que deben conservarse en una nueva propuesta tecnológica. Estos aspectos pueden agruparse de la siguiente manera:

**a) Aspectos relacionados a la eficiencia y el funcionamiento:**

- Se tiene mucha sensibilidad a la falta de mantenimiento, esto ocasiona que el humo se regrese por la entrada de leña y que el calor no se distribuya de manera homogénea en los comales.
- Variaciones pequeñas en las dimensiones de algunos espacios interiores afectan el funcionamiento de la estufa (por ejemplo, el diámetro de los ductos que conectan la cámara de combustión principal con las hornillas secundarias).
- En el comal principal se detecta una distribución inadecuada de la temperatura, existen zonas equidistantes con variaciones importantes de temperatura.
- En muchos casos, principalmente cuando las usuarias utilizan leña húmeda la generación de carbón es alta.

**b) Aspectos relacionados al programa de difusión:**

- El abasto de materiales y la logística que implica la construcción de estufas hacen que se tengan costos elevados para un programa de construcción masiva.
- Las nuevas usuarias requieren, además de capacitación para aprender a utilizar la estufa, acompañamiento para que no desistan en el intento, esto encarece el programa de difusión.
- Se requiere de un proceso intenso de capacitación para formar constructores especializados ya que la estufa tiene muchos detalles técnicos que se deben cuidar al máximo.

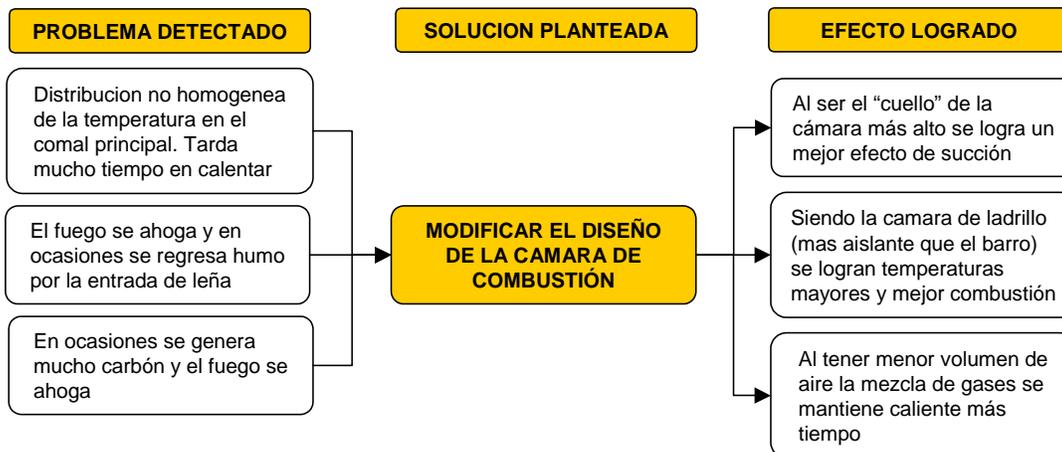
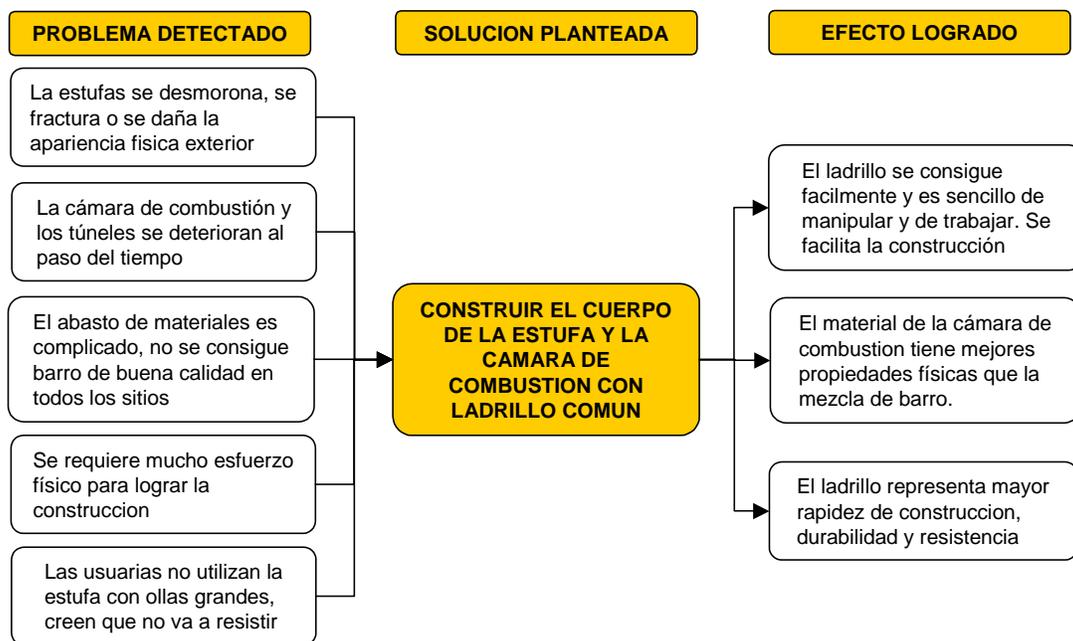
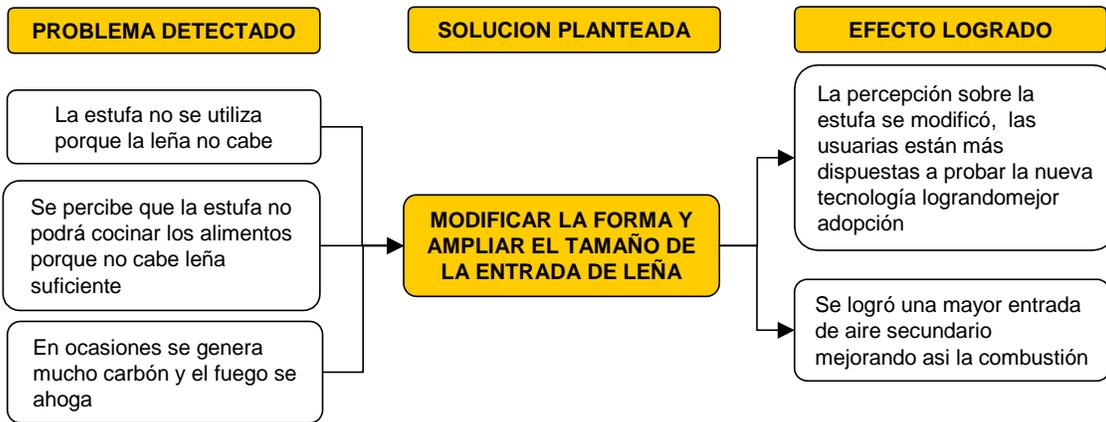
**c) Aspectos relacionados al proceso de adopción de la tecnología:**

- La percepción de las usuarias es que la entrada de leña es muy pequeña, por tanto descartan a priori la estufa por creer que no podrán cocinar sus alimentos.
- La estufa presenta dificultades en el encendido, el centro de la cámara de combustión esta muy lejos de la entrada de la leña.
- La estufa se demora mucho tiempo en llegar a su temperatura de operación, esto desespera a las usuarias.
- Se requiere de mucho mantenimiento en los conductos interiores para evitar que se bloquee el flujo de los gases de combustión.
- El exterior de la estufa se deteriora fácil y rápidamente dando una apariencia de abandono o de una estufa muy usada aun cuando ésta tenga menos de 6 meses de uso.

## **5.2 Propuesta de diseño**

Como resultado de la evaluación realizada y con la información proveniente de los estudios paralelos se agruparon los diferentes puntos de atención para el re-diseño y mejora de la tecnología, estos puntos se basan en los 3 aspectos mencionados anteriormente, de tal forma que se encontraron algunas soluciones prácticas para potenciar el impacto de la estufa Patsari.

La Figura 11 muestra el resultado de éste análisis y las acciones que se realizaron.



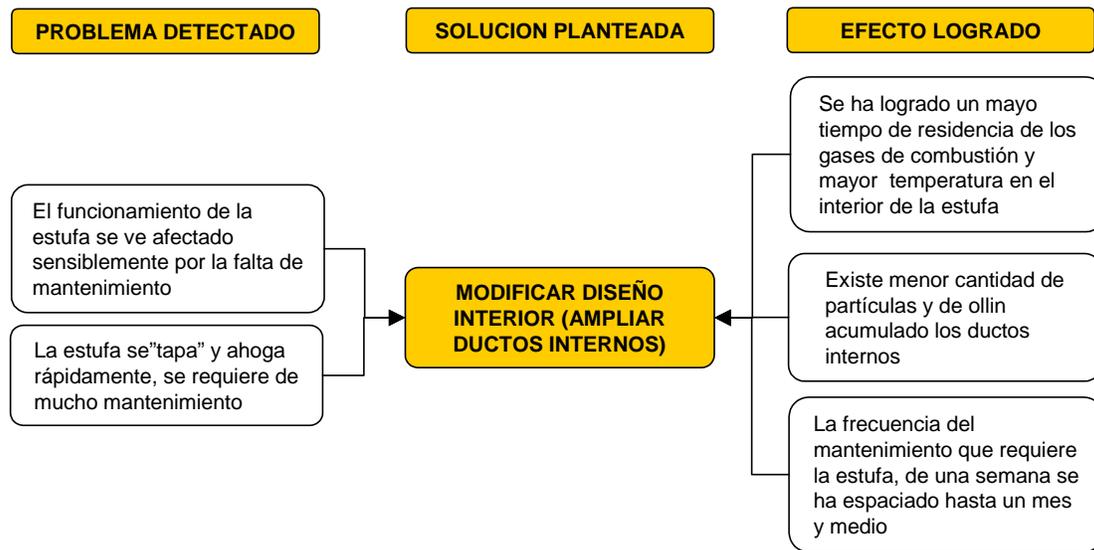


Figura 11. Árbol de problemas y soluciones.

Con base en la información presentada anteriormente se definieron, experimentaron, probaron y evaluaron las diversas modificaciones al diseño de la estufa Patsari, dando lugar a un nuevo modelo de estufa Patsari llamado "**Patsari Jimbani**", que en lengua Purhepecha significa "la *nueva* Patsari" (Figura 12 y 13):



Figura 12. Nuevo modelo de Estufa Eficiente: Patsari *Jimbani*



Figura 13. Nuevo modelo de Estufa Eficiente: Patsari *Jimbani*

**Descripción de las modificaciones realizadas al diseño:**

1. **Entrada de leña**, de estar formada por una teja de barro con forma de media luna y un claro de 226 cm<sup>2</sup>, la cual daba la percepción de que la leña de tamaño regular no podría ser utilizada, ahora es de forma rectangular construida con ladrillo y tiene un área de entrada de 264 cm<sup>2</sup>. Aunque ciertamente el área es 17% mayor, se tiene una mejor percepción en cuanto a la capacidad de leña que se puede introducir, lo cual es bien recibido por las nuevas usuarias. El tamaño de la entrada se ajustó a las dimensiones de los materiales comerciales (ladrillo 24x12x6) para facilitar la difusión masiva, en cambio la teja era un diseño de fabricación especial.
2. **Cámara de combustión**, se realizaron modificaciones en varios aspectos:
  - a. *Ubicación*: El centro de la cámara de combustión se recorrió 10 cms hacia la entrada de leña facilitando así el encendido del fuego, y logrando una distribución homogénea en el comal principal, como se muestra en la Figura 14, la distribución de la temperatura en el comal se ve afectada por el flujo de la flama y de los gases calientes que tiende a ir hacia la salida del humo.

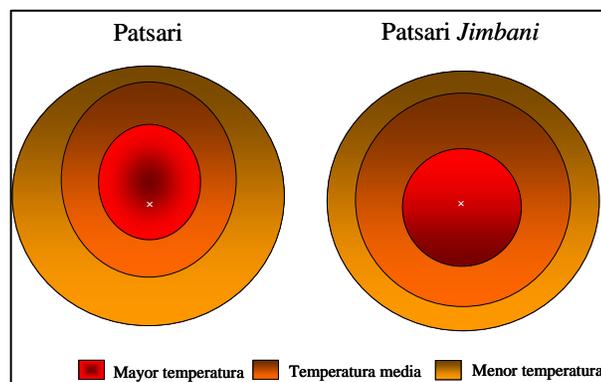


Figura 14. Distribución de temperatura en el comal principal de estufas Patsari.

- b. *Diseño*: la geometría de la cámara de combustión se modificó, de estar formada en dos partes, la inferior por un cilindro circular de 27 cm de diámetro y 11 cm de altura, y la superior por un cono invertido con base de 52 cm de diámetro y altura de 9 cm, a un cubo con base de 20 x 20 cm y 20 cm de altura (Figura 15). De esta forma en la cámara de combustión se tiene menor volumen de aire frío y se logra el efecto de una chimenea interior (Bryden et al., 2005) facilitando el proceso de combustión y logrando mayores temperaturas.

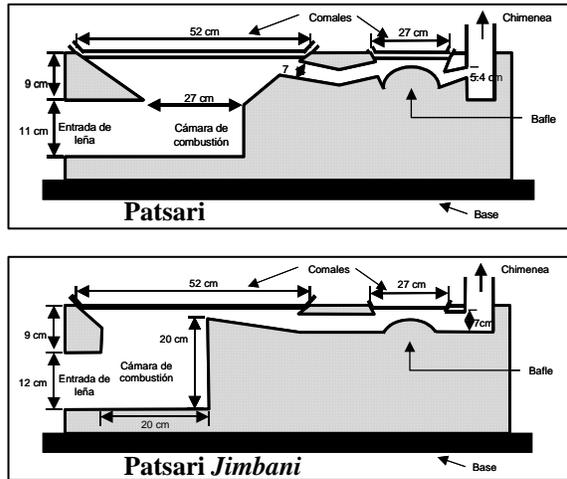


Figura15. Dimensiones internas de las estufas Patsari.

- c. *Material*: La cámara de combustión en la estufa *Patsari Jimbani* se construye con ladrillo rojo, este ladrillo presenta cierta porosidad que le da propiedades aislantes (difusividad térmica,  $\propto \times 10^5$ , 0.028-0.034 m<sup>2</sup>/s), sin llegar a ser un ladrillo refractario, a diferencia del modelo anterior de estufa Patsari de barro (difusividad térmica,  $\propto \times 10^5$ , 0.101 m<sup>2</sup>/s), que es una masa compacta de barro con pérdidas de calor a través del cuerpo de la estufa.

3. **Materiales de construcción**: El cuerpo del nuevo modelo de estufa Patsari (Figura 16) se construye a partir de ladrillo común, el ladrillo presenta varias ventajas: en términos de abasto de materiales su adquisición es más sencilla y de mayor distribución; en cuanto al proceso de construcción éste es más rápido y requiere menor esfuerzo; en cuanto a durabilidad, el deterioro del ladrillo es mucho menor que el barro. La cámara de combustión y los túneles también son de ladrillo aumentando la durabilidad y facilitando la construcción.

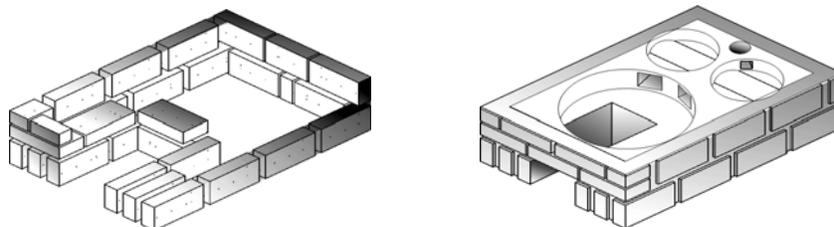


Figura 16. Proceso de construcción del nuevo modelo de estufa Patsari.

4. **Configuración**:

- a. *Interna (túneles)*: Los orificios por los que los gases calientes fluyen de la cámara de combustión hacia las hornillas secundarias se forman con un material comercial denominado celosía, es un ladrillo de barro cocido con huecos, los cuales hacen la función

del túnel que en la estufa Patsari se formaba con la mezcla de barro. Este material presenta ventajas por su durabilidad y facilidad de construcción (Figura 17).



Figura 17. Vista interna de la estufa Patsari *Jimbani*.

- b. *Externa (comal principal)*: Con la finalidad de facilitar la transferencia de calor hacia los recipientes cuando se cocinan alimentos que no se colocan directamente sobre el comal (como es el caso de las tortillas) se implementó un “disco” de 10 cm de diámetro en el centro del comal, este disco es del mismo material que el comal y al quitarlo queda un hueco que, al cocinar con ollas, el fuego toca de manera directa la superficie del recipiente (Figura 18).



Figura 18. Detalle de la modificación realizada al comal principal

En el Anexo 5 se presentan los planos y otra información técnica más detallada sobre la estufa Patsari *Jimbani*.

### 5.3 Evaluación del modelo Patsari *Jimbani* (“La nueva Patsari”)

#### 5.3.1 Eficiencia térmica y funcionamiento

Con base en las tres fases de la prueba de ebullición de agua se comparó el funcionamiento de la nueva Patsari con la Patsari de barro, la Tabla 4 muestra los resultados de esta prueba. El incremento en la eficiencia térmica en la etapa de alto poder (inicio frío) es significativo en la estufa Patsari *Jimbani* (de 7% a 20%), así mismo el tiempo para llegar a ebullición disminuyó de 60 minutos a 27, teniendo además una disminución considerable en el consumo específico de combustible (mayor al 70%). Todo esto es muy importante ya que una de las mayores dificultades para la adopción de la estufa es la rapidez con la cual las usuarias pueden comenzar a utilizar la estufa al iniciar el día.

Por su parte, tanto en la etapa de alto poder (inicio caliente) como en la etapa de bajo poder (fuego lento), ambas estufas presentan eficiencias térmicas similares, el indicador de mayor importancia para la usuaria en esos casos es la disminución del tiempo de ebullición, el cual sigue siendo significativo en la Patsari *Jimbani*.

Tabla 4. Comparativo de los resultados de la PEA ( $\pm$  Desv Std)

<b>1.ALTO PODER (inicio frío)</b>	<b>Unidad</b>	<b>Patsari (barro)</b>	<b>Patsari <i>Jimbani</i></b>
Tiempo para ebullición	min	60.0 $\pm$ 3.5	27.3 $\pm$ 0.6
Velocidad de quemado	g/min	30.9 $\pm$ 4.2	17.0 $\pm$ 3.9
Eficiencia térmica	%	7 $\pm$ 0.01	20 $\pm$ 0.06
Consumo específico de combustible	g/liter	487 $\pm$ 79	129 $\pm$ 35
Potencia (firepower)	kW	9.1 $\pm$ 1.2	4.9 $\pm$ 1.1
<b>2. ALTO PODER (inicio caliente)</b>			
Tiempo para ebullición	min	47.3 $\pm$ 7.2	25 $\pm$ 1.0
Velocidad de quemado	g/min	15.1 $\pm$ 1.9	19.6 $\pm$ 3.2
Eficiencia térmica	%	17 $\pm$ 0.04	16 $\pm$ 0.03
Consumo específico de combustible	g/liter	182 $\pm$ 7	138 $\pm$ 27
Potencia (firepower)	kW	4.4 $\pm$ 0.5	5.7 $\pm$ 0.9
<b>3. BAJO PODER (fuego lento)</b>			
Velocidad de quemado	g/min	7.9 $\pm$ 3.9	8.6 $\pm$ 1.1
Eficiencia térmica	%	30 $\pm$ 0.12	28 $\pm$ 0.02
Consumo específico de combustible	g/liter	193.4 $\pm$ 10.5	166.5 $\pm$ 20.5
Potencia (firepower)	kW	2.3 $\pm$ 1.1	2.5 $\pm$ 0.3

Con base en estos resultados podemos observar que la mayor ganancia se da en la etapa de “inicio frío”, dado que el comal principal tiene un hueco en el centro el fuego toca de forma directa el fondo de la olla, en la Patsari de barro mucha de la energía se empleaba en calentar la masa de la estufa, en cambio, en la Patsari *Jimbani*, por el nuevo material de la cámara de combustión y el fuego directo a la olla, la eficiencia en esta etapa se eleva.

Esta prueba de laboratorio puede verificar el mejor desempeño del nuevo modelo de estufa Patsari, con los inconvenientes presentados en Berrueta, et al (2007), sin embargo esta evaluación nos permite determinar que los cambios realizados sí tienen impactos importantes en el funcionamiento de la estufa, aunque podemos verificar que únicamente para ciertas tareas de alto poder, en tareas de cocinado lento o bajo poder aparentemente no hay ventajas.

### 5.3.2 Comparación del desempeño de la Estufa Patsari vs Patsari *Jimbani*

Con el propósito de evaluar y comparar el desempeño del nuevo modelo de estufa Patsari (ladrillo) con relación al modelo anterior (barro) se realizaron diversas mediciones que están relacionadas con lo que las usuarias requieren de una estufa de este tipo. Se realizó la prueba de cocinado controlado para tortillas (PCC) y se tomaron mediciones de temperatura en la superficie del comal principal al hervir 3 litros de agua.

1. La prueba de cocinado controlado nos muestra que ambas estufas mantienen un valor similar de consumo específico de combustible (CEC), lo que nos indica que la nueva estufa mantiene una de sus principales características con relación al ahorro de consumo de combustible en comparación con el fogón tradicional. Sin embargo la nueva estufa presenta algunas ventajas que son apreciadas por las usuarias como lo es el menor tiempo de cocinado. La Tabla 5 muestra los resultados de la PCC para la elaboración de tortillas.

Tabla 5. Prueba de Cocinado Controlado para tortillas.

<b>Parámetros</b>		<b>Patsari (barro)</b>	<b>Patsari Jimbani</b>
Alimento cocinado	g	983 ± 6.4	1,014 ± 3.4
Carbón remanente	g	91 ± 10.1	86 ± 8.3
Equivalente de leña seca	g	654 ± 77.5	634 ± 54.3
<b>CEC (leña / alimento)</b>	<b>kg/kg</b>	<b>0.67 ± 0.07</b>	<b>0.62 ± 0.04</b>
Tiempo de cocinado	min	34 ± 4.5	28 ± 3.5

2. La temperatura alcanzada en el centro del comal principal nos permite comparar un aspecto del funcionamiento de una estufa en relación con la otra. La Figura 19 muestra como en lapsos mas cortos de tiempo la nueva estufa Patsari alcanza temperaturas mayores (360°C en 10 minutos vs 74°C de la Patsari de barro), al mismo tiempo que alcanza mayores temperaturas de operación (538°C vs 453°C).

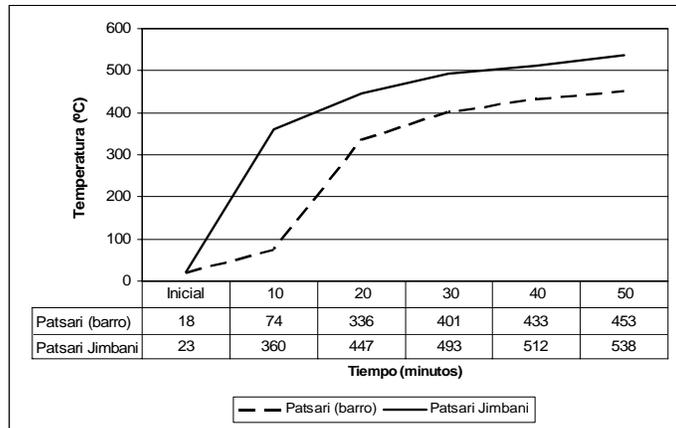


Figura 19. Comparativo de temperaturas en el centro del comal principal

3. Otro aspecto importante es la distribución de temperatura en la superficie del comal principal ya que para la cocción de tortillas se requiere de una temperatura alta en el centro del comal y menor de manera radial hacia la periferia del mismo. La Figura 20 muestra la medición en diferentes puntos del comal comparando la nueva estufa Patsari con la anterior. El punto 1 corresponde al más cercano a la entrada de leña y el 5 a la salida del humo. Es posible observar que en el modelo anterior se presentaban zonas “frías” en la cercanía de la entrada de leña (puntos 1 y 2) y por tanto una distribución inadecuada en radios similares (punto 2 y 4), el nuevo modelo logró tener mayores y una distribución homogénea.

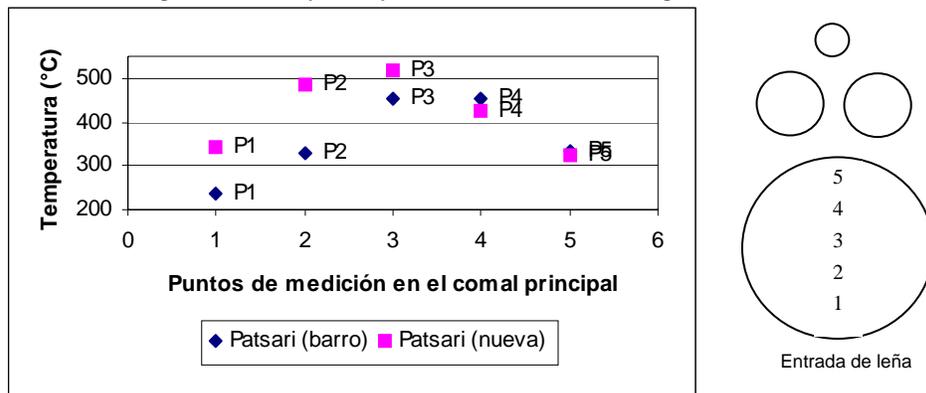


Figura 20. Distribución de temperatura en comal principal a 50 min de operación.

### 5.3.3 Eficiencia nominal de combustión

Con base en el estudio desarrollado por Johnson, et al (2007), el cual es complemento del presente trabajo en el marco del Proyecto Patsari, es posible comparar en términos de la eficiencia nominal de combustión (ENC) ambos modelos de estufa Patsari. La Figura 21 muestra, para varias pruebas y ambos modelos de estufa, la ENC, la cual se define como el porcentaje de carbón emitido como CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>/(CO<sub>2</sub>+CO)).

Johnson, et al (2007) determinó la ENC de los diferentes dispositivos aplicando la prueba de ebullición de agua (PEA) tanto en el laboratorio, en condiciones controladas, como en campo, en cocinas reales. Para el fogón tradicional de 3 piedras encontró que en ambas condiciones la ENC era muy similar (94.2±0.5% y 95.4±2.3%, respectivamente). En cambio para la estufa Patsari de barro encontró que en condiciones de laboratorio la ENC era significativamente más baja que en condiciones de campo (87.2±4.3% vs 92.3±1.3%). En condiciones normales de operación la estufa Patsari Jimbani presentó una ENC de 97.6±2.8%, siendo esta mayor que la ENC de la estufa Patsari de barro.

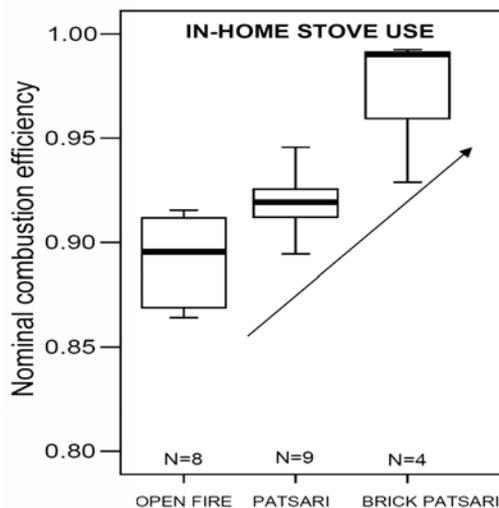


Figura 21. Eficiencia nominal de combustión para cada estufa (Adaptado de Johnson, et al., 2007)  
Notas: "Open fire" se refiere al fogón tradicional de 3 piedras, "Patsari" se refiere al modelo de estufa de barro, "Brick Patsari" se refiere a la Patsari Jimbani.

### 5.3.4 Adaptabilidad, adoptabilidad (aceptación y percepciones de las usuarias)

El modelo de estufa Patsari *Jimbani* ha sido implementado con éxito por el Proyecto Patsari. En dicho proyecto se tienen registros de 1,365 estufas construidas en el estado de Michoacán del 2004 a la fecha, de las cuales 559 corresponden a este nuevo modelo y el resto a estufas de barro. Utilizando la información proveniente de la base de datos de usuarias que tiene el Proyecto Patsari, donde se encuentran registradas todas las estufas que este proyecto a construido y de las cuales se ha dado seguimiento y monitoreo a 1,077 estufas, se realizó el siguiente análisis a fin de determinar indicadores de adopción y aceptación del nuevo modelo de estufa Patsari.

De la totalidad de estufas a las que el proyecto a dado seguimiento en los primeros 3 años de construcción se analizaron las condiciones de uso de las mismas y se clasificaron en 4 categorías, mismas que fueron analizadas por modelo de estufa, de barro o de ladrillo. Las categorías son:

- Usuarias cotidianas*, se refiere a estufas que son utilizadas al menos 4 días de la semana para realizar todas o las principales tareas de cocinado. Son usuarias que ya se han dado cuenta de los beneficios que la estufa Patsari les provee en términos de ahorro, salud y ambiente.

- b) *Usuarias eventuales*, se refiere a estufas que sólo se utilizan 1 o 2 días de la semana o que se utilizan sólo en ciertas épocas del año (principalmente cuando hay leña seca). Son estufas en buenas condiciones y usuarias que ya se han dado cuenta de los beneficios.
- c) *Estufas sin utilizar*, son estufas que se encuentran en buenas condiciones pero que no se utilizan por diversas razones, tales como: la familia migró o no vive en donde se construyó la estufa, existe la intención de construir una nueva cocina, etc.
- d) *Estufas abandonadas o destruidas*, son estufas que están en malas condiciones o que ya no existen en las cuales las usuarias argumentan que no se adaptaron a la estufa, no les gustó o que la estufa no sirvió para realizar sus tareas de cocinado.

La Figura 22 muestra el resultado de este análisis del cual es posible establecer, sin lugar a dudas, que la estufa Patsari *Jimbani* ha tenido una mejor aceptación entre la población.

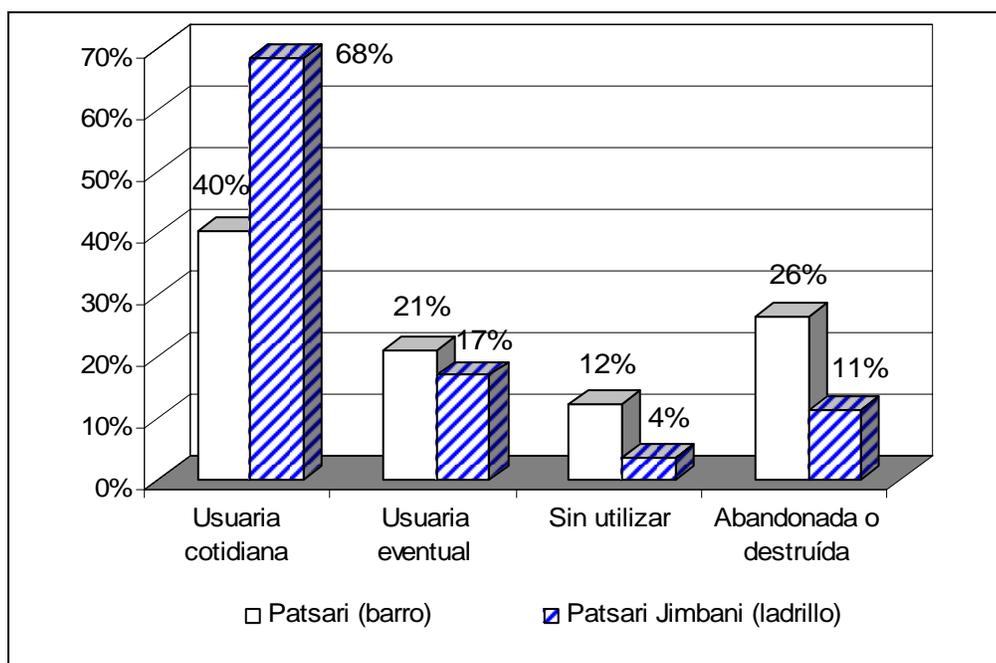


Figura 22. Adopción de la estufa Patsari de barro vs Patsari *Jimbani*

Con base en la información relacionada al uso de la estufa podemos observar que la aceptación del nuevo modelo de estufa se ha incrementado considerablemente (de 61% a 85%, considerando el total de las usuarias), por su parte, el proceso de abandono de la tecnología se redujo en más del 50%, esto se debe a que la nueva estufa es más sencilla de utilizar y requiere menor mantenimiento. En términos de percepción, algunas usuarias comentan lo siguiente con relación a ambos modelos de estufas:

- *“Me gusta (la estufa Patsari) porque no hay humo en la cocina y no me caliento igual que en un fogón abierto y ahorro como un 60 % de la leña”* (Maria del Rosario Martínez, Casas Blancas, Mpio Salvador Escalante)
- *“No hay humo en la cocina, se hacen varias comidas a la vez y se aprovecha para hacer tortillas y calentar las comidas, gasta poca leña”* (Silvia Fuerte Pérez, Chihuero, Mpio de Morelia)
- *“No gasta mucha leña, ahorra como un 50 % de leña, no hay humo en la cocina, no se queman los brazos para poner las tortillas”* (Esthela Jasso Figueroa, Tanaco, Mpio Cherán)

El programa de monitoreo, el cual consiste en realizar visitas casa por casa y documentar el uso de las estufas, con base en entrevistas a las usuarias, permite conocer de manera directa los problemas a los que se enfrentan las usuarias y sus familias para adaptarse a la nueva tecnología. En términos del desarrollo de la tecnología esta tipo de información marca la pauta para la innovación y el diseño. Muchos de los cambios realizados fueron sugeridos por las usuarias y luego evaluados en laboratorio para determinar su pertinencia y las consecuencias en el funcionamiento de la estufa al realizarlos.

#### **5.4 Impactos del nuevo modelo de estufa Patsari en el proceso de implementación.**

La introducción de la estufa Patsari *Jimbani* ha representado importantes impactos en el proceso de difusión e implementación en el Proyecto Patsari. Estos impactos finalmente se materializan en un ahorro de cerca del 30% en los costos directos e indirectos que el proyecto invierte en la promoción, acompañamiento, seguimiento y monitoreo de las estufas instaladas.

- En cuanto a los costos de materiales de construcción la nueva estufa es 10% más económica, sin embargo en este rubro el mayor ahorro se logra en el transporte de materiales a las comunidades rurales. El manejo de estos materiales es más sencillo, ocasiona menos gastos de logística y menores costos de transporte.
- Con relación al proceso de construcción, con la estufa de barro se requieren de 2 personas calificadas para construir máximo 2 estufas en un día, ahora, con el nuevo modelo, 1 persona podría construir 2 estufas por ella misma en un día requiriendo únicamente un poco de ayuda no calificada. Esto representa una disminución importante en términos de salarios de técnicos y promotores.
- Se ha documentado la importancia de ofrecer a las usuarias capacitación y acompañamiento durante la primera etapa de adopción de la estufa. En el modelo de estufa de barro se requerían al menos 3 visitas a cada casa: la primera para realizar la construcción de la estufa, la segunda para colocar la chimenea y encender la estufa (ya que es necesario dejar pasar de 3 a 5 días para que la estufa seque) y capacitar a la usuaria en cuanto al uso de la misma, la tercer visita corresponde a la visita de seguimiento para capacitar a la usuaria con relación al mantenimiento y apoyarla en el proceso de adopción y cambio tecnológico.

Con el nuevo modelo, la estufa queda lista para utilizarse inmediatamente después de construirla, se puede encender y capacitar a la usuaria en ese momento y, en la mayoría de los casos, sólo se requiere 1 visita a cada casa ya que el funcionamiento es mejor, el mantenimiento es más sencillo y espaciado y representa menores problemas para la adopción. En cuanto al proyecto, cada visita representa costos de sueldos, viáticos y transporte.

- En términos de seguimiento y monitoreo se ha encontrado que las usuarias del nuevo modelo están más dispuestas a participar en el programa, se notan más satisfechas con la estufa y esto facilita que las visitas de monitoreo sean más efectivas.

## CONCLUSIONES

El patrón de consumo de energía y por tanto de combustible en comunidades rurales es complejo y hace uso múltiple de fuentes de energía. La leña sigue siendo la principal fuente de energía para la cocción de alimentos, la disminución en el uso de otros combustibles como el gas LP por la introducción de una estufa mejorada confirma que la elección de un combustible involucra razones complejas que incluyen aspectos económicos, socioculturales y ambientales.

Las estufas mejoradas o eficientes como la Patsari, además de los ahorros en energía, combustible o dinero, logran de manera importante otros beneficios asociados a su uso, tales como mejores condiciones de salud para las familias, se logra un ambiente más limpio y digno en el interior de las cocinas, ahorros en tiempo de cocinado y recolección de leña.

La estufa Patsari brinda beneficios claros con respecto a los fogones tradicionales, tanto en el consumo de combustible como en el ahorro de tiempo y disminución de riesgos a la salud y al ambiente, demostrando que una estufa eficiente bien diseñada, aun siendo de tipo masivo, de barro y arena (como la Lorena y la Plancha de Guatemala), son una buena alternativa para promover el uso sustentable de la leña.

La evaluación del desempeño de este tipo de dispositivos cumple con 2 objetivos: aportar elementos para el diseño y desarrollo de tecnología, y fortalecer el proceso de difusión aportando resultados claros sobre los beneficios e impactos por el uso de una tecnología eficiente. Por tanto, es importante evaluar el desempeño de la estufa desde varias perspectivas y no hacer conclusiones basadas únicamente en indicadores como la eficiencia energética o el consumo de combustible, es necesario incluir otros parámetros de funcionamiento ligados con las preferencias y necesidades del usuario y la interfase con él.

Analizar y evaluar como un “sistema” el proceso de cocción tradicional de alimentos en el medio rural fortalece el proceso de innovación tecnológica ya que al conocer más de la tecnología desde diferentes puntos de vista se facilita realizar adecuaciones o cambios al modelo original. Resulta importante determinar o conocer los límites o el campo de acción de cada dispositivo, de forma que la retroalimentación al proceso de innovación por parte del proceso de difusión reditué en el mejoramiento tecnológico.

El estudio del desempeño energético mostrado en este documento provee información valiosa para los objetivos mencionados, sin embargo es necesario considerar aún con mayor profundidad otros aspectos, como los de tipo económico, socio-cultural, de organización comunitaria, e incluso religioso

que complementen la evaluación. Sin duda alguna la nueva estufa diseñada como resultado de este estudio debe ser mejorada, se requiere de una nueva evaluación que nos permita aprender más sobre el proceso de adopción y adaptación de las tecnologías. Es necesario adecuar los costos y los dispositivos a diferentes sectores de la población que tienen otras necesidades relacionadas con el uso de leña, tal es el caso de lugares fríos donde la leña se utiliza para calefacción o pequeñas industrias y comercios que hacen un uso intensivo de este combustible.

La nueva estufa, sin duda logró mejores indicadores de éxito, el nuevo modelo mantuvo los beneficios del anterior. Este proceso fue debido a que en el proceso de evaluación se tuvo constante interacción con los promotores y las usuarias de la tecnología, de esta manera los cambios realizados tuvieron aceptación mayor entre la población. Así se demuestra que si el desarrollo tecnológico contempla este proceso de aprendizaje social, realiza una evaluación basada en la experiencia del usuario se logran mejoras tecnológica efectivas.

De esta manera podemos confirmar que el desarrollo tecnológico en el ámbito rural es un proceso dinámico, interactivo y de constante retroalimentación; constituye un proceso de aprendizaje compartido entre el desarrollador y los usuarios.

Por otro lado es importante considerar que la adopción y uso de las estufas depende de muchos otros factores mas allá de los indicadores de desempeño, es necesario considerar factores tales como el clima, las normas culturales y las tareas específicas de cocinado (preferencias en alimentos y modos de prepararlos).

En suma, el éxito de un programa de estufas eficientes debería estar definido en última instancia por la cantidad de estufas en uso real en comunidades, más que simplemente por el número de las estufas que se diseminan y se construyen. Asimismo el funcionamiento de la estufa se debe evaluar desde perspectivas múltiples, que tomen en cuenta el desempeño global y la aceptación de la estufa en las comunidades.

# ANEXO 1

## Stove Performance Testing Protocol

*El protocolo que a continuación se muestra es un resumen del protocolo que ha sido implementado como parte de un programa de investigación internacional promovido por Household Energy and Health Programme de Shell Foundation en el que colaboran las siguientes instituciones: University of California, Berkeley y Aprovecho Research Center (USA), HELPS Internacional Inc. (Guatemala), Appropriate Rural Technology Institute (India), Centro de investigaciones en Ecosistemas, UNAM y Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, A.C. (México).*

*Se describen las pruebas utilizadas internacionalmente para evaluar el funcionamiento de estufas eficientes de leña que son: Water Boiling Test (Prueba de ebullición de agua), Controlled Cooking Test (Prueba de cocinado controlado) y Kitchen Performance Test (Prueba de funcionamiento en cocina)*

### Introduction

The purpose of these protocols is to assess the performance of improved cooking stoves through a series of testing procedures, a **Water Boiling Test**, a **Controlled Cooking Test** and a **Kitchen Performance Test**. The tests described here have been adopted from the previous efforts of VITA, an organization that originally published International Standards for stove efficiency (VITA, 1985), and the closely associated work of Baldwin (Baldwin, 1986). However, these new protocols include several modifications to each category of testing procedure. In addition, spreadsheet-based software has been developed to facilitate and standardize data processing.

Experts generally agree that fuel savings in the field should not be predicted from the results of Water Boiling Tests alone. Both the Controlled Cooking Test and Kitchen Performance Test included in this booklet are probably better predictors of actual field performance of improved cooking stoves. The Water Boiling Test is intended to create a multi-faceted picture of stove performance that can be used during the design process. Data obtained from one or two days of testing, assists designers to evolve better performing stoves which are then to be tested by cooks in the intended environment. Visser (2003) has shown that by determining thermal efficiency at high and low power, which is accomplished in this version of the WBT, fuel use can be accurately predicted for various cooking tasks.

### The Water Boiling Test (WBT)

The WBT consists of three phases. 1.) In the first phase, the tester begins with the stove at room temperature and uses a pre-weighed bundle of wood to boil a measured quantity of water in a standard pot. The tester then replaces the boiled water with a fresh pot of cold water to perform the second phase of the test. 2.) In this phase, water is boiled beginning with a hot stove in order to identify differences in performance between a stove when it is cold and when it is hot. 3.) Lastly, the tester again boils a measured amount of water and then, using a pre-weighed bundle of wood, simmers the water at just below boiling for a measured period of time.

This process simulates the long cooking of legumes and pulses that is common throughout much of the world. This test is intended to measure the stove's performance at both high and low power output, which are important indicators of the stove's ability to conserve fuel. Rather than report a single number indicating the thermal efficiency of the stove, which alone can not accurately predict stove performance, this test is designed to yield several numerical indicators including: **time to boil, burning rate, specific fuel consumption, firepower, turn-down ratio.**

## Variables that are constant throughout each phase of the test

HHV	Gross calorific value (dry wood) (MJ/kg)
LHV	Net calorific value (dry wood) (MJ/kg)
m	Wood moisture content (% - wet basis)
$C_{eff}$	Effective calorific value (accounting for moisture content of wood)
P	Dry weight of empty Pot (grams)
k	Weight of empty container for char (grams)
$T_b$	Local boiling point of water ( $^{\circ}\text{C}$ )

### 1.- High power test (cold start)

#### Variables that are directly measured

$f_{ci}$	Weight of fuel before test (grams)
$P_{ci}$	Weight of Pot with water before test (grams)
$T_{ci}$	Water temperature before test ( $^{\circ}\text{C}$ )
$t_{ci}$	Time at start of test (min)
$f_{cf}$	Weight of wood after test (grams)
$c_c$	Weight of charcoal and container after test (grams)
$P_{cf}$	Weight of Pot with water after test (grams)
$T_{cf}$	Water temperature after test ( $^{\circ}\text{C}$ )
$t_{cf}$	Time at end of test (min)

#### Variables that are calculated

$f_{cm}$	Wood consumed, moist (grams)
$\Delta c_c$	Change in char during test phase (grams)
$f_{cd}$	Equivalent dry wood consumed (grams)
$w_{cv}$	Water vaporized (grams)
$w_{cr}$	Water remaining at end of test (grams)
$\Delta t_c$	Duration of phase (min)
$h_c$	Thermal efficiency
$r_{cb}$	Burning rate (grams/min)
$SC_c$	Specific fuel consumption (grams wood/grams water)
$SC_h^T$	Temp-corrected specific consumption (grams wood/grams water)
$FP_c$	Firepower (W)

### 2.- High power test (hot start)

In this test, measurements and calculations are identical to the cold start test. Simply substitute the subscript 'h' for the subscript 'c' in each variable as in the table below.

**Variables that are directly measured**

$f_{hi}$	Weight of fuel before test (grams)
$P_{hi}$	Weight of Pot with water before test (grams)
$T_{hi}$	Water temperature before test (°C)
$t_{hi}$	Time at start of test (min)
$f_{hf}$	Weight of wood after test (grams)
$c_h$	Weight of charcoal and container after test (grams)
$P_h$	Weight of Pot with water after test (grams)
$f$	
$T_{hf}$	Water temperature after test (°C)
$t_{hf}$	Time at end of test (min)

**Variables that are calculated**

$f_{nm}$	Wood consumed, moist (grams)	$f_{nm} = f_{hf} - f_{hi}$
$\Delta c_h$	Net change in char during test phase (grams)	$\Delta c_h = c_h - k$
$f_{hd}$	Equivalent dry wood consumed (grams)	$f_{hd} = f_{nm} * (1 - (1.12 * m)) - 1.5 * \Delta c_h$
$w_{hv}$	Water vaporized (grams)	$w_{hv} = P_{hi} - P_{hf}$
$w_{hr}$	Water remaining at end of test (grams)	$w_{hr} = P_{hf} - P$
$\Delta t_h$	Duration of phase (min)	$\Delta t_h = t_{hf} - t_{hi}$
$h_h$	Thermal efficiency	$h_h = \frac{4.186 * (P_{hi} - P) * (T_{hf} - T_{hi}) + 2260 * (w_{hv})}{f_{hd} * LHV}$
$r_{hb}$	Burning rate (grams/min)	$r_{hb} = \frac{f_{hd}}{t_{hi} - t_{hf}}$
$SC_h$	Specific fuel consumption (grams wood/grams water)	$SC_h = \frac{f_{hd}}{P_{hf} - P}$
$SC_h^T$	Temp-corrected specific consumption (grams wood/grams water)	$SC_h^T = \frac{f_{hd}}{P_{hf} - P} * \frac{75}{T_{hf} - T_{hi}}$
$FP_h$	Firepower (W)	$FP_h = \frac{f_{hd} * LHV}{60 * (t_{hi} - t_{hf})}$

**3.- Low power (simmering) test**

### Variables that are directly measured

$f_{si}$	Weight of unused fuel when the water first boils (grams)
$P_{si}$	Weight of Pot with water when the water first boils (grams)
$T_{si}$	Water temperature at boiling ( $T_{si} = T_b$ ) (°C)
$t_{si}$	Time at start of simmer phase test (min)
$f_{sf}$	Weight of unburned wood remaining after test (grams)
$c_s$	Weight of charcoal and container after test (grams)
$P_{sf}$	Weight of Pot with water after test (grams)
$T_{sf}$	Water temperature at end of test (°C)
$t_{sf}$	Time at end of test (min)

### Variables that are calculated

$f_{sm}$	Wood consumed, moist (grams)	$f_{sm} = f_{sf} - f_{si}$
$\Delta c_s$	Net change in char during test phase (grams)	$\Delta c_s = c_s - k - \Delta c_h$
$f_{sd}$	Equivalent dry wood consumed (grams)	$f_{sd} = f_{sm} * (1 - (1.12 * m)) - 1.5 * \Delta c_s$
$w_{sv}$	Water vaporized (grams)	$w_{sv} = P_{si} - P_{sf}$
$w_{sr}$	Water remaining at end of test (grams)	$w_{sr} = P_{sf} - P$
$\Delta t_s$	Duration of phase (min)	$\Delta t_s = t_{sf} - t_{si}$
$h_s$	Thermal efficiency	$h_s = \frac{4.186 * (P_{si} - P) * (T_{sf} - T_{si}) + 2260 * (w_{sv})}{f_{sd} * LHV}$
$r_{sb}$	Burning rate (grams/min)	$r_{sb} = \frac{f_{sd}}{t_{si} - t_{sf}}$
$SC_s$	Specific fuel consumption (grams wood/grams water)	$SC_s = \frac{f_{sd}}{P_{sf} - P}$
$FP_s$	Firepower (W)	$FP_s = \frac{f_{sd} * LHV}{60 * (t_{si} - t_{sf})}$
TDR	Turn-down ratio	$TDR = \frac{FP_h}{FP_s}$

### Controlled Cooking Test (CCT)

The controlled cooking test (CCT) is designed to assess the performance of the improved stove relative to the common or traditional stoves that the improved model is meant to replace. Stoves are compared as

they perform a standard cooking task that is closer to the actual cooking that local people do every day. However, the tests are designed in a way that minimizes the influence of other factors and allows for the test conditions to be reproduced.

The CCT described here is meant primarily to compare the performance of an improved stove to a traditional stove in a standardized cooking task. The procedure that follows should be applied to type of stove commonly in use in the community as well as the model or models of stove being promoted. Three repetitions of the CCT for each stove that is being compared are recommended.

### Variables

As in the WBT, there are a number of variables that are directly measured. These include environmental variables and physical test parameters. The environmental variables may vary slightly from one test to another, but should be nearly constant. The physical test parameters should be constant for all tests.

#### Environmental variables:

Wind conditions  
Air temperature

#### Physical test parameters:

<u>Variable</u>	<u>Label</u>
Avg dimensions of wood (centimeters)	--
Wood moisture content (% - wet basis)	m
Empty weight of Pot # 1 (grams)	P1
Empty weight of Pot # 2 (grams)	P2
Empty weight of Pot # 3 (grams)	P3
Empty weight of Pot # 4 (grams)	P4
Weight of container for char (grams)	k
Local boiling point of water (°C)	T <sub>b</sub>

### Measurements and Calculations

Upon finishing the test, a number of measurements are taken. These include:

Initial weight of fuelwood (wet basis) (grams)	f <sub>i</sub>
Final weight of fuelwood (wet basis) (grams)	f <sub>f</sub>
Weight of charcoal with container (grams)	C <sub>c</sub>
The weight of each pot with cooked food (grams)	P <sub>jf</sub>
Start and finish times of cooking (minutes)	t <sub>i</sub> and t <sub>f</sub>

These measurements are then used to calculate the following indicators of stove performance:

**Total weight of food cooked (W<sub>f</sub>)** – this is the final weight of all food cooked; it is simply calculated by subtracting the weight of the empty pots from the pots and food after the cooking task is complete:

$$W_f = \sum_{j=1}^4 (P_{jf} - P_j) \text{ where } j \text{ is an index for each pot (up to four).}$$

**Weight of char remaining ( $\Delta c_c$ )** – the mass of charcoal from within the stove, including the char removed from the ends of the unburned fuel that is extinguished just at the end of the cooking task. This is found by simple subtraction:

$$\Delta c_c = c_c - k$$

**Equivalent dry wood consumed ( $f_d$ )** – This is defined as for the WBT, adjusting for the amount of wood that was burned in order to account for two factors: (1) the wood that must be burned in order to vaporize moisture in the wood and (2) the amount of char remaining unburned after the cooking task is complete. The calculation is done in the following way:

$$f_d = (f_f - f_i) * (1 - (1.12 * m)) - 1.5 * \Delta c_c$$

**Specific fuel consumption (SC)** – This is the principal indicator of stove performance for the CCT. It tells the tester the quantity of fuel required to cook a given amount of food for the “standard cooking task”. It is calculated as a simple ratio of fuel to food:

$$SC = \frac{f_d}{W_f} * 1000$$

**Total cooking time ( $\Delta t$ )** – This is also an important indicator of stove performance in the CCT. Depending on local conditions and individual preferences, stove users may value this indicator more or less than the fuel consumption indicator. This is calculated as a simple clock difference:

$$\Delta t = t_f - t_i$$

## **Kitchen Performance Test (KPT)**

The Kitchen Performance Test (KPT) shows how the stove performs in the villages, towns and cities. There are two main goals: (1) to compare the performance of improved stove(s) to the common or traditional stoves as they are used in real kitchens and (2) to find out how people feel about the stove.

### **The Qualitative Survey**

Surveys about how people feel about the stove should happen in two stages. Both stages of the survey are adopted from the work of Baldwin and VITA (1987, 1985), with slight changes. The goal of the first stage of the survey is to identify basic social and economic and cooking information of community families. This survey provides important information and it should occur before, or at the same time that the stoves are sold or distributed. The survey may include households that do not plan to use the stove.

The second part of the survey should be conducted 3-6 months after the stove has been in use. This stage is meant to identify both strengths and weaknesses in the stove's performance. The second part of the survey should be limited to households that have been using the stove.

### **Selecting Households to Participate in the Survey**

The KPT is designed to be conducted in one or more communities where stoves have been introduced. One important part of doing surveys is choosing families to participate. For projects in small towns or villages, it may be possible to survey all of the families in the community. However, if stoves are to be provided to a larger number of people, or if the target communities are spread over a large area, then only a portion of the total number of families will be contacted. It is important to choose families carefully. Ideally, families should be selected at random.

### **The Fuel Use Survey**

The fuel use part of the KPT can:

1. Find the difference in fuel use between households using traditional stoves and households using the new stove.
2. Find out the medium or long term fuel use to determine if changes are sustained in the long term.
3. To test for seasonal changes in fuel consumption.
4. To test for differences in fuel use among households using the same stove but burning different types of fuel.
5. To test for changes in fuel use resulting from changes in the energy market, public education campaigns, etc.

In order to compare stoves, the testing can be done in two ways. 1.) By doing daily fuel use measurements of the traditional stove for a week and then doing daily measurements as the families use the improved stove for a week. This is a *longitudinal* or *panel* study. 2.) Alternatively, testing can be done by comparing fuel use in two groups of families for a week, with one group using the traditional stove and the other group using the improved stove. This is a *case-control* study, where the *control* group is a group of families that still use the old type of stove.

The longitudinal study, where the same households are measured first using the old stove and then the new stove is the preferred testing method. It follows each family as they make the transition from a traditional to an improved stove, and because it can happen for a longer time, testing can be done in different seasons and track changes in stove performance as the stove ages.

Make sure that both families and the village chosen for the study are not richer or poorer or different in some important way than the larger community that will be using the improved stove. The best way to avoid bias is to choose families randomly from a list that includes all of the families included in the stove project.

Wood use should be based on studying 7-10 households for each type of stove within each economic, geographic or environmental cluster that is to be surveyed. This rule of thumb is true for both *longitudinal* studies, where every household is surveyed using two types of stove, as well as for *case-control* studies, where every household is surveyed using only one type of stove.

Determine if the KPT is to be performed as a *case-control* or *longitudinal* study. Also determine the number of households that are to be tested and select the households. If possible, select families at random based on the families who agreed to participate when responding to the initial survey. If random sampling is not possible, choose households as local circumstances allow.

Visit the household at roughly the same time each day. Confirm that the stove is operating properly. With each daily visit, record the number of people that eat in the household that day. Record the sex and age of each person (this information is used to calculate the number of *standard adult persons* served – see below). Record fuel use by weighing the remaining wood. If the family is providing their own fuel, record the weight and moisture content of newly collected fuel before it is added to the family's stock.

**"Standard adult" equivalence factors defined in terms of sex and age**

(from Guidelines for Woodfuel Surveys, for F.A.O. by Keith Openshaw).

Gender and age	Fraction of standard adult
Child: 0-14 years	0.5
Female: over 14 years	0.8
Male: 15-59 years	1.0
Male: over 59 years	0.8

## REFERENCES

- Baldwin, S. F. (1986). Biomass Stoves: Engineering Design, Development, and Dissemination. Princeton, NJ, Center for Energy and Environmental Studies: 287.
- Visser, P. (2003). Testing Protocol: Test procedure for simple water boiling tests and fuel consumption calculation. Enschede, The Netherlands, Biomass Technology Group c/o University of Twente: 15.
- VITA (1985). Testing the Efficiency of Wood-Burning Cookstoves: Provisional International Standards. Arlington, VA, Volunteers in Technical Assistance: 76.

# From cookstoves to cooking systems: the integrated program on sustainable household energy use in Mexico

Omar R. Masera

Center for Ecosystems Research (CIECO), National Autonomous University of Mexico (UNAM)  
AP 27-3 Xangari 58089, Morelia, Michoacán, Mexico  
E-mail: omasera@oikos.unam.mx

Rodolfo Díaz

Interdisciplinary Group on Appropriate Rural Technology (GIRA), A.P. 152 Patzcuaro 61609 Michoacán, Mexico

Víctor Berrueta

Departamento de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería UNAM (DEPFI-UNAM)  
AP 27-3 Xangari 58089, Morelia, Michoacán, Mexico

*Interest in household energy use and improved cookstoves is growing again, prompted this time by a breadth of concerns that range from local environmental, socio-cultural and, very particularly, health issues to global aspects related to the emissions of greenhouse gases. To face these challenges, improved cookstove programs are evolving from projects narrowly targeting stove construction or sales to more integrated "systemic" approaches. This paper discusses one such approach: a multi-institutional effort directed to improve the sustainability of household energy use in rural Mexico. The program is based in the highlands of central Mexico, and seeks to set up a model that can be scaled up and replicated in other regions. The program has five main components that are highly integrated: technology innovation and market development, a cookstove dissemination package, support to micro-enterprise development, monitoring and evaluation and outreach activities. One of the program's salient features is the development and dissemination of a new efficient wood-burning cookstove named "Patsari". Results of the first year and a half of project implementation and the main challenges and lessons learned by the program are presented and discussed.*

## 1. Introduction

Far from a relatively simple problem with fixed technical solutions, the "biofuel *problématique*" in developing countries has turned out to be a very complex issue with multiple implications. The patterns of household biofuel use are very heterogeneous, as are also the people, the environment and the cultures that depend on these fuels to solve their essential cooking needs.

After more than a decade of sharp decline, the interest in household energy has emerged again at the international level. A global "crusade" on improved and clean cookstoves is slowly peaking again, pushed now strongly by health concerns [IAP, 2000; Bruce et al., 2000]. The Household Energy Program of the Shell Foundation and the "Partnership for Clean Indoor Air" launched at the World Summit on Sustainable Development in Johannesburg in 2002 illustrate the renewed interest in these issues.

The experience gained from the successes and, particularly, from the failures in the field of improved wood-burning cookstoves has nurtured a new generation of cookstove programs. These new programs challenge the conventional wisdom of the seventies and early eighties.

First, rather than being solely designed to save fuelwood, improved cookstoves are beginning to address a comprehensive set of issues ranging from local health and environmental implications to global impacts associated with greenhouse gas (GHG) emissions.

Secondly, experience has shown that a successful cookstove program is more than just building or disseminating cookstoves. The whole "cooking system" needs to be considered through integrated approaches that work simultaneously with technology innovation, creative financing and market development, and the monitoring of actual health and environmental benefits. The programs also foster participatory approaches that seek the involvement of local women to correctly address users' priorities and preferences.

Also, the fuel ladder or "fuel-switching" approach [Barnes and Qian, 1992] has also turned out to be too simplistic to describe the detailed dynamics of household fuel use, particularly within rural and peri-urban households. A mass of evidence now supports an alternative view maintaining that, rather than completely switching to alternative fuels, many households actually follow a "multiple fuels" strategy, which allows them to get the

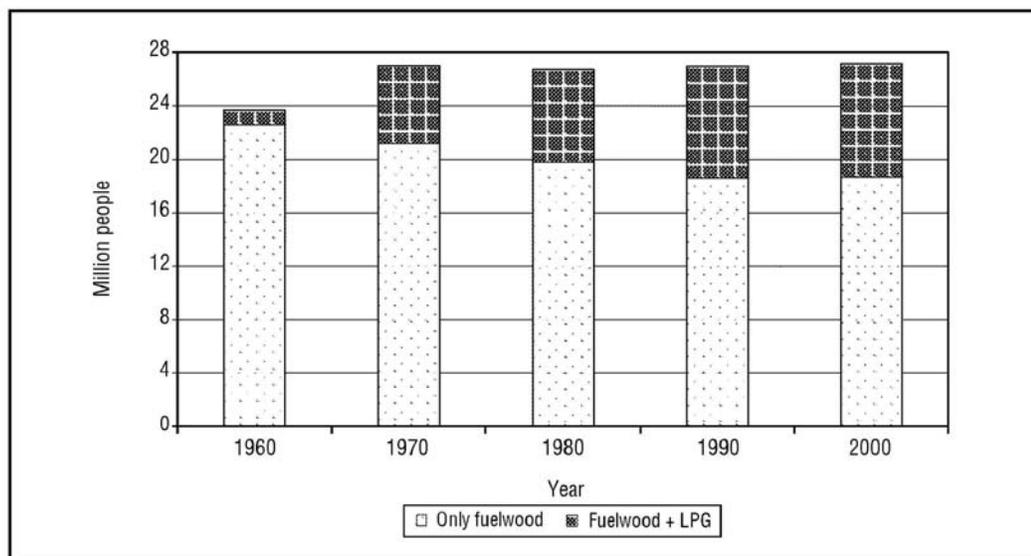


Figure 1. Evolution of fuelwood users in Mexico, 1960-2000

advantages of both traditional and modern fuels. This strategy also helps households to be more resilient to an uncertain and rapidly changing economic environment. Improved cookstoves therefore have also a relevant niche within those households that have already adopted modern fuels [Masera et al., 2000].

This paper discusses one such approach, the integrated program on household energy use in Mexico that is conducted in the state of Michoacan, in the highlands of central Mexico. We begin reviewing the general features of fuelwood use patterns in Mexico. We then provide a general overview of the first year and a half of program implementation.

## 2. Main features of fuelwood use patterns in Mexico

Currently, about one-fourth of Mexican households (27.2 million people) cook with fuelwood, either exclusively (18.7 million people) or in combination with LPG (8.5 million). Fuelwood use is concentrated within rural and peri-urban households. Fuelwood is still the main residential fuel in Mexico, accounting for approximately 50 % of total energy use and 80 % within rural households [Díaz and Masera, 2003; Díaz, 2000]. Figure 1 shows the evolution of fuelwood use in Mexico from 1960 to 2000, separately for exclusive fuelwood users and users of both fuelwood and LPG. Despite the rapid urbanization process that has taken place in Mexico in the last 30 years the use of fuelwood has remained virtually constant with an increasing share of mixed fuelwood-LPG users in total consumption.

The patterns of fuelwood use are very heterogeneous, as are their associated impacts. Approximately 240 municipalities – representing 10 % of all municipalities and more than 21 % of all fuelwood users – have been determined as high-priority in terms of the number of users, user growth rates, potential negative environmental im-

pacts and resilience of fuelwood consumption [Masera et al., 2003]. Priority municipalities are concentrated in the highlands of central and southern Mexico, often clustered in larger areas determined by cultural, environmental and social conditions. These clusters show an intensive pattern of fuelwood use, which dominates the energy use pattern both in households as well as in thousands of micro-enterprises devoted to pottery, bakeries, brick-making and making tortillas by hand (Figure 2).

The current dominant pattern of household fuelwood use presents several problems. People depend mostly on open fires, leading to very high indoor air pollution (IAP) levels, particularly for women and children. A sample of three studies carried out in rural households belonging to different regions of Mexico report average concentrations of respirable suspended particulates (RSP) ranging between 537 and 995  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (see Table 1). Per capita fuelwood use averages 2.0 kg/day, with large variations depending on the specific region. Fuelwood is either collected – often by women and children themselves – or increasingly purchased. Access to fuelwood is problematic in many places, either because of its cost or because of the time and effort required to collect it. Households spend up to 15-20 % of their income purchasing fuelwood. Tortilla-making, which accounts for about half of total fuelwood consumption, requires women to spend 2-4 hr/day inhaling the smoke from the fires (up to 8 hr/day for those women devoted to tortilla-making for selling) [Masera, 1995; Díaz and Masera, 2003].

During the past two decades, there has been an increasing penetration of LPG, particularly in the larger urban centers and the higher income levels. LPG has been penetrating these markets as a complementary rather than a substitute fuel with marginal reductions in fuelwood consumption and IAP; high investment costs, the cost of purchasing fuel

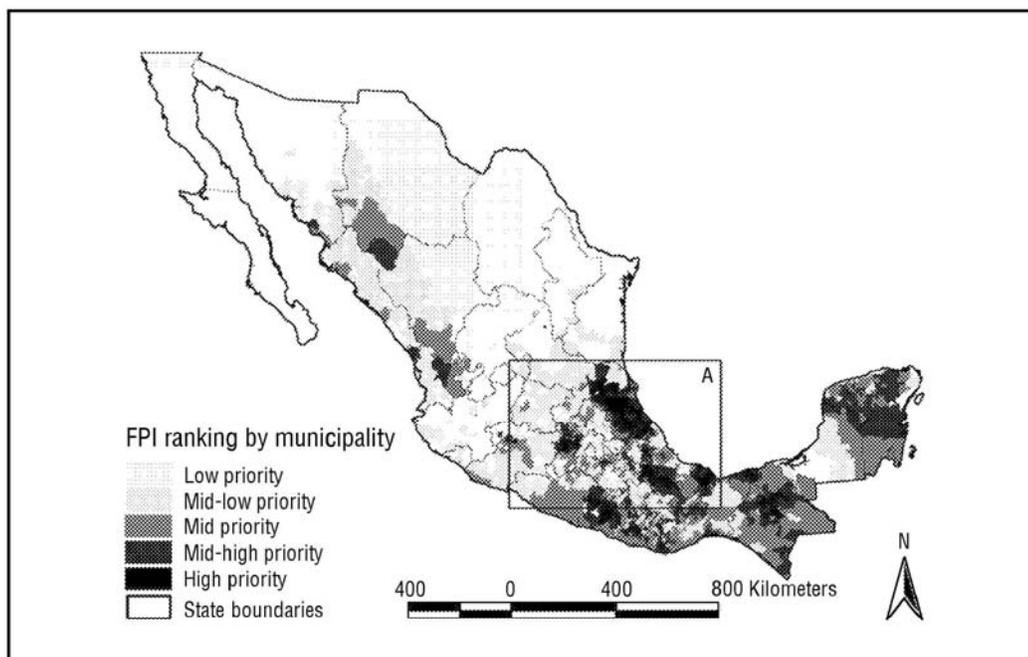


Figure 2a. Priority municipalities in terms of fuelwood use and availability of fuelwood resources, Mexico 2000. Central region detail shown in Figure 2b. Adapted from [Masera et al., 2003]. (FPI = fuelwood priority index)

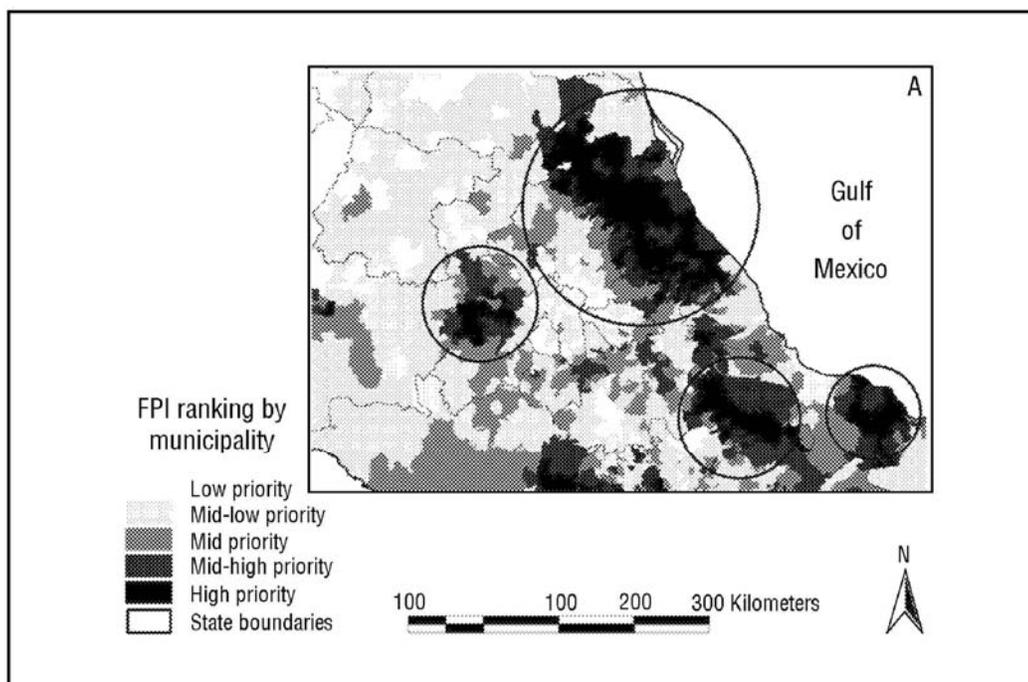


Figure 2b. Priority municipalities in terms of fuelwood use and availability of fuelwood resources, Mexico central region detail 2000. Circles show clusters of high-priority municipalities.

**Table 1. Average indoor air pollution levels in Mexican households that cook with open fires**

Study location	Authors	Pollutants and the associated concentrations
State of Mexico, central Mexico	Brauer et al., 1996	PM <sub>10</sub> : 768 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (49-1655)
Chiapas, southern Mexico	Riojas et al., 2001	PM <sub>10</sub> : 537 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (37-7400)
Michoacán, central México	Saatkamp et al., 1999	Three-stone fire RSP: 655 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ CO: 18 $\text{mg}/\text{m}^3$  Traditional U-type fire RSP: 995 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ CO: 15 $\text{mg}/\text{m}^3$

**Notes**

The concentrations shown are 24-hr averages in the place where children stay. Figures in parentheses are ranges.

(which comes mostly in 30-kg tanks) and an inadequate distribution network hinder a larger impact of LPG. The health and fuel-saving gains from switching to LPG do not materialize because households continue to use fuelwood for the most energy-intensive tasks, such as making tortillas and other traditional dishes. Also, higher incomes do not result immediately in health benefits as the kitchen has a low priority within the family [Masera et al., 2000; Saatkamp et al., 1999].

**2.1. Experience with cookstove programs in Mexico**

There is limited experience with improved wood-burning cookstove programs in Mexico [Olguín, 1994; Arias and Cervantes, 1994; Navia, 1992; Dutt et al., 1989]. The government launched a large-scale effort at the beginning of the '80s, with poor results, and basically abandoned the field [Vargas, 1990]. In recent years, a number of initiatives have been started in different regions of Mexico, particularly within the states of Michoacán, Chiapas and Oaxaca, working with a diversity of stove designs and dissemination schemes [RETA, 2004; Cayetano, 1997]. Most groups still work with massive Lorena-type improved stoves, but there are groups now disseminating "Justa" and portable "Rocket" stoves in southern Mexico. Most of the improved cookstove programs are local (village-level) or micro-regional in scope, they are generally part of larger initiatives directed at restoration of local forests or conservation of biodiversity, or they are part of the portfolio of well-established peasant organizations. Efforts are still concentrated on the construction of stoves with little or no follow-up; stoves are entirely or mostly subsidized; there is still emphasis on stoves being constructed by users themselves. Some institutions promoting these stove programs have become more aware of users' priorities and needs, resulting in higher stove acceptance rates. Last year, the Mexican government again started activities in this area, mostly through the National Forestry Commission (CONAFOR). Health concerns are now a major focus of the new initiatives.

**3. The Integrated Program on Sustainable Household Energy Use****3.1. Institutional background**

The Interdisciplinary Group on Appropriate Rural Technology (GIRA), a local non-governmental organization, and the Center for Ecosystems Research (CIECO) of the National University of Mexico have been coordinating since the mid-1990s a multi-institutional and long-term program to promote a cleaner and more sustainable pattern of energy use in rural and peri-urban Mexican households, based on the concept of *multiple fuel cooking* [Masera et al., 2000].

Together with the Energy and Resources Group of the University of California, Berkeley (ERG), the Food and Agriculture Organization of the United Nations, and several local institutions, GIRA and CIECO have conducted detailed studies on the patterns of household energy use, and their socio-cultural, economic, health and environmental implications [Masera et al., 1997; Saatkamp et al., 1998; Masera and Navia, 1997]. Primary data on IAP exposure levels and associated health problems derived from the use of traditional devices and the mitigation associated with cleaner devices has been collected. A process of technology adaptation-innovation has led to the development of the smoke-free "Patsari" cookstove that is well adapted to the conditions of local cooking (see below). Undertaking a user-centered approach, with strong emphasis on women's training on indoor air pollution (IAP) issues, an integrated *multiple-fuel* model is being promoted, which allows users to get the benefits derived both from modern fuels and from cleaner and efficient biomass devices. For a complete list of publications associated with the program refer to the site [www.gira.org.mx](http://www.gira.org.mx).

Beginning in 2003, with support from the Household Energy Program of the Shell Foundation and several Mexican institutions, including CONAFOR, the National Commission for Prevention of Health Risks (COFEPRIS), the Institute of Engineering at UNAM, and the National Institute of Ecology (INE), the program has gained major impetus and developed the possibility of having a large-scale impact on Mexican households. During the period 2003-2006 the program seeks to set up an innovative, field-tested, participative, and replicable cooking model centered on rural women to facilitate the transition of poor households and small enterprises from the central Mexican highlands to a cleaner and more sustainable pattern of energy use.

Specifically, the project is working simultaneously with end-users, small entrepreneurs, tortilla-making small enterprises, local NGOs and local authorities to: (1) facilitate the dissemination and adoption of clean and efficient biomass cookstoves, through self-replicating mechanisms; (2) strengthening local micro-enterprises; (3) reducing the health and environmental impacts of present fuelwood consumption and harvesting; and (4) educating local women on the associated health problems of indoor air pollution.

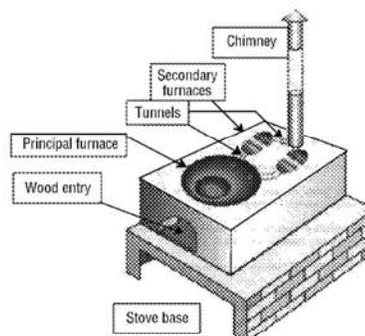
To achieve its objectives the program has five main components that are highly integrated: (1) technology innovation and market development; (2) cookstove dissemination; (3) development of local small enterprises; (4)

### Box 1. The Patsari cookstove

The project has developed a new concept of massive wood-burning cookstove called "Patsari", which in the local language means the stove that "takes care" of one's health, environment, economy, etc. [Diaz et al., 2003]. The Patsari departs from a modified Lorena cookstove that was previously disseminated in the region and has the following improvements: (1) optimized design of the combustion chamber and tunnels, (b) custom-designed parts for durability, including a metal chimney support and a ceramic stove entrance (see diagram below); and (3) reduction in construction time and standardized inner dimensions. The cookstove is made in approximately 2 hours with the aid of a metallic mould that ensures that critical dimensions are maintained. The stove also comes with metal "comales" – pans to place the pots – that are sealed to avoid leaking of the smoke. Currently two models are disseminated, with one and two wood entries, respectively. The former has one combustion chamber and uses a metal "comal" of 52 cm diameter. It is ideal for cooking tortillas and is preferred by mixed fuelwood-LPG users. The second Patsari model has two combustion chambers. The main one usually supports a ceramic *comal* (which is preferred by many users) for making tortillas. The smaller chamber has a metal *comal* of 35 cm diameter designed for cooking other dishes, such as beans, and other tasks, such as boiling water. Both Patsari models include tunnels that conduct the combustion gases to secondary chambers (or furnaces). Each chamber includes baffles to improve heat transfer between the *comal* and the gases. These secondary chambers are used for "low power" cooking tasks, such as keeping food warm or heating water.

The body of the Patsari is made of a mixture of sand and mud and a small amount of cement. All the materials are available locally; the custom-made stove parts are also manufactured by local small industries. External cookstove dimensions are 80 cm by 100 cm (100 cm by 100 cm for the two-entry model), stove height is 27 cm and the distance from the base of the combustion chamber to the *comal* is 20 cm.

The Patsaris have a retail price of US\$ 24 including US\$ 14 for the labor costs incurred by the stove-builder. The three metal *comales* cost an additional US\$ 14. In some villages there is a need to also build a base for the stove, which amounts to an extra US\$ 25.



monitoring and evaluation; and (5) program outreach. In the next section we present a critical assessment of the first 18 months of project implementation within each of the main project components.

### 3.2. Project implementation results

#### 3.2.1. Technology innovation

One of the main program goals is to set up a process of continuous technology innovation. To that end, a field cookstove laboratory has been set up. Here, new cookstove designs and materials are tested. Tests include emission profiles of major pollutants as well as detailed measurements of the cookstove's thermodynamic performance. The cookstove laboratory will be used as a reference – or standard – to test other cookstove models that are currently being disseminated in Mexico. Through a participative process of field trials and feedback, new models are tested in experimental as well as in actual conditions and are finally deployed in the field.

A new efficient massive multi-pot wood-burning cookstove, called "Patsari", has been developed (Box 1 and Figure 3). The Patsari is oriented to mass dissemination; it is built with the help of a mould, and includes several custom-made pieces. The size and geometry of the combustion chamber (primary furnace), the tunnels and the secondary furnaces are designed to increase heat transfer to the pot. Metal flat pans (or *comales*) are tightly

adjusted to the furnaces to prevent smoke leakage. The stove comes with a metal chimney, which is inserted into the stove body with the help of a custom-made metal base built in the stove. Currently, two models of Patsari, one with a single entry for fuelwood and a second with two entries, are being disseminated. In the latter case, both a ceramic *comal* and a metal *comal* are used in the primary furnaces. The cost of the cookstove is US\$ 38, including a set of high-quality metal *comales*.

Controlled cooking tests for tortilla-making were carried out in both Patsari models and in the two most commonly used open fires (three-stone fires or TSFs and U-type fires). Tortilla-making was chosen because it is the most intensive energy task within households [Masera and Navia, 1997]. The single-entry Patsari scored the best ( $0.63 \pm 0.03$  kg fuelwood/kg tortilla), followed by the double-entry Patsari – in this stove tortillas were made over a ceramic *comal* –, the TSF and the U-type fire (Table 2). Savings from Patsari stoves reach 67 % compared to the U-type fire and 59 % compared to the TSF, and were statistically significant at 95 % confidence level (Figure 4). In a pilot study conducted in 11 households (9 with open fires and 2 with Patsari stoves), reductions in indoor air pollution levels associated to Patsari cookstoves and measured in terms of 24-hr concentrations of PM<sub>2.5</sub> reached 92 % compared to open fires [GIRA, 2004].

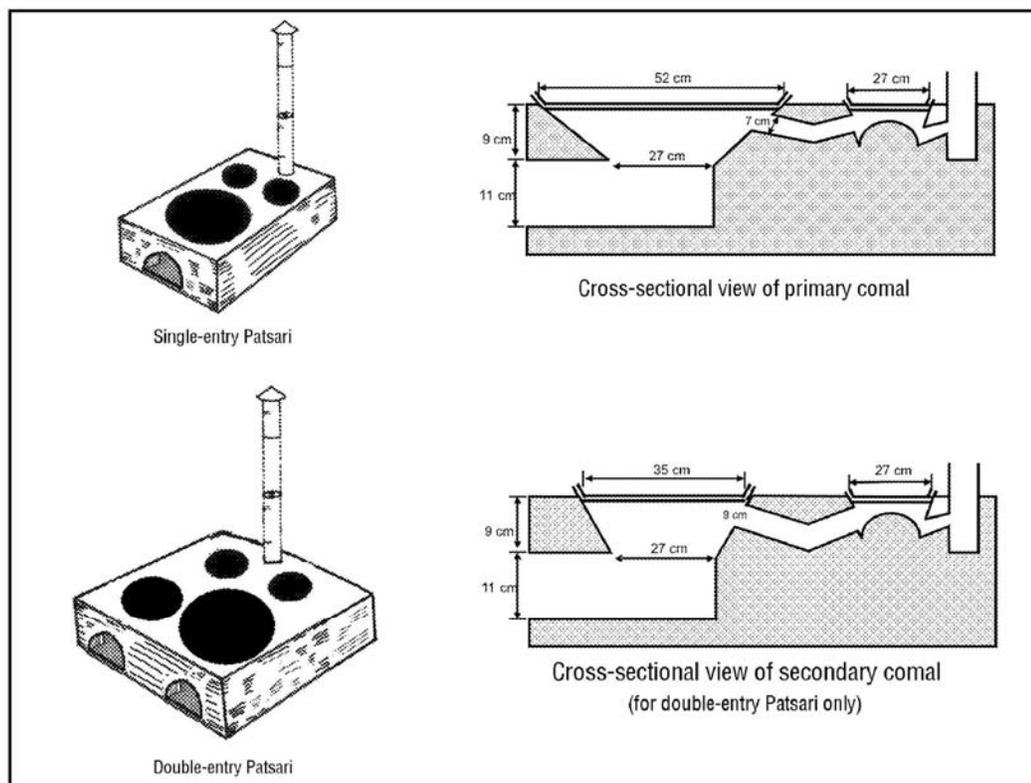


Figure 3. Top view and cross-sectional view of the two Patsari cookstove models

Table 2. Controlled cooking tests for Patsari cookstoves and open fires

Cookstove	n	Fuelwood for tortilla task (kg/kg)	Standard error	Left-over charcoal (g)	Specific fuel consumption (MJ/kg)
Patsari single-entry	6	0.63	0.03	117	12.59
Patsari double-entry	6	0.91	0.08	205	18.30
Three-stone fire (TSF)	6	1.49	0.17	205	29.77
U-type fire	6	1.85	0.17	362	36.98

Notes

We use 20 MJ/kg (oven-dry) and 28 MJ/kg as the heating value of wood and charcoal respectively. Wood heating content is adjusted by the humidity of the fuel according to the standard controlled cooking test protocols.

3.2.2. Cookstove dissemination

The dissemination of cookstoves is based on a user-centered approach that seeks to set up sustainable business operations at the regional level. The goal is having 1,500 households with Patsari cookstoves in 30 villages and a number of successful “stove business operations” established within a period of 3 years. The dissemination of cookstoves is assumed to continue on its own after this period. The main actors in the dissemination process are cookstove builders, end-users, and the manufacturers of stove parts. GIRA and CIECO act as facilitating agents and also conduct the overall monitoring and quality assurance of the dissemination process. Up to this point a

total of 600 stoves have been disseminated.

The first step is to establish cookstove builders. To do so, candidate stove-builders are selected following strict criteria (the ability to communicate with people, business initiative, etc.) and through a process that includes a hands-on training course on technical, financial and health and environmental issues related to stove use and maintenance. They are helped by GIRA to generate an initial market of approximately 50 stoves within each village and receive a mould free of charge (at a cost of US\$ 200) which they can keep after completing the installation and correct operation of the 50 stoves. To assure the quality of the stoves built, each stove is assigned a serial number

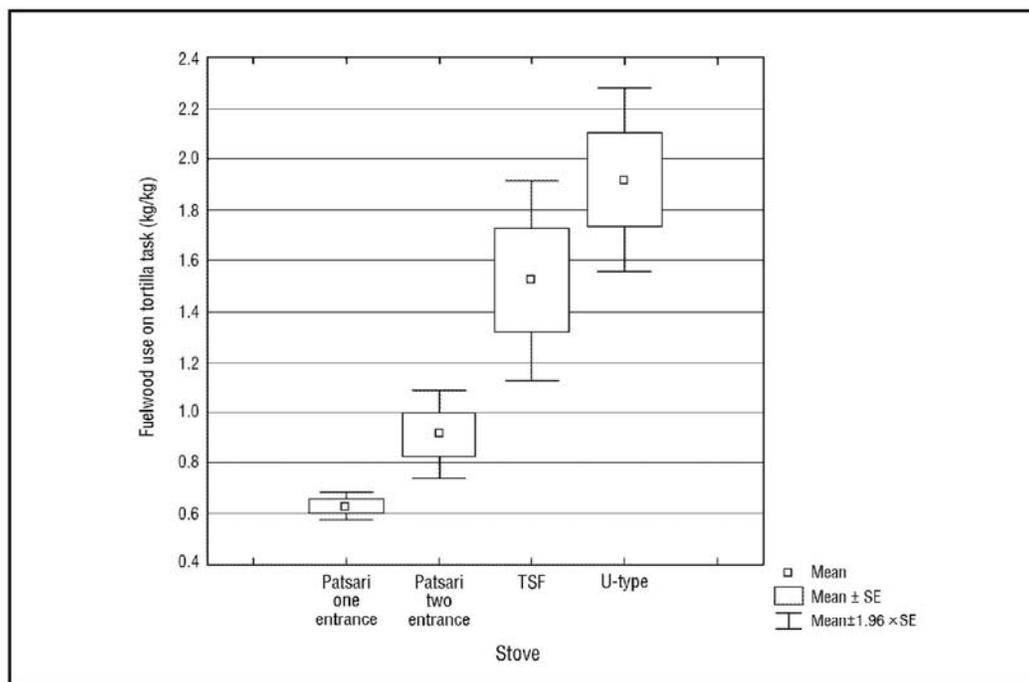


Figure 4. Fuelwood use by different cooking devices for making tortillas

and there is a “technical card” that the builder needs to fill up, with information about stove installation and two subsequent visits (to light the cookstove and after two weeks of operation). The cards are later incorporated into a cookstove digital database that serves for program monitoring and evaluation.

To help develop the market for improved cookstoves the project includes two facilitating mechanisms: (1) user awareness and training workshops (training package) and (2) a financial mechanism (financial package). The first mechanism helps in making local women more aware about the health and other problems derived from the use of open fires. They involve a general presentation of the project in a general assembly of the village and one or two intensive workshops for those women interested in buying a stove. Using participative techniques, users’ priorities about fuelwood are expressed, and the workshops also serve to talk about the main features of the Patsari stove. At the end of the workshops, a list of women interested in buying the Patsari stove is drawn up, and a stove committee is formed that also surveys the financing of the stoves.

A financial incentive is critical for a faster adoption of improved cookstoves. We have designed two types of incentives: (1) a 20 % discount on stove costs for the first 50 stoves built within each village; and (2) a “payment in installments” type of micro-finance, that is set up – where needed – to help users to overcome up-front costs (stoves are paid for in 3 installments). The whole operation is run entirely by local women and the local stove

builder. To that end, a specific training package on simple micro-financing has been prepared.

A comprehensive set of didactic materials has been prepared expressly for the project. The materials, many of them in Spanish as well as in *Purepecha*, the local language, include a promotional video, posters, a stove leaflet, and a series of graphic materials for the participatory training workshops. Radio spots have been produced that also promote the stoves in the local radio-station.

We conducted a first assessment of the stove dissemination process using the cookstove database and a field survey of a sample of households. Results from the database come from 240 out of 400 households that had Patsari stoves in November 2004. The field survey was applied to a representative sample of 42 households in four villages and was directed to understand women’s preferences on the Patsari cookstoves as well as to have users’ opinion about the functioning of the dissemination program [Valencia, 2004]<sup>[1]</sup>.

A large fraction of households adopting Patsari stoves cook with both fuelwood and LPG (71 % of total households in the sample) and 3 % already had a Lorena cookstove. This result confirms the importance of multiple-fuel users in the market for efficient cookstoves, a fact that was pointed out in previous studies [Masera et al., 2000]. Traditional cooking devices are mostly U-type (62 %) and three-stone fires (29 %). Stoves are placed within the kitchen (70 % of total households), but a significant fraction are installed outside (8 %) or within a small “hut” (22 %). In about half of the cases the kitchen is part of

**Table 3. Characteristics of households adopting Patsari stoves**

Fuel used for cooking	Number	%
Gas	1	1
Fuelwood	68	28
Fuelwood and gas	170	71
Total	239	100

Type of stove	Number	%
Lorena	6	3
Oil drum	15	6
Three-stone fire	70	29
U-type	147	62
Total	238	100

Cookstove location	Number	%
Outside	18	8
Tejabán <sup>[1]</sup>	53	22
Kitchen	168	70
Total	239	100

Kitchen location	Number	%
Separated from the house	108	45
Within the house	132	55
Total	240	100

**Note**

1. Roofed wooden structure

the house (55 %) and in the other half constitutes an independent building (45 %). In these latter cases, it tends to be a precarious wooden structure (Table 3).

Within the households surveyed, women's preferences for buying Patsari cookstoves are heavily related to improving health and kitchen conditions – i.e., the possibility of removing smoke out of the kitchen (28 out of 39 responses), having a clean kitchen (10 responses) and improving health conditions (6 responses). Saving wood was a priority for only 15 households and saving gas for 2 households (Figure 5a). For those women already owning Patsari stoves, the perceived benefits of the cookstoves include health, economic and social aspects. However, the main benefits are the possibility for families to eat together in the kitchen (with the open fires, women usually stay alone in the kitchen while the rest of the family eat in another place), the absence of smoke, and a diverse set of health issues such as avoiding children coughing and avoiding burns (Figure 5b).

Finally, it should be noted that the adoption of improved cookstoves, rather than simply implying changes in the use of fuels, prompts major changes within house-

holds. 70 % of the households adopting improved stoves made some type of change or planned on making changes to their kitchen in the near future [Valencia, 2004]. These changes included painting or cleaning the walls, changing the ceiling, buying new dishes and cookware, installing new floors, and even building a new kitchen. Cookstoves are thus seen as households "assets".

### 3.2.3. Development of local small enterprises

The adequate integration of the "cookstove system" has required the development of local suppliers of custom-made stove parts. We are working with metal workshops for the manufacturing of the mould, the chimney and the chimney base that is attached to the stove and the metal *comales*, and with a pottery workshop that manufactures the ceramic piece that is attached to the stove entrance. Through the interaction with these enterprises we have been able to get important feedback in terms of stove design and durability of alternative materials. Also, working together with these small enterprises has two main advantages: (1) it helps ensure the quality, reliability, and costs of the parts that will enter the cookstove production process, and (2) induces the creation of local employment and income generation alternatives at the regional level.

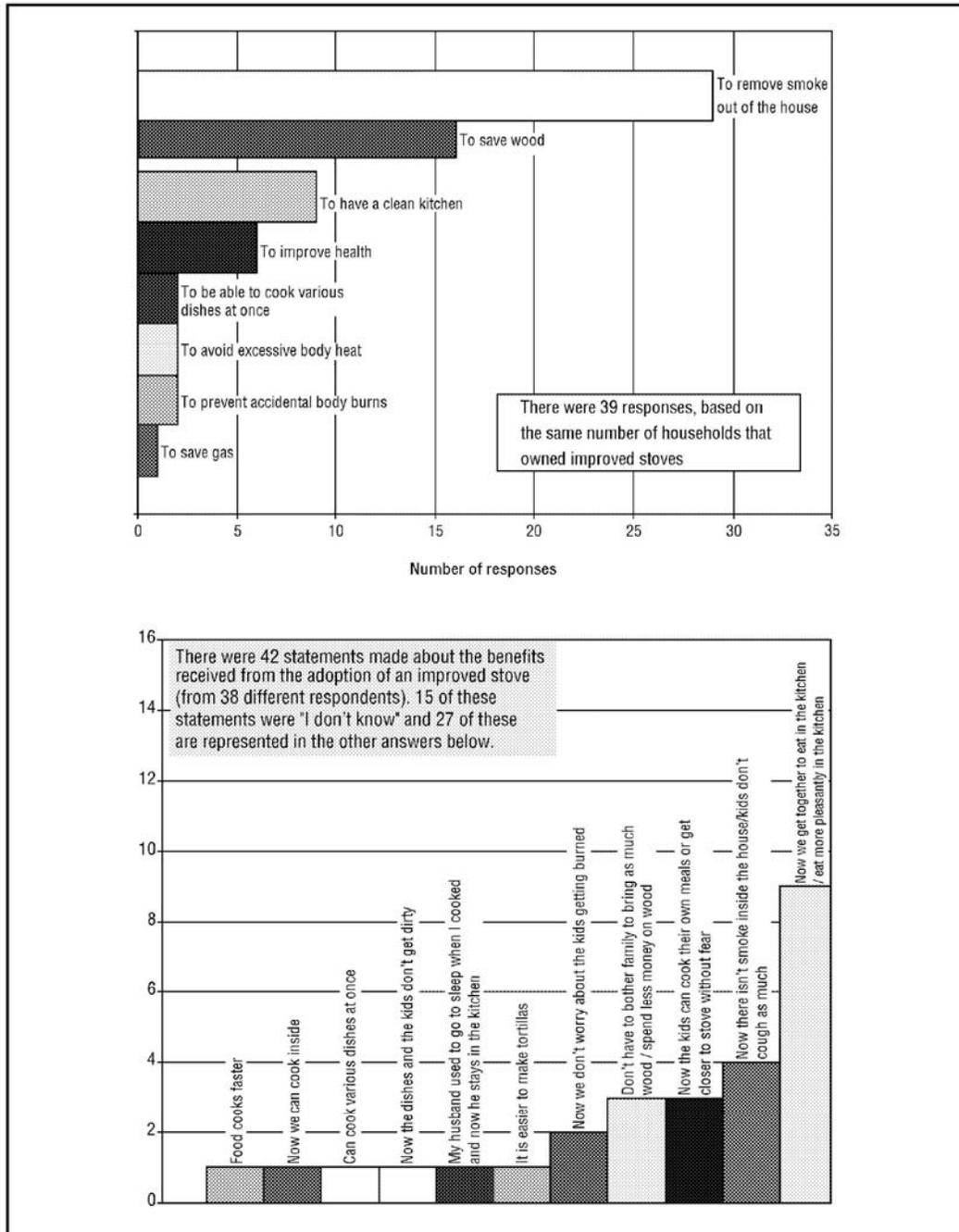
### 3.2.4. Monitoring and evaluation

A major effort is being made to comprehensively document and monitor the actual benefits achieved by the cookstoves. A "monitoring package" has been designed with the Mexican National Institute of Public Health, the University of California, Berkeley, the University of Liverpool, the Aprovecho Institute, and the Mexican National Institute of Ecology, with support from the Shell Foundation. The program includes the following.

1. Stove performance tests, both in laboratory conditions, such as the water-boiling test (WBT) and the controlled cooking tests (CCT), and in field conditions, such as the kitchen performance test (KPT).
2. Indoor air pollution monitoring, looking at the reduction in the concentration of particles (PM<sub>2.5</sub>) and carbon monoxide associated with the transition from open fires to "Patsari" and from open fires to "Patsari" plus LPG cooking conditions.
3. Health impacts. For this purpose we will conduct a major study (600 households) looking at reduction in respiratory illnesses – particularly ARI – and other sicknesses associated with the inhalation of smoke from wood-burning.
4. Users' attitudes and preferences. This will serve to better understand women's priorities and needs regarding improved cookstoves as well as the changes in time, activities, and socio-cultural issues associated with the adoption of new stoves.

A nested sampling design is being applied to have a maximum simultaneous coverage of critical variables for a set of households. The tests and field surveys began in November 2004.

The program is also assessing two additional aspects. The first is the analysis of the global impact of the dissemination of improved cookstoves, a subject that requires further research work [Bond et al., 2004]. Specifically, we



Figures 5a and 5b. Reasons stated by households to buy an improved cookstove (5a, above) and benefits received by households that adopted the Patsari cookstove (5b, below)

Source: Valencia, 2004.

**Notes**

The figures show key results from a survey on preferences and attitudes regarding traditional, Patsari and LPG stoves conducted with 42 households. The study is part of the monitoring program on cookstove dissemination.

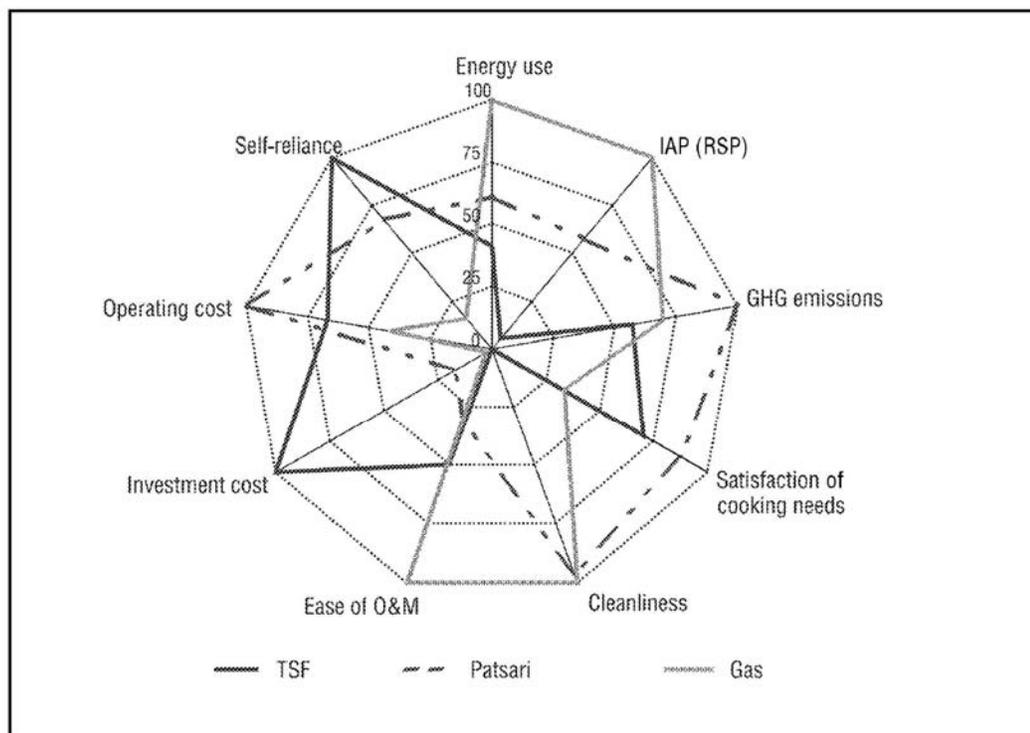


Figure 6. Comparative assessment of three cooking options in Mexico

Source: Adapted from [Galván, 2004]

#### Note

The figure compares three main cooking options – three-stone fires (TSF), Patsari cookstoves, and gas (LPG) cookstoves – in terms of nine key sustainability indicators. The values of each indicator have been normalized on a 0-100 % scale. The optimum is always 100 %, and can be achieved either by minimizing the specific indicator – such as energy use, IAP, GHG emissions, investment cost, and operating costs – or by maximizing it – such as in satisfaction of cooking needs, cleanliness, easiness of operation and maintenance, and self-reliance. The closer to the optimum the corresponding indicators are, the better an option scores. Trade-offs among the different options regarding social, economic and environmental indicators are readily seen; therefore the diagram helps better understand the implications of different choices regarding cooking devices. Refer to [Galván, 2004] for a complete description of the methods used to derive the indicators as well as their specific values in the original units.

will determine the emission factors and annual emissions of the main greenhouse gases – CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> and non-methane hydrocarbons (NMHC) – associated with the open fires as well as with the Patsari and LPG stoves in both laboratory and field conditions. The second aspect is a holistic assessment of the “sustainability” of different cooking options, integrating economic, environmental, and social indicators into a multi-criteria framework [Galván, 2004]. Using this innovative technique we can identify in a snapshot the main advantages as well as the trade-offs associated with different cooking options in terms of key social, economic, and environmental variables. The results of such an analysis comparing three cooking options – Patsari, LPG cookstove, and three-stone fires – are presented in Figure 6<sup>21</sup>. The radar, or AMIBA, diagram illustrates how the three cooking options score relative to nine indicators that have proved to be critical in terms of stove performance, users’ satisfaction, and overall impacts. The indicators are: energy use, indoor air pollution, greenhouse gas emissions, satisfaction of cooking needs, cleanliness, simplicity of O&M, investment

cost, operating cost, and self-reliance. As can readily be seen in the diagram, LPG stoves score the best in terms of fire control, cleanliness, energy use and indoor air pollution. However, they are expensive, are not adapted to key cooking practices, such as tortilla-making, and score low in terms of local or regional self-reliance. TSFs, on the other hand, score highest on costs and traditional cooking practices, but perform badly in terms of energy use, health concerns, and cleanliness. Patsari cookstoves appear as a good compromise, as they perform well for traditional practices while at the same time help to significantly reduce indoor air pollution and greenhouse gas emissions. The main drawbacks are the investment cost and the fact that they involve more skills in terms of operation and maintenance.

#### 3.2.5. Program outreach

Our program ultimately aims at improving the sustainability of household energy use in Mexico. The aim is setting up a center for stove research and dissemination that could catalyze activities in the field of cookstoves within Mexico, acting as a center for training, exchange of experiences,

stove-testing, design of interventions and approaches. To that end we have trained 130 technicians and community workers, coming from government, academic and non-governmental organizations. We are developing a model that can be scaled up and replicated in other regions of the country. Three organizations working in the western and eastern parts of Mexico have already decided to use our approach to carry out a large-scale dissemination of Patsari cookstoves.

As part of our outreach activities, we have also started a national network on wood-burning cookstoves in close collaboration with the Mexican Network on Bioenergy. The cookstove network will serve to set a series of technical, safety and health-related standards for improved cookstoves as well as to foster the exchange of experiences and approaches among the different groups. We are also actively working to influence the national policy context on residential fuels. An important barrier is the lack of awareness of indoor air pollution issues and their potential solutions at high political levels. We are currently preparing a series of key documents oriented to decision-makers and multimedia presentations together with the National Forestry Commission and the National Institute of Ecology to begin solving this problem.

#### 4. Lessons learned and current challenges

The experience gained so far has served to confirm that the dissemination of improved cookstoves is not just a "switching" of technologies, but a complex process that needs to be understood in terms of a breadth of technical, socio-cultural and economic issues. Below we discuss the main lessons learned and the associated challenges.

- *Properly designed and disseminated, improved wood-burning cookstoves result in substantial benefits to local households.* Patsari stoves help to achieve more than 50 % fuelwood savings for tortilla-making, which is the most common and intensive cooking task. Preliminary results show that reduction in IAP levels reaches 90 % in field conditions in comparison to open fires. Kitchen performance tests and a comprehensive IAP study are being conducted at the moment in local households to confirm the stated results.
- *Adoption of improved cookstoves implies a learning period that needs to be carefully monitored.* In the case of Patsari cookstoves, local women need to adapt themselves to cook standing instead of kneeling, to tend the fire in a different way, to use smaller pieces of wood, to clean the tunnels and chimney, and to cook with a metal *comal* instead of a ceramic one. All these changes imply an entrance barrier to cookstove adoption; many women take a month to adapt themselves to the new cookstove, a period when cookstove monitoring and user support is essential. We have also seen that cookstove adoption works faster with people who already have LPG stoves, partly because of economic reasons – i.e., these families have usually more cash to buy a new stove – but also because families with LPG stoves have already experienced new ways of cooking.

- *Financial incentives are essential for fast and wide-spread cookstove adoption.* The investment cost of the Patsari cookstove is still too high for most households. There are two reasons for this: (1) improving conditions in the kitchen is seen as a "women's" issue and has a low priority for men, who are those with the economic power within households, even despite an explicit recognition that smoke is a problem; and (2) in the specific case of Mexico, government programs have traditionally highly subsidized or even given away things for free in rural areas. This has also been the case with previous cookstove programs, particularly with regard to the labor costs associated with stove-builders. Thus, users are reluctant to pay the full costs of the new stoves.
- *Once adopted, improved cookstoves are seen as household "assets" and prompt new positive changes within households.* Confirming previous findings [Masera et al., 2000] we have seen that new kitchens are expressly built for the Patsari stove, kitchens are completely retrofitted, or they are integrated together with LPG stoves into a single kitchen where families gather together to eat [Valencia, 2004]. Therefore, when it occurs, adoption of Patsari is essentially a one-way process; households realize the benefits of a clean kitchen and are very reluctant to go back to the open fire; paradoxically, however, many households prefer to have the kitchen built or modified *first* and thus delay the investment in the Patsari!
- *Multiple fuel users constitute an important market niche for improved cookstoves.* As stated before, mixed-fuel users usually adopt new cookstoves faster than exclusive fuelwood users. Also, the combination of LPG cookstoves with Patsari cookstoves provides families with large and sustained gains in health conditions, versatility in terms of cooking tasks, resilience to fuel price fluctuations, and user satisfaction in terms of traditional cooking practices.

We are currently working on the identified issues and barriers to speed up the adoption process. For example, we are collaborating closely with the local clinics, to reinforce the training and awareness-raising campaign on indoor air pollution. We have also made the cookstove construction-dissemination process more efficient and robust. We are also including the cookstove base and *comales* in the financial package to reduce further the up-front costs of the Patsari and are working to reduce cookstove costs even further. Further improvements to the current Patsari stoves include increasing stove durability and ease of O&M. At the moment, efforts are concentrated on wood-burning cookstoves, as LPG is slowly entering the household energy pattern by itself. In the coming years, however, we will also explore alternatives to lower the investment cost of using LPG – which mostly comes from the stove and the tank – and facilitate the transition to multiple fuel use within local households.

#### 5. Conclusions

Cookstove dissemination programs are evolving from

“projects” narrowly targeting stove construction and fuelwood savings to more integrated “program” approaches looking at providing a set of health, environmental and socio-economic benefits. For them to be successful, systemic and interdisciplinary approaches are needed, including work on technology innovation, users’ needs and priorities, market development and innovative financing. Strong and sustained efforts need to be devoted to monitoring stove performance in the field and to ensure the sustainability of the achieved benefits.

Being more complex and ambitious, the new approaches come with a new set of challenges. More than ever, an intense cross-fertilization among groups, both North-South and South-South, is urgently needed. Donors and governments need to realize that *sustained* and long-term efforts rather than the typical two- to three-year projects are needed for setting up the type of integrated approaches described above.

There is a need to support continuous technology innovation, getting research institutions to work hand in hand with local organizations on new stove designs that are more robust, cost-effective and clean. Participatory research is also needed to better understand users’ priorities and needs and also to better assess the dynamics of multiple fuel use. Innovative and creative financial mechanisms are required that help users overcome the investment costs of improved cookstoves. Users – specifically women – need to have a strong say in program design and implementation. Finally, to be successful in the medium and long term, cookstove programs need to look at the overall policy context and integrate cookstove programs within larger sustainable rural development strategies. The challenge is substantial, but fostering the current partnership and networks on household energy use and learning from each other’s experience will surely pave the way to a larger number of success stories in the near future. ■

#### Notes

1. Because of space limitations, in this paper we present an overview of the main survey results. Refer to [Valencia, 2004] for a complete description of the survey methodology and for a detailed discussion of users’ preferences and attitudes related to both traditional and improved cookstoves.
2. Galván [2004] used the MESMIS framework – an integrated methodology for assessing the sustainability of alternative options – [Masera et al., 1999] and two multi-criteria methods to compare five cooking options: Patsari, Patsari plus LPG, LPG cookstove, LPG plus three-stone fire, and TSF. Indicators were derived for economic issues (such as net present value, investment costs), social issues (related to stove operation and adaptability to local cooking practices), and environmental issues (local and global impacts of fuel use). We refer readers to [Galván, 2004] for a comprehensive discussion of the methodological aspects and results of the evaluation process.

#### References

- Arias, T., and Cervantes, V., 1994. *Las estufas de barro ahorradoras de leña ¿Una tecnología apropiada para la región de la Montaña de Guerrero?*, Programa de Aprovechamiento Integral de Recursos (PAIR)-UNAM, México.
- Barnes, D.F., and Qian L., 1992. *Urban Interfuel Substitution, Energy Use, and Equity in Developing Countries: Some Preliminary Results*, Energy Series Paper No. 53. World Bank, Washington, DC.
- Bond, T., Venkataraman, C., and Masera, O.R., 2004. “Global atmospheric impacts of residential fuels”, *Energy for Sustainable Development*, Special Issue on clean cooking, VIII(3), pp. 20-32.
- Brauer, M., Bartlett, K., Regalado-Pineda, J., and Pérez-Padilla, R., 1996. “Assessment of particulate concentrations from domestic biomass combustion in rural Mexico”, *Environmental Sciences and Technology*, 30(1), pp. 104-109.
- Bruce, N., Pérez-Padilla, R., and Albalak, R., 2000. “Indoor air pollution in developing countries: a major environmental and public health challenge”, *Bulletin of the World Health Organization*, 78(9), pp. 1078-1092.
- Cayetano, H., 1997. *Curso taller de promoción y construcción de estufas rurales en la comunidad de Santa Cecilia Lalana*, Asesoría Técnica a Comunidades Oaxaqueñas (ASETECO), Oaxaca, Oax., México.
- Díaz, R., 2000. *Consumo de leña en el sector residencial de México. Evolución histórica y emisiones de CO<sub>2</sub>*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México D.F., México, pp. 113.
- Díaz, R., and Masera, O.R., 2003. “Uso de la leña en México: situación actual, retos y oportunidades”, *Balanza Nacional de Energía*, Secretaría de Energía, México D.F., México, pp. 99-109.
- Díaz, R., Gabriel, R., Molina, O., Marcos, S., and Masera, O., 2003. *La estufa PATSARI. Manual del constructor*, Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada A.C.-Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Pátzcuaro, Mich., México, September.
- Dutt, G.S., Navia, J., and Sheinbaum, C., 1989. “Cheranatzcurin: tecnología apropiada para cocinar con leña”, *Ciencias*, No. 15, pp. 43-47.
- Galván, Y., 2004. *Métodos multicriterio en la evaluación de sustentabilidad de sistemas de manejo de recursos naturales: el caso de las estufas eficientes de leña*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México.
- Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada (GIRA), 2004. *El uso de estufas mejoradas de leña en los hogares: evaluación de reducciones en la exposición personal*, Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, Pátzcuaro.
- Indoor Air Pollution (IAP), 2000. *Indoor Air Pollution Newsletter: Energy and Health for the Poor*, No. 1, September.
- Masera, O.R., 1995. *Socioeconomic and Environmental Implications of Fuelwood Use Dynamics and Fuel Switching in Rural Mexico*, Ph.D. thesis, Energy and Resources Group, University of California, Berkeley.
- Masera, O., and Navia, J., 1997. “Fuel switching or multiple cooking fuels? Understanding inter-fuel substitution patterns in rural Mexican households”, *Biomass and Bioenergy*, 12(5), pp. 347-361.
- Masera, O., Navia, J., Arias, T., and Riegelhaupt, E., 1997. Proyecto: FAO/MEX/TCPI/4553(A): Dendroenergía para el desarrollo rural. “Patrones de consumo de leña en tres micro-regiones de México: síntesis de resultados”, Pátzcuaro, Michoacán, México.
- Masera, O.R., Astler, M., and López, S., 1999. *Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: El Marco de evaluación MESMIS*, Mundiprensa-GIRA-UNAM, Mexico City, Mexico.
- Masera, O.R., Saatkamp, B.D., and Kammen, D.M., 2000. “From linear fuel switching to multiple cooking strategies: a critique and alternative to the energy ladder model for rural households”, *World Development*, 28(12), pp. 2083-2103.
- Masera, O.R., Drigo, R., and Trossero, M., 2003. *Woodfuels Integrated Supply/Demand Overview Mapping (WISDOM): A Methodological Approach for Assessing Woodfuel Sustainability and Support Wood Energy Planning*. FAO Report TC/D/RY4719E/116.03/1000, Wood Energy Program, Forest Products Division, FAO, Rome, 44 pp., March.
- Navia, J., 1992. *Estufas mejoradas, programa de difusión en Cheran Atzcurin*, Primera Reunión Internacional sobre energía y medio ambiente en el sector residencial mexicano, comp. J. Quintanilla.
- Olguin, E., 1994. “Evaluación y optimización del uso de la leña a nivel familiar y de pequeñas industrias rurales”, Instituto de Ecología, A.C. Jalapa, Veracruz, México.
- Red de Tecnologías Apropiadas (RETA), 2004. *Memorias del Taller de Intercambio de experiencias sobre estufas ahorradoras de leña*, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México, 11 pp.
- Rojas, R.H., Romano, P., Santosburgoa, C., and Smith, K.R., 2001. “Household firewood use and the health of children and women of Indian communities in Chiapas, México”, *Int J Occup Environ Health*, 7(1), pp. 44-53.
- Saatkamp, B.D., Masera, O., and Kammen, D.M., 1998. “Fuels, stoves, and indoor air pollution in Jaracuaro, Mexico”, *Boiling Point*, 40, pp. 16-18.
- Saatkamp, B.D., Masera, O., and Kammen, D.M., 1999. “Energy and health transitions in development: fuel use, stove technology, and morbidity in Jaracuaro, Mexico”, *Energy for Sustainable Development*, IV(2), pp. 7-16.
- Valencia, A., 2004. *Improved Cookstoves in Michoacán, México: a Search for an Integrated Perspective That Promotes Local Culture, Health, and Sustainability*, M.S. thesis, Energy and Resources Group, University of California, Berkeley.
- Vargas, F., 1990. *Breve diagnóstico sobre el proyecto de estufas rurales en México*, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), Mecanografiado, 8 pp.

## Impact of Patsari improved cookstoves on indoor air quality in Michoacán, Mexico

*Omar Masera*

*Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada and Centro de Investigaciones en Ecosistemas  
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701  
Colonia Ex-Hacienda de San José de la Huerta, 58190, Morelia, Michoacán, Mexico  
E-mail: omasera@oikos.unam.mx*

*Rufus Edwards*

*Department of Epidemiology, School of Medicine, University of California, Irvine, CA 92697-3957, USA*

*Cynthia Armendáriz Arnez and Victor Berrueta*

*Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada and Centro de Investigaciones en Ecosistemas  
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701  
Colonia Ex-Hacienda de San José de la Huerta, 58190, Morelia, Michoacán, Mexico*

*Michael Johnson*

*Department of Environmental Health, Science, and Policy, University of California, Irvine, CA 92697-7070, USA*

*Leonora Rojas Bracho*

*National Institute of Ecology/SEMARNAT, Periférico 5000, Colonia Insurgentes Cuicuilco, 04530  
Mexico City, Mexico*

*Horacio Riojas-Rodríguez*

*National Institute of Public Health, Avenida Universidad No. 655, Colonia Santa María Ahuacatlilán, 62508  
Cuernavaca, Morelos, Mexico*

*Kirk R. Smith*

*School of Public Health, University of California, Berkeley, CA 94720-7360, USA*

*Little quantitative monitoring and evaluation of the impacts of improved stoves have been performed in Mexico. Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada (GIRA) has recently disseminated 4,000 improved Patsari cookstoves, most of them in the Purépecha region of Michoacán state, Mexico. In paired comparisons in a subset of kitchens in a single community before and after installation of an improved Patsari cookstove, 48-hour average kitchen concentrations of carbon monoxide (CO) and fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) were reduced by 66 % (n = 32) and 67 % (n = 33), respectively. Kitchens that had more elevated concentrations during the baseline measurements demonstrated more dramatic reductions, as the overall variability was reduced when the improved stove was used. Thus, the Patsari stove provides an effective means of reducing kitchen air pollution and potential benefits of installing these stoves are considerable. Although requiring significant additional resources, the Household Energy and Health (HEH) Project catalyzed a much broader investigation into health, climate, environment and societal impacts of Patsari stoves, which has had a greater impact on public policy than the direct impact of the number of improved stoves installed in these communities.*

### 1. Introduction

There is strong evidence of the role of biomass smoke from unvented household stoves in developing countries in acute lower respiratory infections including pneumonia in children aged under 5 years and chronic obstructive pulmonary disease in adult women [Bruce et al., 2000; Smith et al., 2004]. The prevalence of these health impacts

reinforces the critical need for well-received interventions that effectively reduce exposures in rural populations. Although a number of improved cookstove technologies have the potential to significantly reduce emissions to the indoor environment, exposure reductions have often not been realized in practice due to barriers of cost, suitability for cooking tasks, and acceptance by local populations.

Although Mexico has experienced considerable economic growth and development, almost 80 % of the rural population, or about 27 million people, depend on wood for cooking, heating and other domestic tasks [Masera et al., 2005], resulting in significant exposure of the rural population to pollutants in wood smoke. Fuelwood still provides approximately 80 % of energy used by rural households and 50 % of total energy use in rural communities [Diaz, 2000], representing a considerable expenditure accounting for on average 15-20 % of household income in rural Mexican communities [Masera and Navia, 1997]. As with many other rural communities worldwide, women are most exposed to pollutants from wood smoke during cooking. In Mexican rural homes, making tortillas represents more than half of daily fuelwood consumption, and women spend between two and four hours per day on this task in close proximity to the stove, breathing smoke. Women who have home industries making tortillas to sell – up to 20 % of women in some communities – may spend as many as eight hours per day in these conditions [Masera, 1995].

Although installing a vented cookstove is often assumed to mitigate air pollution exposures associated with open fires, in practice the situation is often more complicated, especially during transitional phases of technology adoption, in which households frequently retain traditional stoves for specific cooking tasks, or use multiple fuels and stoves depending on prices, seasons and availability [Edwards et al., 2007b]. The need to monitor the actual improvements in indoor air quality in homes in rural communities as a result of installation of improved stoves is therefore critical in assessment of the benefits of the improved stove. Although improved stoves have been promoted in Mexico for 15 years primarily for saving wood and reducing deforestation [Masera et al., 2000], there has been little systematic evaluation of the improvements in air quality in rural homes as a result of improved stoves. The current study begins to address this shortfall as part of the Household Energy and Health (HEH) Project<sup>[1]</sup>.

#### 1.1. Traditional stoves in Michoacán

Cooking in this region of Mexico is typically performed on open fires surrounded by three stones (three-stone fires, TSFs) and open fires with U-shaped surrounds usually built by the users out of mud or clay. Although these devices take the form of a “U” or horseshoe, and “enclose” the fire to a certain extent in what might be considered a combustion chamber, they do not possess a flue or chimney to transport the smoke that is generated from the kitchen. Although the open fire is highly polluting and often fuel-inefficient, its versatility is much appreciated. It can be made easily, anywhere, anytime, by anyone, at nearly zero cost; uses fuel of nearly any size; and requires no long-term maintenance [Troncoso et al., 2007].

#### 1.2. The Patsari improved wood-burning stove<sup>[2]</sup>

The Patsari was developed by GIRA AC, a Mexican NGO working with local groups and communities in the development, adaptation, and dissemination of biomass energy, agroecology, and community (social) forest management technologies and micro-enterprises since 1987<sup>[3]</sup>. GIRA is the leading Mexican NGO focused on wood-burning

cookstove development and dissemination and has received several awards including a national forest conservation prize in 2001 and the Ashden Award on Health and Welfare in 2006<sup>[4]</sup>. At the policy level, GIRA has advised more than 50 other NGOs and government agencies on biomass energy and cookstove dissemination.

The Patsari stove was developed with a participatory approach to meet cooking needs, reduce wood consumption, vent smoke outdoors and to be acceptable and affordable to local populations. The Patsari departs from a modified Lorena cookstove that was previously disseminated in Mexico and has the following improvements: (1) optimized design of the combustion chamber and tunnels, (2) custom-designed parts for durability, including a metal chimney support and a ceramic stove entrance; and (3) reduction in construction time and standardized inner dimensions. The cookstove is made in approximately 2 hours with the aid of a metallic mould that ensures that critical dimensions are maintained. Two models were originally disseminated, with one or two entrances to feed fuelwood, respectively. The former has one combustion chamber and uses a metal *comal* of 52 cm diameter<sup>[5]</sup> for cooking tortillas and is preferred by households combining fuelwood use and liquified petroleum gas (LPG) use. The second Patsari model has two combustion chambers. The main one usually supports a ceramic *comal* (preferred by other users) for making tortillas. The smaller chamber has a metal *comal* of 35 cm diameter designed for cooking other dishes, such as beans, and other tasks, such as boiling water. Both Patsari models include tunnels that conduct the combustion gases to secondary chambers used for “low power” cooking tasks, such as keeping food warm or warming water. Each chamber includes baffles to improve heat transfer between the *comal* and the gases, but does not have a grate.

The body of these two original Patsari models is made of a mixture of sand and mud and a small amount of cement. Two new stove models have been recently developed, which are intended to cover, on the one hand, the needs of tortilla vendors (Patsari-tortillera) and, on the other, to provide more durability and less maintenance (Patsari-brick). All the materials for the four models are available locally; the custom-made stove parts are also manufactured by local small industries.

#### 1.3. Dissemination program in the Purépecha region

A total of 4,000 stoves have been disseminated by GIRA, mainly in the Purépecha region of Michoacán, central Mexico, but also in eight other Mexican states. Figure 1 shows a conceptual diagram of the integrated stove development and dissemination approach used for the Patsari (Figure 2, which has photographs of a traditional stove and a Patsari), relying on a user-centered approach that seeks sustainable market-based operation at the regional level. GIRA acts as a facilitating agent and also conducts the overall monitoring and quality assurance of the dissemination process.

Stove monitoring and evaluation has been a critical component of the stove dissemination process since inception of GIRA’s rural energy program fifteen years ago,

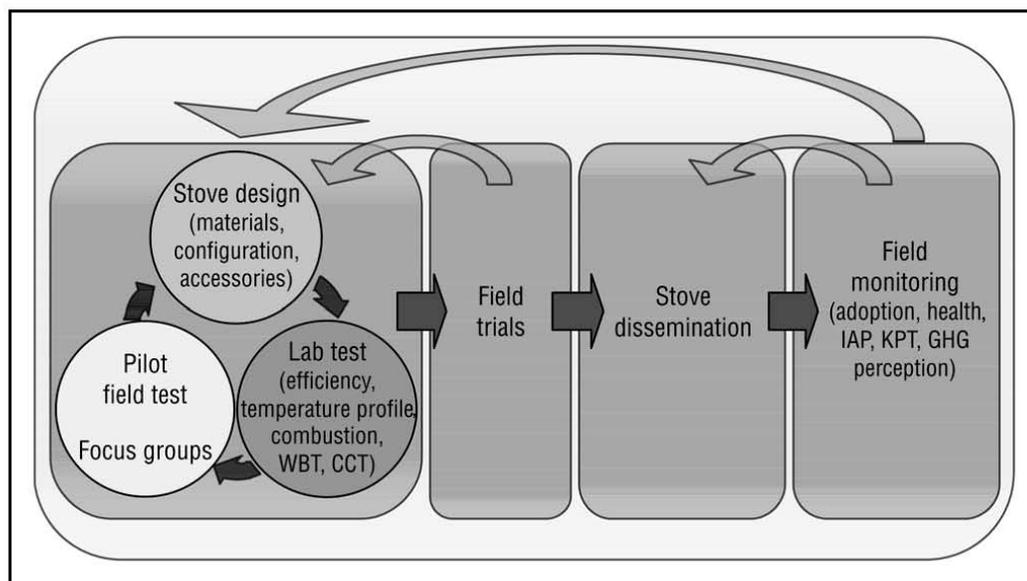


Figure 1. Conceptual diagram of integrated stove development and dissemination

WBT = water boiling test; CCT = controlled cooking test; KPT = kitchen performance test; IAP = indoor air pollution; GHG = greenhouse gas emissions

as this was recognized as an integral element within a dynamic process of stove innovation, development, and dissemination. More recently monitoring and evaluation was recognized by both funding and government agencies as critical in evaluating the benefits of stove projects in a scientifically acceptable manner and took an even more prominent role within the Patsari project. Schematically, laboratory tests, field trials and pilot tests of prototypes through participation of users' groups provided direct feedback to stove design. Subsequently field trials and field monitoring within communities provide direct feedback in a cyclic process to both the stove design and the stove dissemination process through communities. To monitor the adoption process in communities, GIRA records all Patsari stoves installed in an electronic database including relevant data on stove construction as well as aspects related to stove adoption such as actual stove and fuel usage patterns, and maintenance and repair actions.

In the Patsari project, five monitoring and evaluation areas were identified to document both the major impacts of the Patsari stove and to obtain information on the stove innovation-dissemination chain. Table 1 presents summary information on the areas monitored and sampling procedure [GIRA, 2006]. This represents a unique effort to have a broad understanding of rural dynamics and potential benefits of the technology dissemination and adoption process and included monitoring health impacts in a 600-household study [Riojas-Rodríguez et al., 2006], an indoor air pollution survey [Armendáriz Amez et al., 2007; Zuk et al., 2006], a stove performance study [Berrueta et al., 2007; Bailis et al., 2007, in this issue], a social perceptions study [Magallanes, 2006], and studies on fuelwood renewability [Ghilardi et al., 2007] and GHG emissions [Johnson et al., 2007].



Figure 2a. Traditional wood-burning cookstove



Figure 2b. Patsari wood-burning cookstove

Table 1. Areas of evaluation in the Patsari project

Study	Design	Sample groups	Evaluation endpoints
Health	Cross-sectional	300 control group homes 300 intervention homes with Patsari stoves	Spirometry, blood samples, and health symptoms
IAP	Before and after	60 households in one village 40 households in a second village	Personal exposures, kitchen concentrations and ambient
Social perception	Qualitative	23 focus groups 26 interviews with key informants	
Stove performance	Before and after	40 households for KPT 4 cookstoves using tortilla making in CCT 4 cookstoves compared for WBT	Both exclusive fuelwood and mixed fuelwood and LPG
GHG measurement	Cross-sectional	14 laboratory-based WBTs 22 field-based WBTs 14 Patsari households for KPT 8 open-fire households for KPT	Emissions of CO <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, black carbon, and non-methane hydrocarbons

**Notes**

WBT: water boiling test; CCT: controlled cooking test, where a fixed amount of food is cooked by the same cook; KPT: kitchen performance test, involving typical cooking under normal conditions

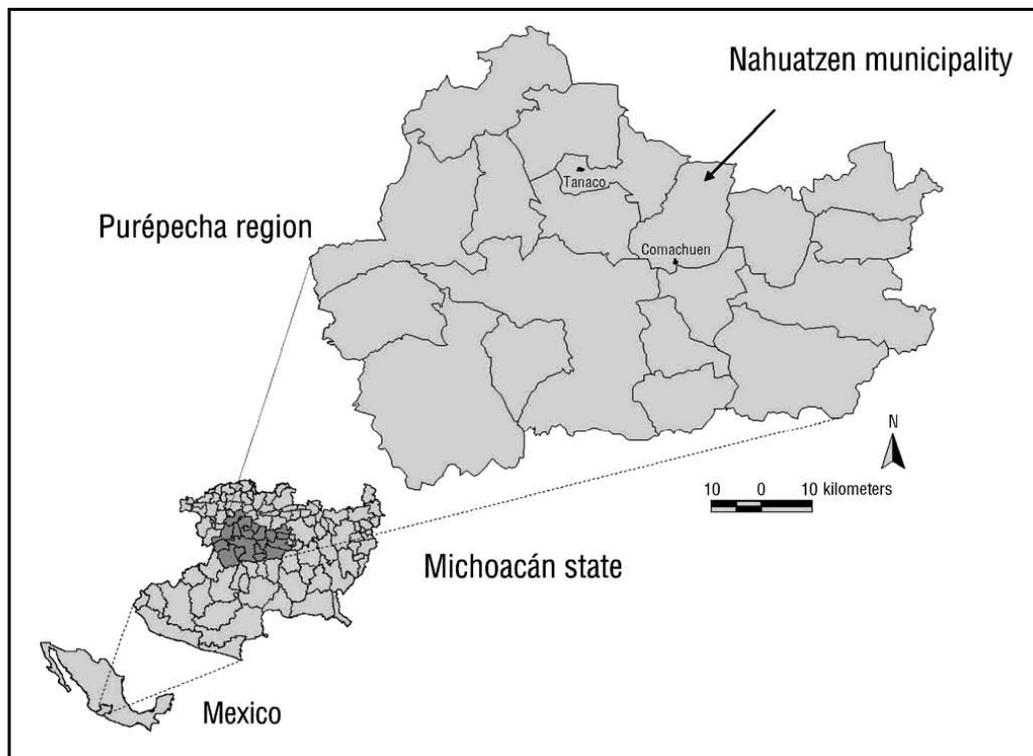


Figure 3. Map of the Purépecha region in Michoacán, Mexico

**2. Data and methods**

**2.1. Study site description**

In the Purépecha region (Figure 3) of the central Mexican highlands in Michoacán, 15 municipalities were selected

where reliance on biomass fuels for primary energy provision was over 80 % [Masera et al., 2005]. From these municipalities, 600 homes were randomly selected in 6 Purépecha communities for participation in a community

intervention trial of the effects of the improved Patsari stove on respiratory health effects and randomly divided into intervention and control groups. The study sample for investigation of the effects of the Patsari stove on indoor air quality (IAQ) was selected from the intervention group in the health study in one municipality, Comachuen, a remote indigenous agricultural community of 4,300 inhabitants located 2,600 m above sea level. Comachuen was selected as a large percentage of families rely on traditional cookstoves (TCSs) and wood for cooking (98 %) and there has been relatively little technology penetration in the community.

### 2.2. Study design

Investigation of the IAQ effects of the Patsari used a paired before-and-after study design in which baseline monitoring was performed for 48 hours with the traditional stove, and repeated later in the same season one month after installation of the Patsari and later [Edwards et al., 2007a, in this issue]. Sample size was estimated on the basis of a 10-home pilot assuming a coefficient of variation of 0.7 and a desire to detect at least a 40 % change in  $PM_{2.5}$  [6] and carbon monoxide (CO) concentrations after installation of the Patsari. Although a sample size of approximately 40 would have been sufficient to observe such differences, a sample size of 60 was selected to account for drop-outs, those that did not install or were delayed in installing the improved stove, were unable to be located, migrated for work, or modified or otherwise had trouble with the normal functioning of the stove.

### 2.3. Household selection

As with many rural areas where housing is not standardized, a wide range of different stove and kitchen configurations was encountered in the Purépecha region. Since measurements of all kitchen types and stove arrangements were not feasible, given the sample sizes required to adequately represent all arrangements, a household screening survey was used to restrict kitchens to the more common arrangements in the region with the following criteria: enclosed by four walls, not shared between families, cooking used wood in TCS, families contained 5-9 members, and participating women stated a desire to use the Patsari stove after intervention. Most kitchens in Comachuen have wooden walls and a laminated roof, and around half have electric lighting. Human subject approvals were obtained from the University of California, Irvine, and from participating institutes in Mexico.

### 2.4. Indoor air pollution monitoring

$PM_{2.5}$  and CO was assessed in the kitchen, both before and after the introduction of the Patsari stove, at 1-minute intervals over 48 hours at a standardized height of 1.25 m above ground, 1 m distant horizontally from the central combustion zone, and at least 1.5 m from windows and doors.

Particulate matter was monitored using the UCB particle monitor (University of California Berkeley, Berkeley, CA, USA), a light-scattering nephelometer developed for use in rural biomass-burning households [Edwards et al., 2006]. While the UCB does not select a traditional cutoff point, the photoelectric sensor is most sensitive to particles less than 2.5  $\mu\text{m}$  in aerodynamic diameter ( $PM_{2.5}$ )

[Litton et al., 2004], and has demonstrated good agreement with gravimetric  $PM_{2.5}$  samples in field validation studies in rural homes [Chowdhury et al., 2007]. UCB monitors were adjusted for inter-instrument sensitivity through controlled tests in a combustion chamber at the field office in Mexico [Chowdhury et al., 2007], and calibrated for mass response to aerosols using co-located  $PM_{2.5}$  gravimetric filter samples collected in kitchens [Armendáriz Arnez et al., 2007]. Average percentage difference in mass estimates between duplicate UCB samples was 14 %, with good agreement between different UCB monitors [Armendáriz Arnez et al., 2007].

Carbon monoxide was monitored using electrochemical CO sensors (HOBO<sup>®</sup> Onset Corporation Inc., Bourne, MA, USA). CO sensors were calibrated for inter-instrument sensitivity using gas calibration standards (0.5, 10, 25, and 60 ppm) before use in the study, and checked for response during 4 controlled combustion chamber co-locations during the course of the study (collocated with UCB particle monitors).

Both instruments contain dataloggers, which store the minute-by-minute data over the entire measurement period in their memories. These data are downloaded into a personal computer after monitoring.

### 2.5. Household post-monitoring questionnaires

Structured interviews with the cook in the household were conducted in Spanish at the end of the monitoring period to collect information on home and kitchen characteristics, stove use, fuel type, and other potential sources of  $PM_{2.5}$  and CO.

## 3. Results

### 3.1. Household characteristics

Most homes had 3 to 5 rooms and almost all had electricity and piped water for kitchens and bathrooms. Although kitchens with 4 walls were selected there was still considerable variability in construction in houses that participated in this indoor air quality study, although the kitchens were more similar. The vast majority of kitchens had roofs of corrugated compressed particle board (approximately 6.5 mm thick, laminated on the outside to seal against water) and wooden walls, and 68 % had earthen floors, 19 % concrete floors and 12 % wooden floors. 75 % of homes had no windows in the kitchen and 25 % had a single window, although most left the door open while in the kitchen. Approximately 76 % of kitchens originally had the U-shaped traditional stove, and the remaining 24 % had TSFs.

As in many rural areas worldwide, cooking is invariably done by women, and typically women who are not cooking food to sell, reported spending 4 hours per day cooking, reducing on average to 3.5 hours after installation of the Patsari. Although those who prepare tortillas to sell may spend 8 hours or more per day cooking, these homes were not included in the current study. As the women in these homes are exposed to high concentrations for long periods, however, a type of Patsari stove has been developed specifically to reduce these exposures. Time spent cooking does not appear to be correlated to family

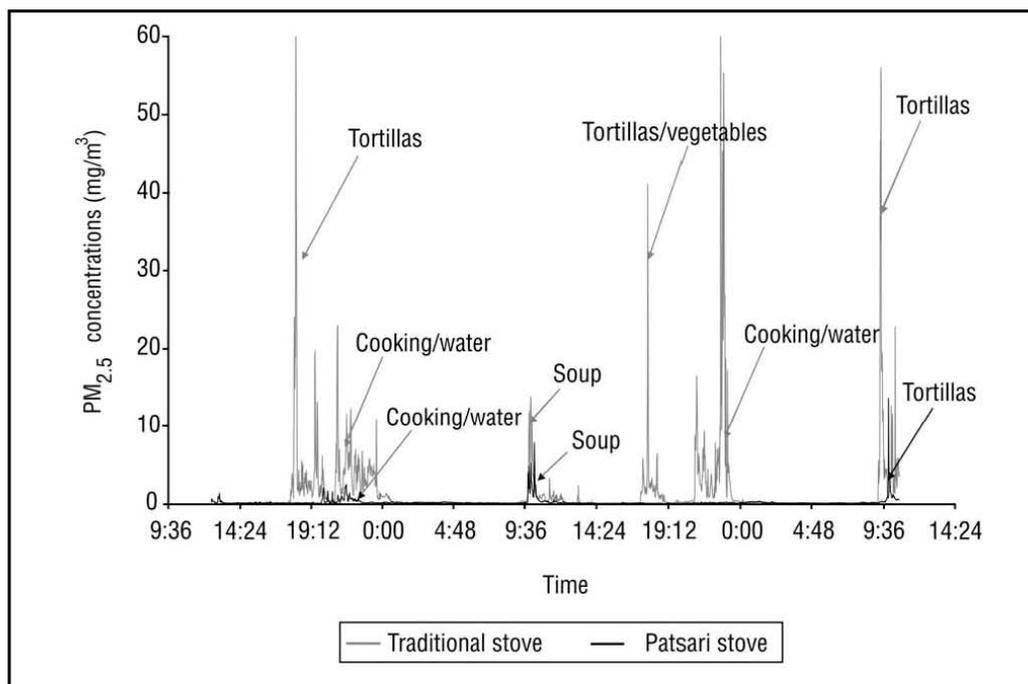


Figure 4a. Typical 48-hour 1-minute kitchen  $PM_{2.5}$  concentrations before and after installation of the improved stove

size within this sample, although recall activity diaries may not have sufficient resolution to observe such differences. Rather, duration of cookstove use per day appears to be more influenced by frequency of meals and specific dishes cooked. For example, 71 % reported cooking foods thrice a day, and 25 % cooking twice a day, and 25 % reported making tortillas once per day, 64 % twice per day and 11 % thrice per day, leading to large variability in hours spent cooking. On average 43 % of the time was spent cooking food with the traditional stove, 34 % was spent making tortillas and 23 % was spent frying food. In addition when *nixtamal*, the cornmeal base for making tortillas, is prepared approximately once a week, or beans and stews are prepared, cooking would be longer, and all homes reported using stoves to heat water. Gas usage even if the homes had gas stoves was infrequent and a single cylinder usually lasted more than 3 months. (A cylinder holds 30 kg and costs US\$ 29.) Although families spend a considerable fraction of their income on cooking in rural Mexico, these families in Comachuen did not purchase fuelwood but collected it from nearby areas. In the vast majority of homes, wood was collected from local areas, principally by the husband once or twice each week, taking 1 to 4 hours. Trash was not burned and automobile traffic was relatively infrequent for most homes.

### 3.2. CO and $PM_{2.5}$ monitoring

Figures 4a and 4b demonstrate typical reductions in  $PM_{2.5}$  and CO in kitchens during a 48-hour monitoring period before and after Patsari installation. Times that the stove was lit during the day are clearly identifiable, and start at

9:30 a.m. with the preparation of the morning meal. The evening meal is typically the large meal as the husbands are away at work during the day. The cooking fires generally stay lit through 11 p.m., when they are left to die out. For both  $PM_{2.5}$  and CO dramatic reductions are seen with the installation of the Patsari stove.

Further, reasonably good agreement can be seen between CO and  $PM_{2.5}$  peaks during the 48-hour period. The CO and  $PM_{2.5}$  peaks occur together, as would be expected since both pollutants are produced during combustion. Since CO and  $PM_{2.5}$  are produced to different degrees during flaming and smoldering combustion, the relationship between the two on a short time-frame is not exact, although they correlate well over 48-hour periods (Figure 5).

Table 2 shows the reductions in CO and  $PM_{2.5}$  concentrations from paired comparisons before and after installation of the Patsari in 33 homes. Although some women continued to use a traditional stove in the same room, or in the yard, CO and  $PM_{2.5}$  concentrations were still significantly reduced by 66 % and 67 % respectively compared to the traditional TCSs. In addition Figure 6 shows boxplots (this term is explained in the figure caption) of the distributions of kitchen CO and  $PM_{2.5}$  concentrations for homes before and after installation of the Patsari. In these paired comparisons in the same homes, there was no overlap of values between the 25th and 75th percentiles before and after installation of the Patsari, showing reductions across the range as a result of the Patsari stove. In order to look at individual differences across houses

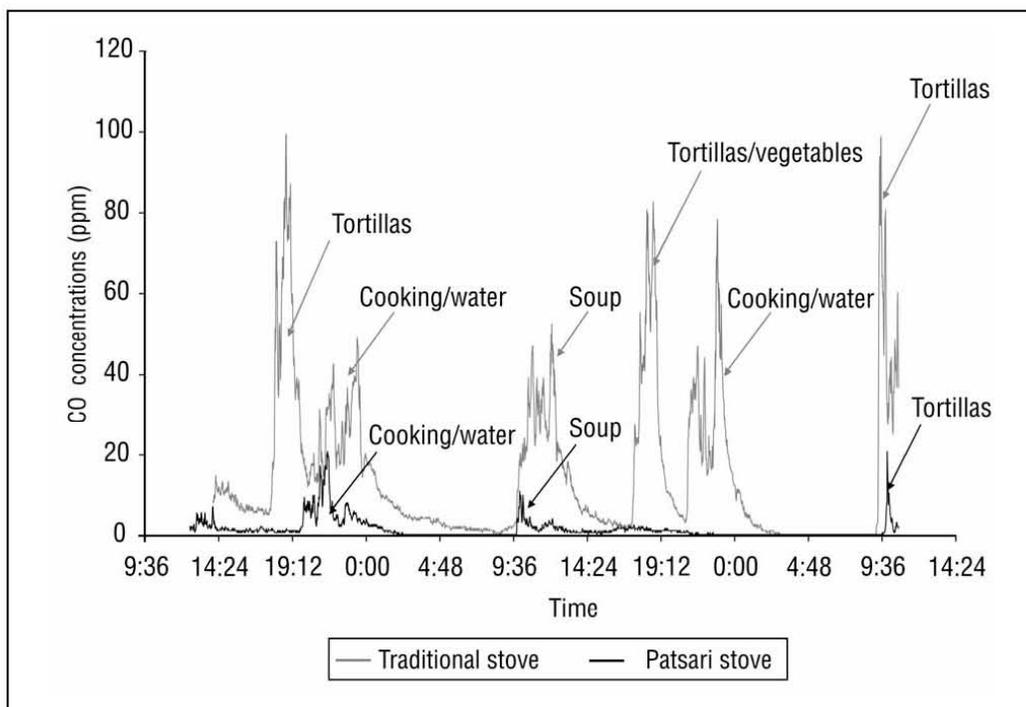


Figure 4b. Typical 48-hour 1-minute kitchen CO concentrations before and after installation of the improved stove

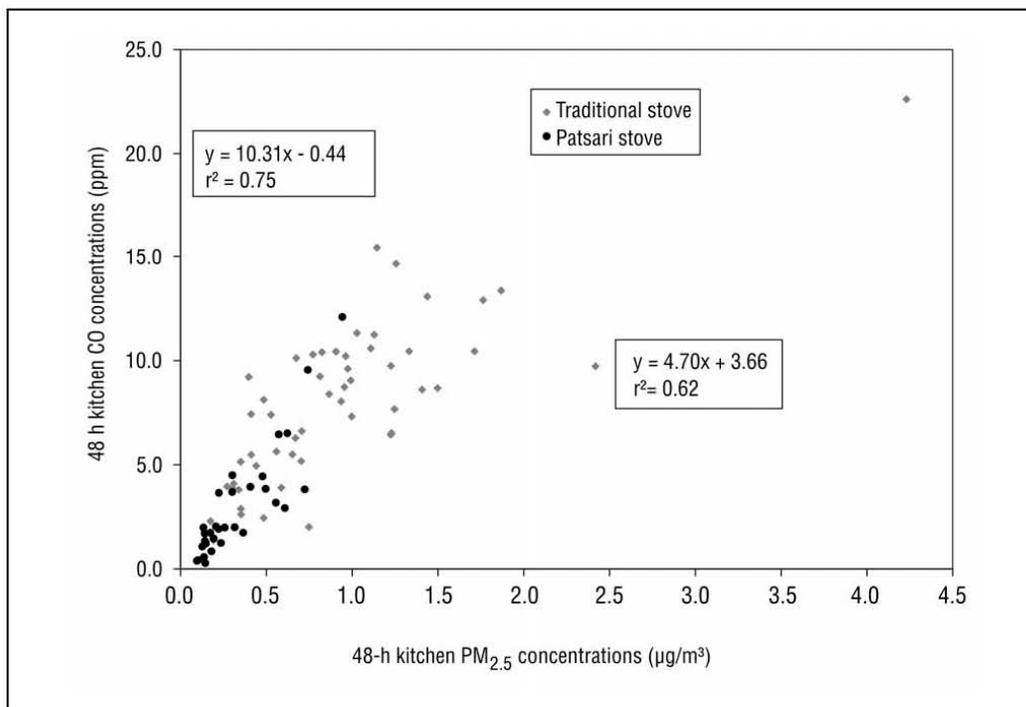


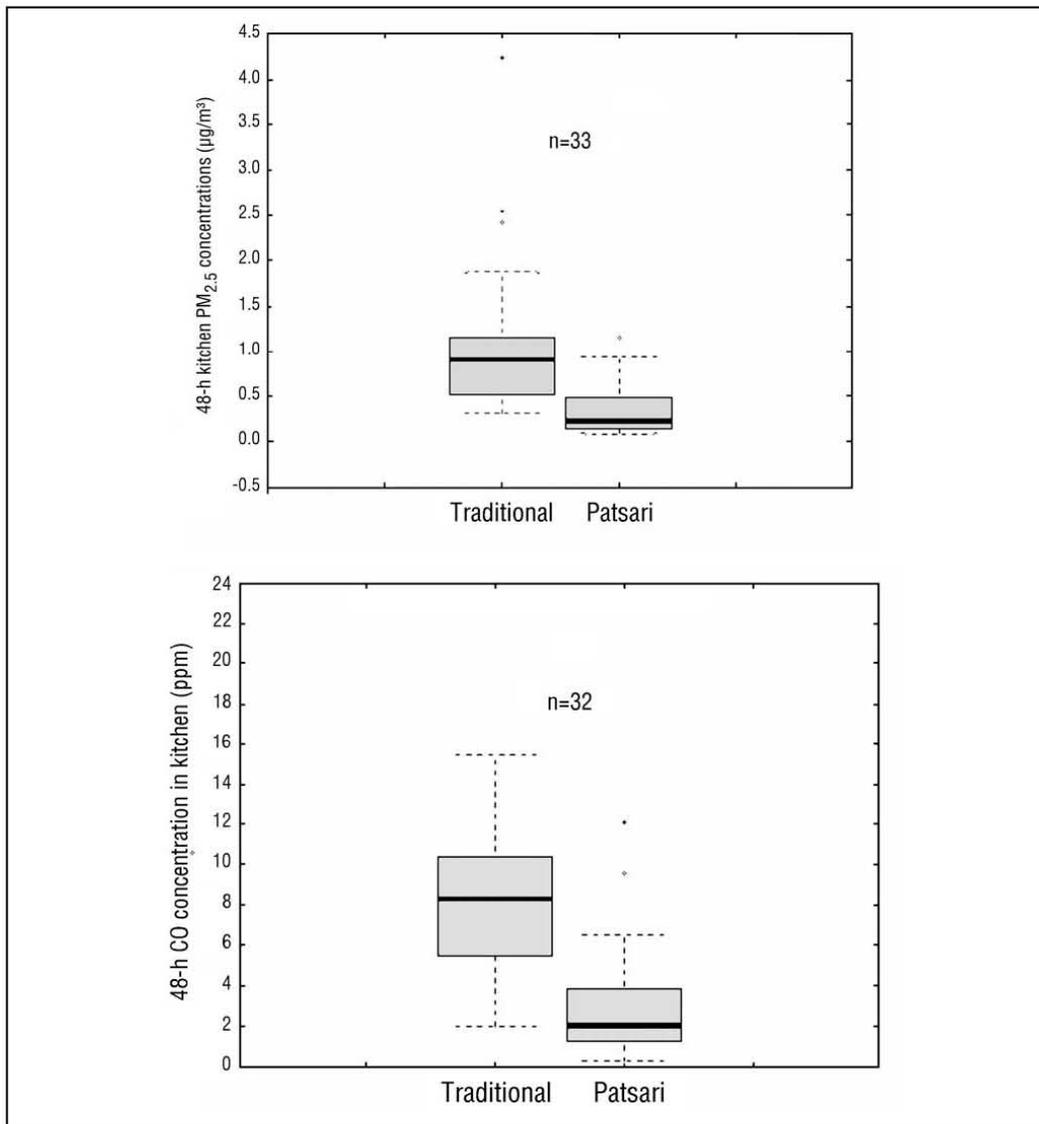
Figure 5. Correlation between average 48-hour PM<sub>2.5</sub> and CO for both traditional and Patsari stoves.

Table 2. GIRA: Patsari stove – paired before and after comparisons of 48-hour averages

	Before				After			Wilcoxon signed rank test <sup>[1]</sup>	Percentage change
	N	Average	Std. dev.	Maximum	Average	Std. dev.	Maximum		
PM (mg/m <sup>3</sup> )	33	1.02	0.79	4.23	0.34	0.27	1.16	< 0.001	67
CO (ppm)	32	8.88	4.44	22.61	3.02	2.66	12.09	< 0.001	66

**Note**

1. Wilcoxon signed rank test is a non-parametric (the underlying shape of the distribution of concentrations is not assumed) test for before-and-after samples based on the statistical probability of observing the ranked differences in the before and after measurements.



Figures 6a and 6b. Average 48-hour kitchen PM<sub>2.5</sub> (a, above) and CO (b, below) concentrations before and after installation of the Patsari stove. These are boxplots: here the darker central line in the box represents the median concentration, the lower and upper boundaries of the box represent the 25th and 75th percentiles respectively, and the dashed lines above and below represent the range of values, with extreme values and statistical outliers appearing as individual points.

Figure 7 shows a comparison of the individual kitchen reductions in relation to the average 48-hour concentrations measured with the traditional open-fire stove types. Figure 7 shows clearly that the magnitude of the reduction in each kitchen was closely related to the initial baseline levels with the TCS, with greater reductions in homes that had higher initial concentrations.

#### 4. Discussion

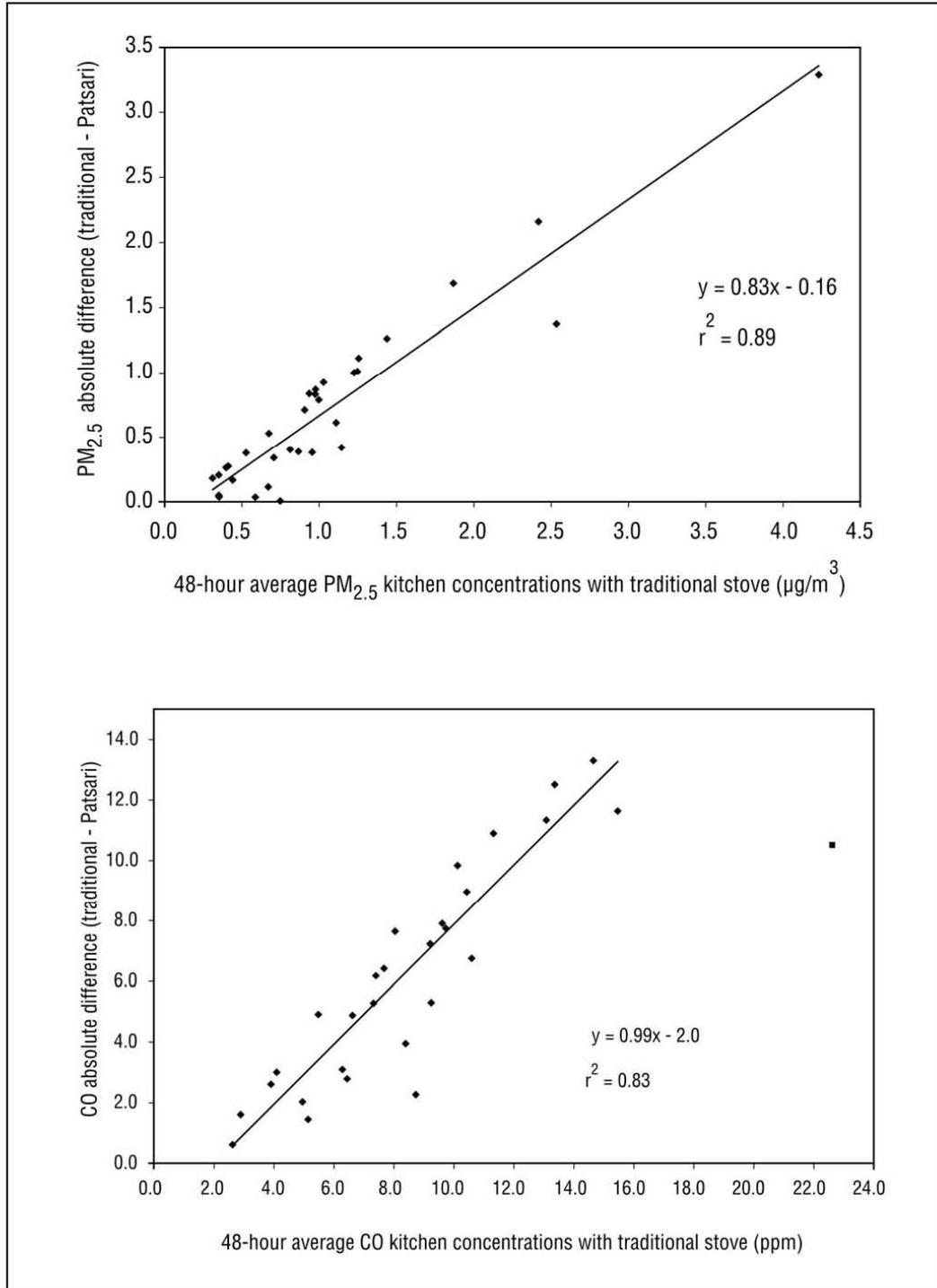
In paired comparisons the overall average  $PM_{2.5}$  and CO reductions observed as a result of installing the Patsari were 66 % ( $p < 0.001$ ) and 67 % ( $p < 0.001$ ) respectively (Table 2). Perhaps more importantly, however, the Patsari stove reduced kitchen concentrations across the distribution of homes to fairly consistent levels, and increasing reductions were seen in homes with higher initial concentrations with the open-fire stoves. Although these homes and communities relied predominantly on wood as the most important cooking fuel, gas, *olotes* (corn husks) and sawmill/carpentry residues were also used as secondary fuels in some homes. From an IAP perspective this complicates sampling designs, but multiple fuel usage is probably the most common situation in rural communities depending on season, agricultural products etc., as demonstrated in homes in China [Edwards et al., 2007b]. Since evaluating every combination of fuel usage is not feasible due to the large numbers of homes that would be required in order to maintain statistical power for such stratification, careful planning and preliminary surveys should be conducted in this regard before undertaking indoor air quality studies. Evaluation of the impact of the Patsari on kitchen concentrations should not be adversely affected due to the paired before-and-after design, and would reflect the actual adoption process of the stove.

Although because of resource constraints our sampling design did not include a control group in which no Patsari was installed to control for seasonal effects, in practice the use of a control group would have been limited, even controlling for housing type and family size, given (1) the diverse cooking patterns and cooking times between houses, (2) differences in fuel usage between homes, and (3) the different transitional stove adoption patterns where traditional stoves were still used to some degree in homes. Controlling for these factors would have entailed monitoring a prohibitively large number of control homes. Instead, the approach used in this study was to monitor the homes relatively soon after installation during similar climatic conditions to those when the traditional open-fire stoves were monitored. It is possible a seasonal/temporal bias exists in the reductions seen here, but is unlikely given the relatively small changes in climatic conditions and the consistent linear relationship between the reductions in kitchen concentrations with the Patsari stove in relation to the initial concentrations with the open-fire stoves.

A disadvantage of the variability seen due to transitional stove adoption patterns, cooking patterns and fuel usage is that the reductions seen here as a result of the Patsari stove do not necessarily represent those in other

communities. This community is likely to be at the lower end of potential reductions as technology penetration in the community is low, reducing the number of rapid adopter groups and tending to increase the degree of transitional stove adoption where the open-fire stove is retained for some cooking tasks. In addition, in these homes the husband habitually collected firewood. The issue of stove promotion as a time-saving technology is more complicated, therefore, as increased time spent cooking due to lower power output of stoves with covered combustion chambers would be perceived by the women of the home as being an increase in time taken to perform daily activities, as the principal time-saving would be for the husband in collecting firewood. Conversely, for houses that buy fuelwood, the benefits in reduced expenditures would be more apparent. Since success and adoption of the stove ultimately depend on users' perceptions, more targeted promotion matching stove benefits to users' priorities would ultimately result in a program with greater numbers of stoves in use. Although these homes may not necessarily be the homes where the greatest individual air pollution reductions are possible, the overall reductions of air pollution across the community would be greater as a result of more stoves in use. GIRA employs this approach in the analysis of adoption in communities, and the current focus is to identify characteristics of such adopter groups in longer-term monitoring of homes.

The coefficient of variation of average 48-hour kitchen  $PM_{2.5}$  concentrations remained at approximately 0.7 in both traditional TCS and Patsari homes, presumably due to continued use of a traditional stove in many homes as they transitioned to the new technology. In spite of efforts to constrain the variability through selection criteria of homes, therefore, the variability remained high due to differences in daily cooking habits. Initial statistical power analysis was conducted from a pilot study to estimate appropriate sample size to observe 40 % difference in kitchen concentrations using standard statistical criteria. The 40 % criterion was a subjective valuation determined on the basis of the high concentrations in homes using traditional open-fire stoves, which if not reduced by 40 %, would not warrant the time, expense and effort of installing the improved stove as a technology to reduce air pollution in kitchens (although there may be other reasons for installing it, such as reduced fuel use). Although 30 % more homes were selected than would be determined by sample size calculations, in practice 7 participants withdrew after installation of the stove due to the monitoring requirements of the health and indoor air studies, with a further 2 unlocatable. 17 were not monitored for a variety of reasons including 4 that planned to build a new kitchen in which to house the new stove, a positive and not uncommon response to the new stove, although complicating monitoring designs. 2 had decided to move to another house and the husbands of 2 had migrated for work, resulting in moving to live with relations. 8 participants were not monitored as they requested additional training in the use of the stoves and the remaining participant had modified her stove so that it no longer



Figures 7a and 7b. Absolute reduction from traditional to Patsari stoves in relation to initial concentrations: (a, above) PM<sub>2.5</sub>; (b, below) CO, with data point at far right not included in regression line due to undue influence on the slope of the line.

represented the use of a Patsari. If the households of all of the original participants had been monitored the average reductions in kitchen concentrations would probably have been lower, but would not have reflected the potential benefits of use of the Patsari stove since the stove was not used as designed.

The potential benefits are shown by the systematic reductions made across all households with increasing reductions in kitchen concentrations in relation to the average 48-hour concentrations measured with the traditional open-fire stove types (Figure 7). Thus, provided that sufficient training is given, and in spite of transitional adoption patterns in some homes where the traditional stove is retained for some tasks, reductions in kitchen concentrations would be expected across communities with the Patsari stove, proportional to their usage of the stove.

#### 4.1. Benefits of the monitoring and evaluation conceptual approach

The monitoring and evaluation approach followed by GIRA resulted in a continual process of stove innovation – adaptation – monitoring – dissemination. As a result, the stove models tested in this paper have been further improved and the “Patsari-brick” is currently the stove model more commonly disseminated by the project. Although changes in stove models present difficulties for policy-makers and funders wishing to put a single value on the potential benefits achievable through improved cookstoves, the improvement of stove models represents a positive and valuable outcome of the monitoring and evaluation approach, showing the evolution of the technology through feedback on design.

In addition to the direct benefit of understanding the potential reduction in air pollution concentrations that would result in kitchens, a major largely unrecognized outcome of the HEH Project and the monitoring and evaluation approach was in bringing together both national and international collaborators to focus their efforts in understanding the social, environmental, health, indoor air, and greenhouse-gas implications of the Patsari stove in a unique effort to monitor and assess all outcomes within the same communities. Although requiring significant additional resources, such efforts have generated new valuable data that allows an integrated evaluation of improved cookstove benefits. The monitoring studies have increased awareness in the Mexican government of indoor air pollution from biomass-burning as a problem requiring immediate action.

In addition, the Patsari project is the first project to our knowledge from the rural residential sector to demonstrate in-field emissions of greenhouse gases and among the first to market greenhouse-gas carbon credits in the private sector. The current and future impact of the results of this monitoring and evaluation approach on public policy is much larger, therefore, than the direct impact of the number of improved stoves installed in these communities, as they may benefit many rural communities throughout Mexico and possibly further afield.

Although there has been a tendency of government and funding agencies to focus on numbers of stoves dissemi-

nated, health benefits are dependent on consistent reductions in exposures, entailed by continued acceptance and adoption by local communities, since the health effects of most concern as a result of exposure to biomass smoke occur after chronic exposure, rather than as acute short-term effects. The success of a stove program ultimately is defined, therefore, by the numbers of stoves being used as intended in communities, rather than simply the number of stoves that are disseminated or built. Unfortunately, due to the long-term nature of follow-up in communities in order to assess chronic health end-points, evaluations of the full impacts of these interventions are currently under-funded and -researched. Thus, although this paper addresses the first stage in this process in monitoring the indoor air pollutant reductions achieved by the intervention, more resources should be allocated to monitoring usage of the stoves and health impacts over time. Further, more resources should be allocated to identification of rapid adopter subgroups in communities where the benefits of the stoves are better perceived. This strategy will not only maximize the number of stoves in use in communities and the time and resources involved in the process, but will also aid in further dissemination of the stove through other adopter groups in the community. ■

#### Acknowledgements

We would first like to thank the Purepecha women who opened their homes and believed in the benefits of participating in this study. We would also like to thank Nick Lam, Jephte Cruz, Abraham Martínez, Teresa Marrón and Ana María Sanjoto for their help in conducting fieldwork. Funding was provided by the Shell Foundation, the National Institute of Ecology in Mexico, the Federal Commission for the Protection against Sanitary Risks, University of California Irvine, UC MEXUS CONACYT Program, CONACYT grant # 23640 and PAPIIT grant # IN109807.

#### Notes

1. Health improvements, greenhouse gas emissions, and social and environmental impacts of the Patsari in the same area of Mexico will be reported elsewhere.
2. For more technical details about the Patsari stove see [Masera et al., 2005].
3. More information about GIRA can be found at <http://www.gira.org.mx>.
4. See <http://www.ashdenawards.org/winners/gira>.
5. A *comal* is a large metal or ceramic flat surface on which tortillas are cooked, which is sealed to avoid fugitive smoke emissions to the room.
6. PM<sub>2.5</sub> refers to particles that have a settling velocity less than a spherical particle with a diameter of 2.5 microns (µm) (aerodynamic diameter). In general the vast majority of combustion particles are less than 1 micron in diameter, and smaller particles are thought to have greater health impacts.

#### References

- Armendáriz Amez, C., Edwards R.D., Johnson M., Zuk, M., Rojas-Bracho, L., Serrano, P., Rojas-Rodriguez, H., and Masera O.R., 2007. "Reductions in personal exposures and indoor concentrations of PM and CO in rural Mexico as a result of the installation of a Patsari improved cookstove" (in process).
- Bailis, R., Bernueta, V., Chengappa, C., Dutta, K., Edwards, R., Masera, O., Still, D., and Smith, K.R., 2007. "Performance testing for monitoring improved biomass stove interventions: experiences of the Household Energy and Health Project", *Energy for Sustainable Development*, XI(2) (this issue), pp. 57-70.
- Bernueta, V., Edwards, R.D., and Masera, O.R., 2007. "Energy performance of woodburning cookstoves in Michoacán, Mexico", *Renewable Energy* (forthcoming).
- Bruce, N., Perez-Padilla, R., and Albalak, R., 2000. "Indoor air pollution in developing countries: a major environmental and public health challenge for the new millennium", *Bulletin of the World Health Organization*, 78(9), pp. 1078-1092.
- Chowdhury, Z., Edwards, R.D., Johnson, M., Naumoff Shields, K., Allen, T., Canuz, E., and Smith, K.R., 2007. "An inexpensive light-scattering particle monitor: field validation", *Journal of Environmental Monitoring* (submitted).
- Díaz, R., 2000. *Consumo de Leña en el Sector Residencial de México. Evolución Histórica y Emisiones de CO<sub>2</sub>* tesis maestría en ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, DF, Mexico.

## Articles

- Edwards, R., Smith, K.R., Kirby, B., Allen, T., Litton, C.D., and Hering, S., 2006. "An inexpensive dual-chamber particle monitor: laboratory characterization", *Journal of the Air and Waste Management Association*, 56, pp. 789-799.
- Edwards, R., Hubbard, A., Khalakdina, A., Pennise, D., and Smith, K.R., 2007a. "Design considerations for field studies of changes in indoor air pollution due to improved stoves", *Energy for Sustainable Development*, XI(2) (this issue), pp. 71-81.
- Edwards, R.D., Smith, K.R., Liu, Y., Yin, Z., He, G., and Sinton, J., 2007b. "Household CO and PM levels measured as part of a review of China's national improved stove program", *Indoor Air* (accepted, in press).
- Ghilardi, A., Guerrero, G., and Masera, O.R., 2007. "Spatial analysis of residential fuelwood supply and demand patterns in Mexico using the WISDOM approach", *Biomass and Bioenergy* (in press).
- GIRA (Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, A.C.), 2006. *Promoting Clean Multiple Fuel Cooking for Improved Livelihoods in Latin America*, HEH final report for Shell Foundation.
- Johnson, M.J., Edwards, R.D., Allatone, F.C., and Masera, O., 2007. "In field emissions of air pollution and greenhouse gases from cookstoves in rural Mexican households", (in process).
- Litton, C.D., Smith K.R., Edwards, R.D., and Allen, T., 2004. "Combined optical and ionization measurement techniques for inexpensive characterization of micrometer and submicrometer aerosols", *Aerosol Science and Technology*, 38, pp. 1054-1062.
- Magallanes, A., 2006. *Estudio de Percepciones sobre el Cambio de Vida a Partir del Uso de Estufas Mejoradas*, internal report, GIRA, Pátzcuaro, Mexico, 35 pp.
- Masera, O.R., 1995. *Socioeconomic and Environmental Implications of Fuelwood Use Dynamics and Fuel Switching in Rural Mexico*, Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, CA, USA.
- Masera, O.R., and Navia, J., 1997. "Fuel switching or multiple cooking fuels: understanding interfuel substitution patterns in rural Mexican households", *Biomass and Bioenergy*, 12(5), pp. 347-361.
- Masera, O.R., Saatkamp, B.D., and Kammen D.M., 2000. "From linear fuel switching to multiple cooking strategies: a critique and alternative to the energy ladder model for rural households", *World Development*, 28(12), pp. 2083-2103.
- Masera, O.R., Diaz, R., and Berrueta, V., 2005. "From cookstoves to cooking systems: the integrated program on sustainable household energy use in Mexico", *Energy for Sustainable Development*, IX(1), pp. 25-36.
- Riojas-Rodriguez, H., Romieu, I., Marron-Mares, T., Rodriguez-Dozal, S., and Masera, O., 2006. "Health impact assessment due the introduction of improved stoves in Michoacan, Mexico", International Conference, Paris, September 2-6, Conference Abstracts Supplement, *Epidemiology*, 17(6) Supplement, pp. S226-S227, November.
- Smith, K.R., Mehta, S., and Maeusezahl-Feuz, M., 2004. "Indoor smoke from household solid fuels", in: Ezzati, M., Rodgers, A.D., Lopez, A.D., and Murray, C.J.L., (eds.), *Comparative Quantification of Health Risks: Global and Regional Burden of Disease due to Selected Major Risk Factors*, Vol. 2, pp. 1435-1493, World Health Organization, Geneva.
- Troncoso, K., Castillo A., Masera, O., and Merino, L., 2006. "Social perceptions about a technological innovation for fuelwood cooking: case study in rural Mexico", *Energy Policy* (in press).
- Zuk, M., Rojas Bracho, L., Blanco, S., Serrano, P., Cruz, J., Angeles, F., Tzintzun, G., Ammendáriz Amez, C., Edwards, R.D., Johnson, M.J., Riojas-Rodriguez, H., and Masera, O.R., 2006. "The impact of improved wood burning stoves on fine particulate matter concentrations in rural Mexican homes", *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, advance online publication, May 24, doi:10.1038/sj.jes.7500499.

## Subscribe now to Energy for Sustainable Development

### Annual subscription rates (for four issues)

	India	Other developing countries	Industrialised countries
Individual (Web only)	Rs. 450	US\$ 10	US\$ 50
Individual (Print, includes free web access)	Rs. 700	US\$ 50	US\$ 125
Institution (Print, includes free web access)	Rs. 2000	US\$ 75	US\$ 200

### Single issues (print only, up to 10 copies)

	India	Other developing countries	Industrialised countries
Individual	Rs. 200	US\$ 15	US\$ 40
Institution	Rs. 600	US\$ 25	US\$ 60

### Payment options:

*By cheque, payable in India*

Send a cheque in favour of "Energy for Sustainable Development" to the address given below.

*With credit card, from outside India*

Payments in US\$ may be made using the PayPal facility at <http://www.ieiglobal.org/paypal.html>

When subscribing, please make sure to send an e-mail or fax containing details of subscriber's name, address and category of subscription to the ESD publication office.

Energy for Sustainable Development  
 c/o International Energy Initiative  
 25/5 Borebank Road, Benson Town  
 Bangalore 560 046, India  
 Tel/fax: (91-80) 2353 8426  
 E-mail: [ieibr@vsnl.com](mailto:ieibr@vsnl.com)  
<http://www.ieiglobal.org/esd.html>

## Performance testing for monitoring improved biomass stove interventions: experiences of the Household Energy and Health Project<sup>[1]</sup>

*Rob Bailis*

*Yale School of Forestry and Environmental Studies, 205 Prospect St., New Haven, CT 06511, USA  
E-mail: robert.bailis@yale.edu*

*Victor Berrueta*

*Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada and Centro de Investigaciones en Ecosistemas  
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701  
Colonia Ex-Hacienda de San José de la Huerta, 58190, Morelia, Michoacán, Mexico*

*Chaya Chengappa*

*Development Alternatives, 23 Sree Rama Mandir Road, Basavanagudi, Bangalore 560004, India*

*Karabi Dutta*

*Appropriate Rural Technology Institute (ARTI), 2nd Floor, Manini Apartments, Dhayarigaon, Pune 411 041, India*

*Rufus Edwards*

*Department of Epidemiology, School of Medicine, University of California, Irvine, CA 92697-3957, USA*

*Omar Masera*

*Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada and Centro de Investigaciones en Ecosistemas  
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701  
Colonia Ex-Hacienda de San José de la Huerta, 58190, Morelia, Michoacán, Mexico*

*Dean Still*

*Aprovecho Research Center, PO Box 156 Creswell, OR, 97426, USA*

*Kirk R. Smith*

*School of Public Health, University of California, Berkeley, CA 94720-7360, USA*

*This paper describes the monitoring and evaluation of three improved cookstove dissemination projects implemented between 2004 and 2006 by non-governmental organizations (NGOs) in India and Mexico. The projects assessed stove performance using lab-based water boiling tests (WBTs), which yield a number of performance indicators including time to boil water, specific fuel consumption, and energy efficiency when the stove is operated at both high and low power output. They also conducted field-based kitchen performance tests (KPTs), which yield daily per capita fuel consumption in real cooking conditions. In addition, one NGO utilized a controlled cooking test, which combined elements of lab- and field-based tests. In all cases, improved cookstoves (ICSs) were compared to local traditional cookstoves (TCSs). The results of the WBTs were mixed. Although the improved stoves generally showed some improvement in efficiency for the low-power simmering phases, the stoves were less efficient than traditional stoves in high-power water-boiling phases. The results from the KPTs were much less ambiguous. Three ICS models were tested for fuel consumption during real household use. All ICSs showed statistically significant reductions ( $p < 0.05$ ) in average daily per capita fuel use ranging from 19 to 67 %. We also explore the correlations between the outcomes in lab-based tests and field-based tests in order to understand the relationships between the two assessment methods. Only fuel consumption in the low-power phase of the WBT showed a strong correlation with fuel consumption in the field ( $r^2 = 0.83$ ,  $p = 0.01$ ). We discuss the implications of this association as well as the other outcomes and present some policy recommendations for monitoring and evaluation of large-scale stove interventions.*

## 1. Introduction

In the 1980s, outside of China, reducing deforestation was often the main motivation for improved cookstove (ICS) interventions. Woodfuel dependence was thought to contribute directly to deforestation and environmental degradation in rural areas of developing countries and reducing household demand was a logical solution. The large Chinese program, on the other hand, focused primarily on increasing fuel efficiency to sustain local welfare and stem the demand for fossil fuels in rural areas [Smith et al., 1993]. More recently, it has been recognized that deforestation in developing countries is the result of a complex mix of locally variable factors including demand for cultivable land, expansion of roads and other infrastructure, and demand for timber as well as energy [Leach and Mearns, 1988; Geist and Lambin, 2002; Arnold et al., 2003]. Household use of solid biomass fuel remains a pressing problem, however, as rural communities worldwide suffer from energy scarcity, even if demand for woodfuels is not the main cause of that scarcity and, as discussed in other papers in this series, significant health effects have been associated with the smoke from simple biomass stoves. In some areas, heavy reliance on biomass also creates significant time burdens if it is collected from surrounding areas, or a significant expense if purchased. Thus, well-designed ICS programs can provide multiple benefits for end-users.

Simply introducing an ICS, however, does not guarantee positive outcomes will be achieved. Utilizing the ICS to mitigate negative impacts of solid biomass consumption involves a dual challenge. First, there is a design problem: a technically appropriate and cost-effective stove must be developed. Second, there is the challenge of dissemination: in order to effect positive change, the stove must be introduced into people's kitchens and adopted into their daily cooking practices. The end-result of an intervention is as much a function of user preferences and behavior as the technical design of the ICS. The stove user, however, often goes unstudied in household energy interventions [Ezzati and Kammen, 2002]. The other papers in this collection explore the impact of a group of stove interventions on indoor air quality. This paper explores the impact of the interventions on household fuel consumption.

Hundreds of fuel-saving cookstove designs have been promoted worldwide [Westhoff and Germann, 1995; Still et al., 2007]. Most have undergone some type of lab testing, typically with a variant of a water boiling test (WBT, discussed in more detail below). Relatively few programs have measured the actual adoption of stoves and their impact on household fuel consumption in real conditions. Thus, in most cases, reductions in fuel consumption resulting from improved stove dissemination have been based on WBT-style efficiency tests conducted under laboratory or highly-controlled field conditions.

One exception is the largest stove program in history: China's National Improved Stove Program or NISP, which required field surveys, including stove performance tests, to be conducted by an independent body before final pay-

ments were made by the national agency to the local county-level authorities who implemented the dissemination. NISP testing was conducted in real households. In order for counties to receive payments, stoves in at least 30 homes were randomly sampled and 90 % had to achieve a minimum of 18 % thermal efficiency [Lu, 1993]. Additional criteria were a later supplement of the NISP test: over 50 % of stoves examined had to use commercially-produced components and stove performance had to be maintained for three years after passing the initial acceptability test [FAO, 1993a; Lu, 1993; Smith et al., 1993; Sinton et al., 2004]. However, most tests that were conducted were variants of the WBT, which determined energy efficiency in controlled conditions<sup>[2]</sup>.

Controlled efficiency tests do not capture the complexity of real household conditions<sup>[3]</sup>. Thus, there may not be a direct correlation between the performance of the ICS in laboratory-based tests and its performance in actual households<sup>[4]</sup>. Identifying such incongruities, when they exist, is vital to understanding stove performance. As a result, as described here, both lab-based efficiency tests and field-based effectiveness tests were incorporated into the monitoring and evaluation strategies of the Household Energy and Health (HEH) Project.

Stove performance testing can assist stove developers with both the design challenge and the dissemination challenge. Lab-based tests are vital during the design stage of the ICS. These inform designers about the effectiveness with which different stoves transfer the energy released from the combustion process into the cooking pot. In addition, lab testing allows designers to quickly explore the performance of different materials and assess variations in stove geometry. In contrast, field tests provide a kind of "reality check" for stove designers by documenting the performance of stoves in the hands of actual users in their own kitchens. This can be extremely useful, particularly in the early stages of stove dissemination.

Field testing can also be useful after the ICS has been in use for some time. Qualitative surveys can be combined with quantitative field tests in order to observe long-term changes in user behavior and/or gain an understanding of how the stove performs as it ages. Poor field performance at any time can indicate faults in the construction of the stove. However, it can also highlight poor communication between ICS promoters and their target population.

In the remainder of this paper, we offer a brief background on stove performance testing and the development of these protocols for the HEH Project. In Section 2 we discuss the methodologies in detail. In Section 3, we describe each NGO's findings and discuss the relationship between the outcome of lab- and field-based testing in Section 4. Finally, we close with several recommendations for future efforts in stove performance testing in Section 5.

### 1.1. Background on stove performance testing and the development of this set of protocols

Programs to promote ICSs date to the 1940s in South Asia [Kishore and Ramana, 2002], but gained momentum across the developing world in the 1980s as a result of increased attention to deforestation and rural energy,

which characterized that era [Leach and Mearns, 1988; Leach and Mearns, 1996]. To date, China and India have hosted the largest ICS programs with over 180 million stoves disseminated in China and more than 30 million disseminated in India [Kishore and Ramana, 2002; Sinton et al., 2004]. Each program developed quality standards for stoves based, in part, on standardized lab-based tests [FAO, 1993a, b], a simplified version of which was applied in the field during the verification stage of the Chinese program [TERI, 1989; Kishore and Ramana, 2002; Sinton et al., 2004].

Through the 1980s, while the Indian and Chinese programs were being developed, many smaller efforts were also developed throughout the developing world. These were led by a mix of non-governmental organizations (NGOs) and donor agencies. Recognizing some organizational oversight would be helpful to assess the numerous stove designs and interventions that were proliferating, the United States Agency for International Development (USAID) convened a series of workshops to promote standardization both in the language and in the methods used to evaluate stove performance. Through this effort, led largely by Volunteers in Technical Assistance (VITA), a US-based NGO, three stove performance tests were developed: the water boiling test (WBT), controlled cooking test (CCT) and kitchen performance test (KPT) [VITA, 1985]<sup>[5]</sup>. Soon after the VITA standards were released, a second VITA publication describing technical aspects of stove design was released [Baldwin, 1986]. This second publication containing slight variations of the VITA stove tests has been the most widely-cited reference for stove developers since. The popularity of both publications led to the widespread adoption of VITA's tests and close variations. In particular, variations of the VITA WBT have become a popular standard<sup>[6]</sup>. The CCT and KPT have seen more limited applications<sup>[7]</sup>.

Because of its popularity and relative simplicity, the VITA WBT was taken as a starting-point for designing the lab-based component of the stove performance testing protocols for the HEH Project. Similarly, VITA's KPT was adapted for the field-based component. The CCT was also adapted for use by Shell Foundation (SF) grantees. However, to save time and resources, the CCT was made optional while the other tests were required as part of the project monitoring and evaluation. Only one group conducted the CCT and its results will be discussed below.

## 2. Methodologies

### 2.1. Lab-based testing: the WBT

The WBT consists of a high-power phase and a low-power phase. The former simulates rapid cooking tasks such as water-boiling for making tea, while both the high-power and low-power phases are required to simulate cooking tasks like cooking rice, beans or hard grains. Exploring stove performance at both high and low power output gives some indication of how a stove performs in a range of cooking conditions. In addition, the WBT provides a range of stove performance indicators: thermal efficiency; fuel consumption, and time to boil a fixed quantity of water<sup>[8]</sup>.

In order to promote standardized protocols<sup>[9]</sup>, specific equipment was recommended and "kits" containing all of the necessary materials were distributed to the participating NGOs. In addition, members of the research team visited the NGOs to provide training. As the equipment was to be utilized in rudimentary labs with little access to replacement parts or service, the recommended equipment represents a balance of cost, accuracy, reliability and ease of use<sup>[10]</sup>.

#### 2.1.1. Changes in the WBT

The HEH WBT incorporates these changes to VITA's 1985 test protocol [VITA, 1985].

- Specific consumption is defined as the ratio of the total amount of wood used to the amount of water "cooked" [Baldwin, 1986], and was modified for multi-pot stoves to account for heat transferred to secondary cooking pots<sup>[11]</sup>.
- The VITA test suggests extinguishing and weighing wood and charcoal, weighing freshly-boiled water, then reigniting the fire and replacing cooking pot in rapid succession in order to proceed with the next stage of the test. This is both risky and stressful for stove testers. This revised WBT avoids reassembling the fire by stopping the test at this step, measuring the hot water, unused fuel and unburned char. Then, rather than trying to relight the same fire, the next phase of the test is conducted with a freshly-built fire (see Note 10 for a link to full details of the procedure).
- During the low-power simmer test, the tester is instructed to try to keep the water temperature as close to 3° C below the predetermined boiling point as possible. Different amounts of steam are produced at each degree point below boiling. For this reason, it is necessary to minimize the variation in temperature to ensure that tests are comparable.
- A hot-start test is incorporated in the high-power phase to account for the different performance of stoves that are kept hot throughout the day. This is important for high-mass stoves, whose performance may vary significantly between cold and hot starting conditions.
- Simmering occurs for 45 minutes rather than 30 minutes (as suggested in [VITA, 1985]). The reason for this change is that some stoves create a large amount of char during the high-power phase, which enables small amounts of wood to remain burning. This can skew the results because it reduces the need to add additional fuel. A 45-minute simmering period is sufficiently long so that the char produced during the high-power phase will be fully consumed and additional wood will be needed to maintain the water close to the boiling point.

The WBT yields numerous indicators of stove performance, but here, we report three that are of particular importance to end-users and stove designers: time to boil a fixed quantity of water, fuel consumption per unit of water boiled, and thermal efficiency. The time taken to boil water is straightforward. The only complication arises in stoves that can accommodate multiple cooking pots. In these cases, the time required to boil water in the primary

pot is defined as the end-point; other pots are ignored. Specific consumption is defined as the ratio of the mass of fuel consumed to the volume of water heated for each cooking task and is measured in grams (g) of fuel per liter (l) of water<sup>[12]</sup>. Thermal efficiency is the ratio of the work done by heating and evaporating water to the energy embodied in the fuel<sup>[13]</sup>.

In the simmering test, water is maintained at a boil rather than heated from room temperature. Time-to-boil is not meaningful in this case; however, specific consumption and efficiency are still relevant. Specific consumption is redefined as the ratio of the mass of fuel consumed to the volume of water remaining after 45 minutes at, or just below, the boiling point. As above, it is measured in g/l (fuel/water). Thermal efficiency is defined in the same way, but there is no temperature change in the water, so the only work done on the cooking pot is the evaporation of water. Each NGO conducted tests on one or more versions of the local "traditional stove" as well as one or more ICS. Results are discussed below.

It is worth noting that this definition of specific consumption in the simmer phase has generated some debate among stove developers. The point of contention centers on the use of the final water volume rather than the initial water volume in the calculation. Using the final water volume creates a metric that is quite sensitive to user behavior and may send incorrect signals to testers when testing stoves with similar performance. To explore the sensitivity of the results presented in this paper to the calculation method, both were compared. Variation in the data was reduced when calculations were done using initial water volume, which is expected; however, we found no change in the relationship between TCS and ICS when both calculation methods are compared. Nor did we find any change in the (poor) relationship between lab-based stove performance (SP) indicators and fuel consumption in the field.

### 2.2. Efficacy testing: the controlled cooking test (CCT)<sup>[14]</sup>

The Mexican team also conducted a controlled cooking test (CCT), which is best conducted in a community member's kitchen under closely controlled conditions in order to simulate real cooking more closely than the WBT, but still control certain variables such as the quantity of food prepared, the quality of fuel used, and various behavioral characteristics of the cook. To control for these factors, stove testers recruit a local cook, usually a woman from one of their target communities, to prepare a typical local meal using the various stoves that they wish to compare. The test is repeated several times for each stove. The cook uses an identical quantity of carefully measured ingredients for each test and is requested to cook in a similar manner throughout the tests so that the outcomes are comparable. Fuel characteristics are carefully noted and are held constant to the extent possible for all tests. (See [Dutt and Ravindranath, 1993] for a discussion of the CCT used in several applications.) Results are discussed below.

### 2.3. Field-based effectiveness testing: the kitchen performance test (KPT)

The kitchen performance test (KPT) is used to demon-

strate the effect of stove interventions on household fuel consumption. Daily measurements of fuel consumption are made in a representative sample of households using traditional stoves and ICSs over an extended period of time (3-7 days). Because fuel consumption is weighed directly, the KPT is the preferred method of quantifying the ICS's impact on household fuel use.

Although based on a simpler concept than the WBT, the KPT is more difficult for organizations to conduct in practice because of complicated sample selection procedures and logistical issues of working in real households. The former are particularly important because the variability in measurements of household fuel consumption tends to be higher than the variability observed in lab-based testing, hence larger sample sizes are needed to obtain statistically significant results. Some groups could not overcome this difficulty and followed different procedures. This is discussed further below.

Another difficulty with the KPT was that it was originally designed to accommodate only wood-burning cookstoves while many households use agricultural residues of various kinds [VITA, 1985; Baldwin, 1986]. In some parts of the world, households still rely on one fuel for cooking, but in the communities visited in this study more than one fuel is common. Multiple fuels may be used in a single stove, as in the case of wood and dung in India, or in multiple stoves, as in the case of wood-fired cookstoves used side by side with LPG burners in Mexico. An ICS might affect consumption of each cooking fuel. The KPT protocol that the NGOs brought to the field, however, did not accommodate multiple fuels. Thus, modifications had to be made at the analysis stage. Using feedback from the NGOs, the KPT procedure has recently been modified to account for the multiple stoves and fuels<sup>[15]</sup>.

#### 2.3.1. Household selection for the KPT

As with studies of indoor air quality described in this issue, KPTs can be designed either as cross-sectional or before-after studies [Smith et al., 2007, in this issue]. The before-after study design permits stove testers to use a smaller sample size than the cross-sectional method for a desired level of statistical significance. Circumstances differ between stove projects, however, and so the testing methods must be adapted to suit the conditions in the field. For example, it may be difficult to test TCS and ICS in the same household in a before-after design because of local circumstances or resource limitations. Further, testers may wish to measure fuel consumption in families that have already adapted to the ICS, which requires that they use cross-sectional design with a group of families still using the TCS. In either case, to the extent possible, the sample of households that participate in the test should be selected randomly from among the target population in order to obtain unbiased results.

##### 2.3.1.1. Interdisciplinary Group on Appropriate Rural Technology (GIRA)

Berrueta et al. [2007] describe the implementation of GIRA's KPT. In the Purépecha region 600 households from 6 communities were randomly selected to participate in a study of the impacts of the dissemination of the

Table 1. Results of GIRA's WBT comparing two traditional stoves and the Patsari stove (n = 3 for each stove)

			Average of two traditional stoves		Patsari			
			Mean	SD	Mean	SD	Change (%)	Improved?
High power test	Cold start	Time (min)	17.0	2.2	60	3.5	253	No <sup>****</sup>
		SC (g/l)	161	24.5	473	94.4	195	No <sup>****</sup>
		Eff (%)	15.5	3.8	7	0.6	-55	No <sup>****</sup>
	Hot start	Time (min)	14.5	0.6	47	7.2	224	No <sup>****</sup>
		SC (g/l)	135	34.9	188	40.5	39	No
		Eff (%)	18.0	4.3	17	3.9	-6	No
Low power test	SC (g/l)	287	67.9	193	105	-33	Yes	
	Eff (%)	17.0	5.9	30	11.7	76	Yes <sup>***</sup>	

## Notes

In this and all subsequent tables, SD = standard deviation of the mean of daily energy consumption per capita. Entries with no stars are not significant ( $p > 0.10$ ). The significances of other entries are: \*  $p = 0.10$ ; \*\*  $p = 0.05$ ; \*\*\*  $p = 0.01$ , where  $p$  refers to the probability that the measured difference occurred just by chance, i.e., does not represent a true difference. By convention, if the  $p$ -value of a comparison is less than 0.05 (5%), the difference is termed 'significant'.

Patsari stove on families' health. A pilot study suggested smaller samples were sufficient to obtain statistically significant differences in per capita energy consumption. Oversampling of open-fire stoves was conducted in the initial phase, to account for drop-outs from migration or other factors. Sample numbers were reduced in subsequent phases due to resource limitations in following all homes through the entire study, which was conducted in three phases: (1) using a traditional cookstove (dry season); (2) an intermediate phase 6 months after installation of the Patsari stove (rainy season) with 32 families (21 exclusive wood users and 11 wood and LPG users); and (3) after 1 year of use, with 14 families (8 exclusive wood users and 6 wood and LPG users). Daily fuel consumption was monitored over a 7-day period. Fuelwood was not provided to families to minimize bias in family fuel consumption, but to compensate the family for their cooperation, a Patsari stove was built for them free of charge.

#### 2.3.1.2. Development Alternatives (DA)

DA conducted KPTs in three communities during three different seasons: summer, winter, and monsoon. It measured fuel consumption in seven households in each community, following a paired-sample design in which the families first used a traditional stove for three days and later used an improved stove for three days. Following common practice in the area, the test households used dung cake in addition to fuelwood<sup>[16]</sup>.

#### 2.3.1.3. Appropriate Rural Technology Institute (ARTI)

ARTI originally planned for a paired-sample study, but opted for a cross-sectional study because the families that it monitored using traditional stoves opted out of buying the ICS. It also chose to stratify its sample into areas of high and low rainfall because patterns of energy use are quite different between the two areas and ARTI suspected that people in each area would select different types of ICS on the basis of these patterns. No gifts or compensation were offered to participants in the stove performance tests.

ARTI drew its sample from six distinct villages in the high-rainfall area, where households use both cowdung and fuelwood. People use the same variety of wood and use dung and wood in more or less the same proportion. The study was spread over a large number of communities because only a small percentage of the people were willing to adopt a new stove and ARTI wished to minimize the risk of drop-outs from the study. In the low-rainfall area, ARTI opted for a smaller number of communities because it found that most people wanted to buy a vented 2-pot stove; thus only two villages were selected. In addition, people in the low-rainfall area use only wood as fuel; with dung used only as a fire-starting material if at all.

ARTI had difficulty persuading participants to accept measurements that were extended over several days. Thus, it resorted to a modified version of the KPT in which it conducted a large number of one-day tests and a small number of multi-day tests. The implications for this change in protocol are addressed below<sup>[17]</sup>.

### 3. Results

#### 3.1. Lab-based tests: the WBT and CCT

In the WBT, improvements in stove performance are demonstrated by statistically significant decreases in time to boil and specific consumption and by increases in thermal efficiency. In total, seven improved stoves were tested: one from GIRA, and three from each of the Indian NGOs. Notably, for the ICSs tested by the three NGOs, the results from the three different phases of the WBT were mixed, with no unambiguous winners or losers. Results of each NGO's tests are discussed below.

##### 3.1.1. GIRA

Table 1 shows the results of GIRA's WBTs. Comprehensive analysis of the results of the stove-testing conducted by GIRA may be found in [Berrueta et al., 2007]. GIRA tested two types of traditional stoves commonly used in the Pátzcuaro area: an open three-stone fire and an open

Table 2a. Results of DA's WBT comparing a traditional stove and three improved stoves (n = 3 for all tests)

			Traditional		Sukhad				Laxmi				Anandi			
			Mean	SD	Mean	SD	Change (%)	Improved?	Mean	SD	Change (%)	Improved?	Mean	SD	Change (%)	Improved?
High power test	Cold start	Time (min)	40	4.7	64.3	17.0	61	No*	72.3	18.5	81	No***	65	17.1	63	No***
		SC (g/l)	223	14.7	169	63.5	-24	Yes	224	36.1	1	No	251	68.1	13	No
		Eff (%)	12	0.0	18.6	3.5	51	Yes**	14	4.2	14	Yes	11.6	1.3	-6	No
	Hot start	Time (min)	34.6	1.5	43.6	9.5	26	No	46.6	8.0	35	No*	33	6.6	-5	Yes
		SC (g/l)	187	30.0	165	34.2	-12	Yes	120	50.3	-36	Yes	161	18.2	-14	Yes
		Eff (%)	14	0.0	15.3	2.4	9	Yes	24.3	11.8	74	Yes***	15	2.0	7	Yes
Low power test	SC (g/l)	157	47.9	110	47.8	-30	Yes	87	85.8	-45	Yes	248	43.5	58	No*	
	Eff (%)	16.3	0.0	17	3.4	4	Yes	17	6.6	4	Yes	14.6	1.9	-10	No	

## Notes

Entries with no stars are not significant ( $p > 0.10$ ). The significances of other entries are: \*  $p = 0.10$ ; \*\*  $p = 0.05$ ; \*\*\*  $p = 0.01$ .

Table 2b. Results of ARTI's WBT comparing a traditional stove and three improved stoves (n = 3 for all tests)

			Traditional		Laxmi				Bhagyalaxmi				Grihalaxmi			
			Mean	SD	Mean	SD	Change (%)	Improved?	Mean	SD	Change (%)	Improved?	Mean	SD	Change (%)	Improved?
High power test	Cold start	Time (min)	23	1.2	56.7	1.7	147	No***	29.7	28.9	29	No	19.3	1.5	-16	Yes**
		SC (g/l)	191	12.7	186	15.5	-3	Yes	110	5.8	-43	Yes***	92.8	29.4	-51	Yes***
		Eff (%)	21	2.9	13	3.5	-38	No**	22	1.1	5	Yes	23	3.0	10	Yes
	Hot start	Time (min)	21	0.6	33.7	1.7	60	No***	22.3	8.1	6	No	15.7	2.9	-25	Yes***
		SC (g/l)	93.8	12.8	189	8.0	101	No***	87.5	9.0	-7	Yes	103	15.7	10	No
		Eff (%)	23	2.7	12	2.1	-48	No***	24	1.1	4	Yes	21	4.4	-9	No
Low power test	SC (g/l)	168	10.8	208	18.6	24	No***	179	92.8	7	No	206	15.8	23	No**	
	Eff (%)	15	1.5	22	1.2	47	Yes***	18.5	9.0	23	Yes	19	1.8	27	Yes**	

## Notes

Entries with no stars are not significant ( $p > 0.10$ ). The significances of other entries are: \*  $p = 0.10$ ; \*\*  $p = 0.05$ ; \*\*\*  $p = 0.01$ .

fire surrounded by a U-shaped clay mound that forms a partially enclosed combustion chamber. These results show the improved Patsari stove in comparison to the average of both traditional open-fire stoves [Berrueta et al., 2007].

The Patsari took considerably longer than the traditional stoves to boil water in the high-power tests, consumed more fuel, and had a lower thermal efficiency [Berrueta et al., 2007]. Most of these results were highly significant ( $p < 0.01$ )<sup>18</sup>. The Patsari showed improvement between the cold-start test and the hot-start test, and some results from the latter showed no significant difference between the Patsari and the traditional stoves. Notably, the Patsari performed better than the traditional stoves in the low-power test. Its performance in the high-power phase can be attributed to the Patsari's large mass and its reliance on conductive heat transfer through a metal grill or *comal*. Both of these characteristics slow the transfer of heat to the cooking pot and lower performance in the high-power phase of the WBT.

## 3.1.2. DA and ARTI

DA and ARTI each tested three models of improved stove that were based on similar designs. These are described in each NGO's paper this issue. As with GIRA, their results were mixed. In the high-power tests, the majority of the Indian NGOs' stoves demonstrated statistically significant improvements relative to the traditional stove in at least one indicator of stove performance. Tables 2a and 2b show the results of DA's and ARTI's tests respectively.

In the low-power test, the results were also mixed. Two of DA's stoves, Sukhad and Laxmi, showed, on average, large improvements in fuel consumption in the simmering test relative to the traditional stove. The natural variation of the results was so large, however, that the observed differences were not statistically significant<sup>19</sup>. In ARTI's simmer tests, two stoves demonstrated significant improvements in efficiency relative to the traditional stove ( $p = 0.01$ ). However, each ICS consumed more fuel during the test than the traditional stove ( $p = 0.05$ ). This incongruous result is likely an artifact of the stove tester's behavior and raises some questions about the utility of

Table 3. GIRA's CCT comparing the average specific fuel consumption from two traditional stoves to two variations of the Patsari stove<sup>[1]</sup>

	Traditional stoves		Patsari-1 <sup>[2]</sup>				Patsari-2 <sup>[2]</sup>			
	Mean	SD	Mean	SD	% change	p	Mean	SD	% change	p
Specific consumption <sup>[3]</sup>	1.67	0.54	0.64	0.07	-62	0.01	0.91	0.16	-46	0.01

## Notes

1. n = 12 for the combined traditional stoves and 6 for each Patsari. SD = standard deviation around the mean, a statistic of the variance in the measurements.
2. GIRA has promoted more than one model of Patsari. In the CCT, it tested two models, one with a single firebox and a metal *comal* (Patsari-1) and a second with two separate fireboxes (Patsari-2). In the latter, one firebox heats a clay *comal* and the other heats a smaller metal *comal*. (For a full description of both stoves, see [Masera, et al., 2005].)
3. In the CCT, specific consumption is the dimensionless ratio of the mass of fuel utilized to the mass of food cooked; in this case, kg of wood per kg of tortillas.

Table 4. Total energy consumption (MJ per adult equivalent person per day) in households before and after receiving the Patsari stove accounting for consumption of both wood and LPG

	Pre-adoption: traditional stoves			Post-adoption: improved stoves			% change <sup>[1]</sup>
	n	Mean	SD	n	Mean	SD	
Households using only firewood	23	54.1	13	8	17.9	6.7	67
Households using firewood and LPG	20	41.8	17.5	6	14.1	3.3	66
All households	43	47.9	15.3	14	16	5.5	67

## Note

1. All results are significant with  $p < 0.01$ . The pre-adoption sample includes a large number of drop-outs. If drop-outs are excluded from the comparison, the observed improvement is still significant, with  $p < 0.01$ . However, the high rate of drop-out raises the question of bias in these results. For a full description of the sampling procedure, see [Berrueta et al., 2007].

efficiency (as defined in this protocol) as a metric of stove performance in the simmering phase of the WBT.

### 3.1.3. Summary

To summarize the WBT results, none of the ICSs demonstrated clear superiority over traditional stoves in every indicator of performance. However, there were no clear losers either as the ICSs all performed as well as or better than their counterpart TCSs in at least one metric of stove performance. The best performer was ARTI's Grihalaxmi, which showed statistically significant improvement in four out of eight indicators. Of course, since each stove is designed for cooking quite different cuisines with different fuel mixtures, comparisons of the results between stoves are not appropriate. If the Indian and Mexican stoves were exchanged they would likely not meet cooking needs in their new locations.

Despite the mixed performance in the WBTs, a few generalizations are possible. First, in the high-power test, all stoves showed some improvement in hot-start conditions relative to cold-start conditions. This is expected for any high-mass stove of the types tested, in which heat retention boosts stove performance. Similarly, high-mass stoves may perform better than some traditional stoves in the simmer tests, where heat retention can also boost performance. We did observe 30-45 % reductions in specific consumption during the simmer phase in three ICS models: GIRA's Patsari and DA's Sukhad and Laxmi stoves. However, there was large scatter in these results and none were statistically significant<sup>[20]</sup>.

### 3.2. CCT results from GIRA

GIRA was the only NGO to conduct a CCT [Masera et al., 2005]. For the common cooking task, it chose tortillas, a round flatbread made from corn flour that is an impor-

tant staple food throughout Mexico as well as much of Central America. In contrast to the results of the WBT, it found that two models of Patsari both showed significant improvement in fuel consumption relative to the two types of traditional open-fire stoves [Berrueta et al., 2007]. Its results are summarized in Table 3.

### 3.3. Field-based results (KPT)

The KPT presented a challenge, as some of the participating NGOs were not accustomed to conducting field-based measurements. An additional challenge arose because of multiple fuel use in households. Each group's findings are discussed below.

#### 3.3.1. GIRA

GIRA utilized a paired-sample study design and followed the procedure for the KPT closely, measuring daily fuel consumption in each household for 5-7 days. The only adjustment made was to divide its sample into two groups in order to differentiate between households that use both LPG and wood for cooking and households that only use wood. It initially selected 23 households using LPG and wood together and 20 households using only wood for pre-intervention testing in an initial oversample, which was then reduced to 8 and 6 households respectively due to resource constraints when target numbers for statistical significance were maintained [Berrueta et al., 2007]. Its results are summarized in Table 4.

The reductions in fuel consumption observed between the traditional stoves and Patsari stoves are highly significant. Interestingly, GIRA not only found that wood consumption and net energy consumption went down with the adoption of the Patsari stove. It also found LPG consumption decreased by 75 % among households using it. This result is also significant with  $p < 0.01$  and is illustrated

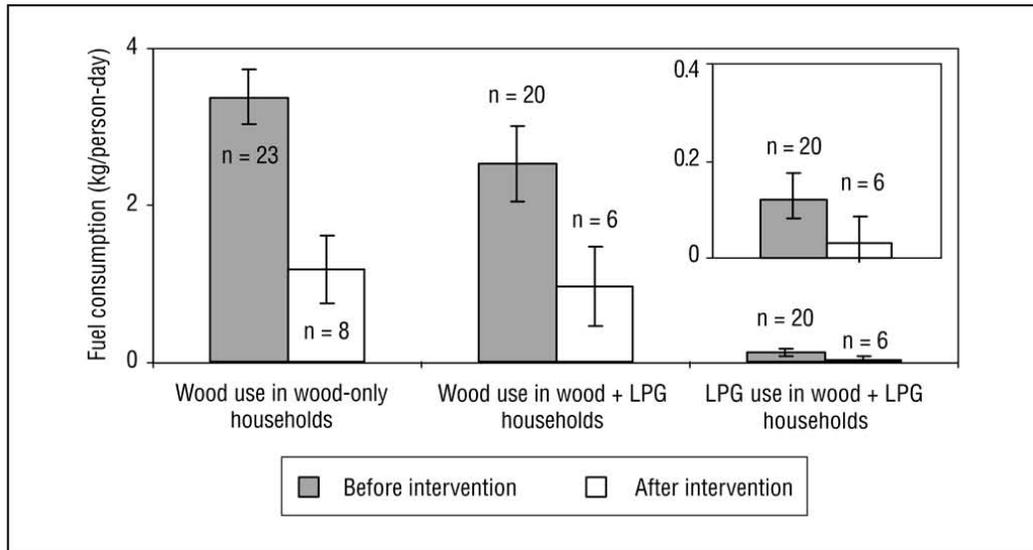


Figure 1. GIRA's daily fuel consumption in "wood-only" and "wood + LPG" households (the inset plot includes LPG consumption scaled up to show detail). Error bars show 95 % confidence intervals, i.e., the range within which it is calculated that the true result must lie with  $p = 0.05$ .

Table 5. Total energy consumption (MJ per capita per day) based on three days of measurements, for DA

	Traditional stove			Sukhad			Comparison		
	n	Mean	SD	n	Mean	SD	% difference	p	
<b>All households</b>	21	20.9	3.44	21	16.9	2.34	-19	< 0.001	
Village	Gadkhini	7	20.6	2.62	7	16.4	2.42	-20	< 0.001
	Gundrai	7	21.5	2.82	7	17.3	2.36	-20	< 0.001
	Rajapur	7	20.7	4.62	7	17.0	2.25	-18	0.003
Season	Monsoon	21	20.7	2.31	21	16.5	1.47	-20	< 0.001
	Winter	21	23.8	1.54	21	19.2	1.18	-19	< 0.001
	Summer	21	18.3	3.59	21	15.0	1.86	-18	0.001

**Note**

n = number of households; SD = standard deviation of the mean; p = significance level

in Figure 1. Post-intervention surveys indicate that LPG consumption decreased because the Patsari stove was used for cooking tasks, such as boiling water, for which cooks previously relied on LPG.

**3.3.2. DA**

DA followed a paired-sample study design in which fuel consumption in seven participating households was measured daily for three days. The results of the test give the average daily consumption over the three-day span. All participants used the traditional stove and then the Sukhad stove. Some participants used both wood and dung in their stoves, but no fossil fuels were used for cooking during the KPTs. DA found reductions in fuel consumption in every test. There were also slight differences in fuel consumption among villages, as well as seasonal variation. The differences between villages were not statistically significant, but some seasonal differences were significant

with  $p < 0.05$ . This is summarized in Table 5.

**3.3.3. ARTI**

ARTI utilized a cross-sectional methodology in several different high-rainfall and low-rainfall communities, but only the results from the high-rainfall communities are provided here. ARTI's findings are complicated by the local usage of multiple fuels and stoves. Participating households used wood and cowdung as well as some fossil fuels (either kerosene or LPG). Only wood and dung consumption were measured in the field, so the energy consumption reported here omits kerosene or LPG use, but ARTI reports that kerosene or LPG consumption is very low, even among families owning kerosene or LPG stoves. If so, the error introduced by omitting fossil fuels from the analysis should be minimal.

In total, ARTI collected 97 measurement-days of daily fuel consumption among 59 individual households in

which 22 households used a traditional biomass cookstove as their primary stove. The remaining households used either an improved solid-fuel cookstove (n = 23), a fossil fuel stove (n = 13), or a charcoal stove (n = 1) for their primary cooking needs. All households using a traditional stove also report some use of fossil fuels (either kerosene or LPG). In addition, roughly half report using an ICS as a secondary stove. The primary and secondary stove combinations used by households in the sample are described in Table 6.

If all of ARTI's measurement-days are included in an analysis of fuel consumption, we find an average decrease of roughly 15 % in daily per capita energy consumption between households using a traditional stove and households using an improved or fossil fuel stove. This result is not significant ( $p > 0.05$ ), however. Moreover, there is substantial variation in ARTI's results depending on the duration of the KPT. When the KPT was performed for one day, the reduction in daily per capita energy consumption between households using a TCS and households using either improved or fossil-fuel stoves is substantial (43 %,  $p < 0.001$ ). In contrast, measurements of daily per capita energy consumption measured in different households over a period of 3 or 7 days show households with improved or fossil-fuel stoves consume more wood per capita than households using traditional stoves. However, the small sample of households included in these longer tests makes the differences statistically insignificant<sup>[21]</sup>. Comparisons are shown in Table 7 and depicted in Figure 2.

If only the one-day samples are considered because of the small number of longer tests, then it appears that households using ICSs and FFSs consume considerably less fuel per capita than households using traditional stoves, and the results are statistically significant ( $p < 0.001$ ). Further, any conclusions that we draw must be made with the caveat that fossil-fuel consumption, which occurred in 47 of 59 households, though thought to be low, was not measured. In the absence of this information, it is difficult to draw final conclusions about the difference in total energy consumption between households relying primarily on traditional stoves and those relying on

improved biomass and/or FF stoves.

### 3.4. Comparison of lab-based and field-based test results

GIRA and DA observed statistically significant reductions in daily fuel consumption among households that adopted their respective ICSs. ARTI observed some reduction in household fuel consumption, although the interpretation is complicated by lack of measurements of fossil-fuel consumption. Nevertheless, the results of their one-day KPTs, covering 48 household-days of observations, show significant reduction in biomass fuel consumption. The collective results of all NGOs' KPTs are illustrated in Figure 3.

This outcome would be difficult to predict from the results of the WBTs. As was discussed above, WBTs yield several indicators of stove performance, but no clear pattern emerged in this study. In Section 3.1 above, we report time to boil, specific consumption, and thermal efficiency for cold- and hot-start high-power tests as well as specific consumption and thermal efficiency for low-power tests. We can test the degree to which stove performance in the

**Table 6. Number of households using various stove-fuel combinations among participants in ARTI's KPT (column headings represent primary stoves and row headings represent secondary stoves)**

Number of households	Primary stove <sup>[1]</sup>			
	TCS	ICS	FFS	Sarai
Total	22 <sup>[2]</sup>	23	13	1
Household has no other stove	1	10	0	0
Household also uses TCS	-	0	12	1
Household also uses ICS	5	-	1	0
Household also uses FFS	21	13	12 <sup>[3]</sup>	1

**Notes**

1. TCS = traditional cookstove; ICS = improved cookstove; FFS = fossil-fuel stove (includes both LPG and kerosene); Sarai = a type of charcoal stove that cooks by steaming developed by ARTI. (See <http://bioenergylists.org/stovesdoc/PKarve/sarai.html> for a description.)
2. Column total for TCS exceeds 'total' because some households report both ICS and FFS as secondary stoves.
3. In these cases the primary stove uses LPG and the secondary stove uses kerosene.

**Table 7. ARTI's KPT results showing mean daily per capita energy consumption (MJ/kg) among households using traditional cookstoves (TCSs) and households using either improved cookstoves (ICSs) or fossil-fuel stoves (FFSs) disaggregated by duration of the measurement period<sup>[1]</sup>**

Daily per capita energy consumption		Primary stove is TCS <sup>[2]</sup>				Primary stove is ICS or FFS <sup>[2]</sup>				Comparison	
		n		Mean	SD	n		Mean	SD	% difference	p
		Days	HHs			Days	HHs				
All measurement days		38	22	25.3	11.5	59	37	21.5	9.54	-15	0.09
Duration of KPT	One day	16	16	34.0	11.1	32	32	19.3	8.09	-43	< 0.001
	Three days	15	5	21.0	6.87	6	2	24.7	4.64	18	0.17
	One week	7	1	14.6	3.32	21	3	23.9	11.8	64	0.05

**Notes**

1. Households using ICSs and FFSs as their primary stoves are grouped together because 12 out of 13 families listing FFS as their primary stove use ICSs as secondary stove (see Table 6). The household using the Sarai stove is omitted from this analysis because it represents only one household-day of measurement.
2. n-days = number of measurement days; n-HHs = number of households, SD = standard deviation of the mean; p = statistical significance

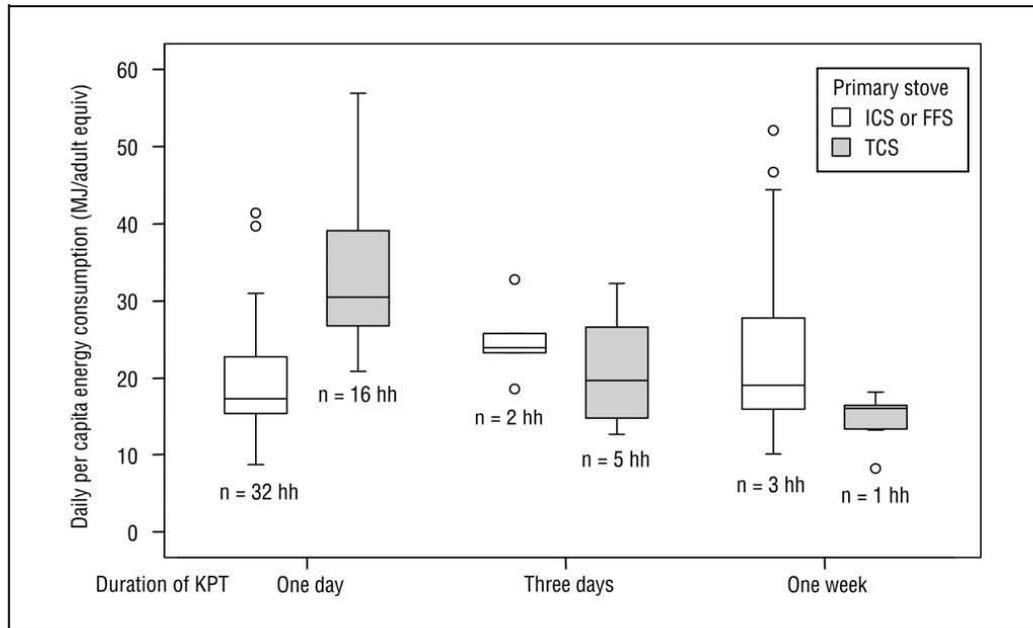


Figure 2. Distribution of daily per capita energy consumption among households disaggregated by duration of ARTI's KPT measurements. The horizontal lines show the median values while the shaded areas are bounded by the quartiles. Circles represent outliers, which are points lying 1.5-3 interquartile ranges above or below the interquartile range of the data without the outliers.

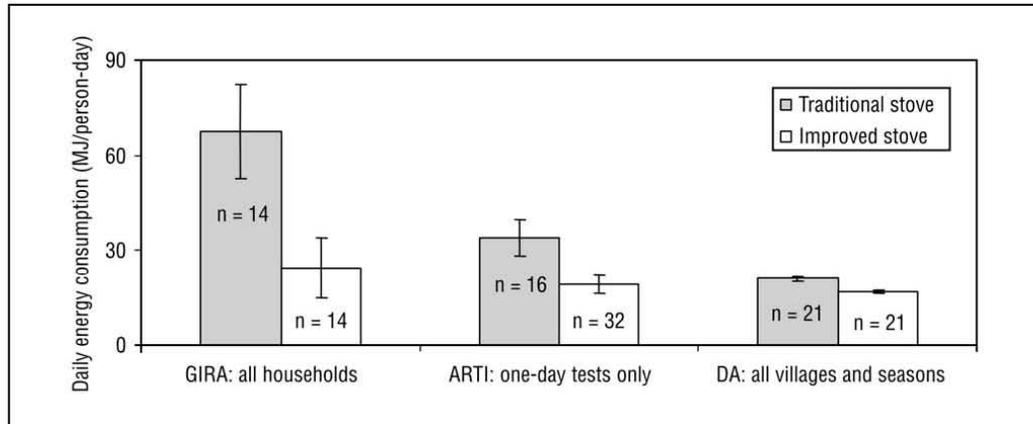


Figure 3. Average daily energy consumption in households measured by each NGO. All groups showed reductions in energy consumption that are statistically significant ( $p < 0.01$ ). However, ARTI's results only include households tested for one day and do not include possible fossil-fuel consumption among some households.

lab is associated with performance in the field by examining correlations between indicators derived from the WBT and the outcome of field tests illustrated in Figure 3. These correlations and their level of statistical significance are shown in Table 8. From the table, it is clear that few of the lab-based indicators have statistically significant correlations with field-based measurements of fuel consumption. Only specific consumption in the low-power simmer test has a significant correlation, as

depicted in Figure 4. For this indicator, the correlation is positive ( $r^2 = 0.83$ ,  $p \sim 0.01$ )<sup>[22]</sup>, which indicates that higher fuel consumption during simmering in the lab is associated with higher fuel consumption in the field. In addition, boiling times in both cold- and hot-start high-power tests show a moderately strong inverse correlation that is nearly significant ( $r^2 \sim -0.5$  with  $p \sim 0.10$ ). This indicates longer boiling times in the lab are probably associated with reduced fuel consumption in the field. This

**Table 8. Correlations between time to boil (Time), efficiency (Eff), and specific fuel consumption (SC) measured in the lab-based WBT and daily per capita fuel consumption derived from the field-based KPT among all NGOs<sup>11</sup>**

	Cold start			Hot start			Simmer	
	Time	Eff	SC	Time	Eff	SC	Eff	SC
Correlation <sup>[2]</sup> with per capita fuel use	-0.5	< 0.1	< 0.1	-0.53	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.83
p-value	0.11	0.95	0.69	0.10	0.78	0.61	0.70	0.01

**Notes**

1. Only the stoves that were used by households in the KPT are included in the calculations: GIRA's Patsari, DA's Sukhad and ARTI's Laxmi, as well as traditional stoves from each area.
2. The correlation is a statistical measure of the degree to which two measurements are associated (with no implication of causation). If negative, it refers to an inverse correlation.

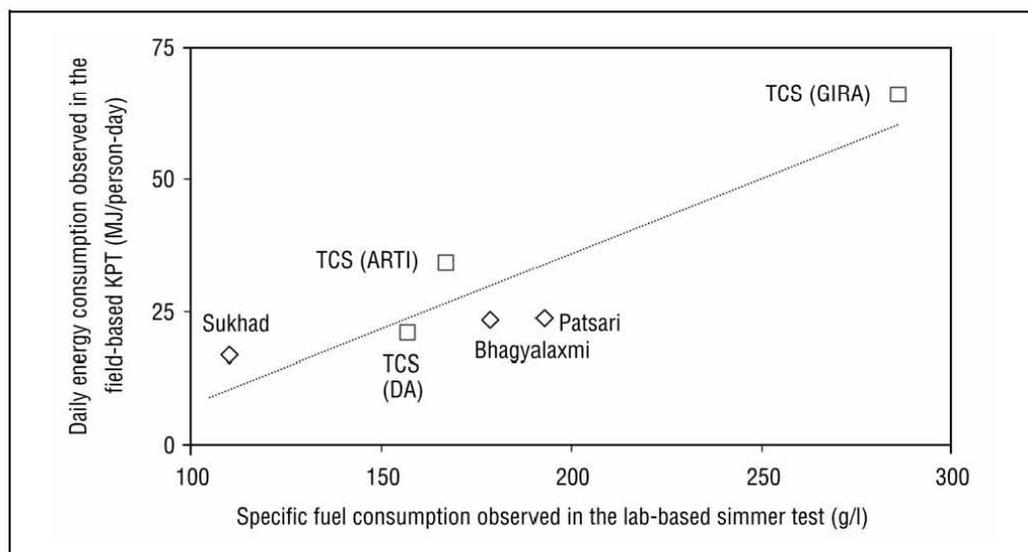


Figure 4. Correlation between fuel consumption during simmering in lab-based tests and fuel consumption in households using the stoves observed in the field ( $r^2 = 0.83$ ).

outcome, which is not intuitive, undoubtedly occurred because the fuel-saving ICSs promoted in this study all have high thermal mass and take longer to boil water than traditional stoves. That only these indicators among many are correlated, however, may indicate only a chance occurrence. More work would be needed to verify these initial conclusions.

**4. Discussion**

*4.1. Predicting field performance from lab-based tests*

For future studies, it is important to understand if results derived in the lab can be used to predict performance in the field. The evidence presented here demonstrates that, for this group of stoves, there is little observable association between lab performance and field performance in the high-power lab tests. One possible explanation of this result is that the stoves studied in this are high-mass designs, which perform poorly in high-power tests [Still et al., 2007]. Importantly, poor lab performance is not necessarily indicative of high fuel consumption in the field, particularly where stoves are not designed for fast, high-

power cooking applications. As the results of each NGO's KPT demonstrate, families using these stoves have reduced their fuel consumption by an average of 19-66 %.

Specific fuel consumption in the low-power simmering test was found to correlate reasonably well with fuel consumption in the field. Although this indicator has the potential to be used as a predictor of actual fuel savings in the field, the number of stoves tested here was not sufficient to derive strong relationships as the degree of correlation was strongly impacted by inclusion or removal of individual stove types. Further, only relatively high-mass stoves were evaluated here, and relationships may differ for other stove types. Additional study of the associations between lab-based and field-based test results incorporating different types of stoves is needed before an indicator derived from lab-based tests can be recommended as a predictor of fuel consumption in the field.

**5. Conclusions and recommendations for effective monitoring of performance**

Although results from the WBT fail to show significant

Table 9. Potential outcomes from each type of stove performance test discussed in this report<sup>[1]</sup>

		Theoretical issues				Applied issues	
		Basic principles of stove operation	Test variations in stove design	Test if stove is appropriate for local cuisine	Test if stove is suitable for local users	Assess fuel savings among users	Assess adoption by end-users <sup>[2]</sup>
Lab ↓	WBT	+	+	-	-	-	-
	CCT	±	+	+	+	±	-
Field	KPT	-	-	+	+	+	+

Notes

1. Key to symbols: - unsuitable; ± potentially suitable; + suitable
2. The KPT is suitable to assess adoption by end-users if it includes a qualitative survey in addition to the quantitative measure of fuel consumption.

improvement in stove performance between TCS and ICS, the ICSs promoted by these NGOs appear to reduce fuel consumption in actual use by between 19 and 66 %. The largest reductions occurred in Mexico where fuel consumption with the TCS was highest. In order to fully assess the impacts of these interventions, however, additional follow-up should be conducted in order to assess rates of stove adoption and stove degradation in the long term<sup>[23]</sup>.

The WBT is a tool for stove developers to understand the basic principles of stove function and the effect of changing certain parameters of stove design. It serves as a useful way to understand the effect of design changes and refine the stove before dissemination. Over the years, however, the WBT has often been used as the benchmark test for all stove activity at the expense of field tests. On the basis of the evidence here, claims of actual fuel savings derived solely from lab-based WBTs must be made with care and are quite likely inaccurate. With the exception of specific fuel consumption in the low-power tests, we find little evidence of a simple relationship between efficiency or fuel consumption in the lab-based tests and fuel consumption in real stove use. Indeed, most correlations are so weak that we cannot use the results of this study to predict whether lab tests typically overestimate or underestimate actual fuel consumption.

In addition, stove adoption and use are dependent on many other factors including climate, cultural norms, and specific cooking fuels and food preferences. Since success of an ICS program is defined by the numbers of stoves in actual use in communities and the extent of multiple fuel and stove use, rather than simply the number of stoves that are disseminated, both adoption and performance within the household should be incorporated in evaluation efforts.

On the basis of the discussion above, the relative advantages and disadvantages of the three stove testing approaches are summarized in Table 9. We have the following recommendations for large-scale ICS dissemination.

1. The WBT should be utilized during the design stage of the ICS and potentially to check that building of stoves in place is done as intended. When using the

WBT, consideration should be given to the relative importance of high-power and low-power cooking among the target population. In areas where low-power cooking dominates, testers should want to emphasize the result of the simmer test.

2. The CCT should be promoted as a more appropriate and locally relevant measure of lab-based stove performance. CCTs can be performed by NGOs with minimal training, although short-term assistance in data analysis and interpretation may be needed from universities, research institutes, or environmental consulting firms. The results from the WBT should be interpreted in the light of the CCT and an assessment of the relative importance of high-power and low-power cooking in local practices.
3. As with indoor air quality monitoring, field surveys of pilot interventions will also be necessary, particularly in order to assess the following:
  - a. the actual adoption rates of the ICS among the target population and the extent to which this changes over time;
  - b. the extent to which traditional stoves remain in use and reasons for this;
  - c. the durability and maintenance requirements of the ICS in real kitchens; and
  - d. end-users' suggestions for improvements to the design and/or construction of the stove.
4. Quantification of fuel consumption in the field using the KPT is necessary if the agency implementing or funding the stove intervention wants specific data about the impact of the ICS on household, community, regional or national-scale energy consumption. Available lab-based tests are not yet reliable predictors of fuel consumption in the field.
5. Given their difficulty, field assessments should only be planned if appropriate resources are available. Thus, stove organizations need sufficient support to enable reliable field monitoring. Donors must understand this need and budgets for stove projects should reflect it by including funds for group training, hiring outside consultants, and/or subcontracting monitoring and evaluation (M&E) tasks to a third party. ■

### Acknowledgements

The authors first express their thanks to the dozens of families in India and Mexico who agreed to share their knowledge about cooking practices and participate in stove performance testing.

The authors also acknowledge with gratitude the support received from the Shell Foundation to fund the NGOs' activities and conduct this study. We appreciate the efforts of Nordica McCarty and Damon Ogle of the Aprovecho Research Center for multiple refinements to the lab testing protocols. In addition, DA thanks the field team in Jhansi for conducting the SPT and KPT studies. ARTI thanks field officers M.M. Shaikh and P.P. Kadam who conducted the stove performance tests, and G.K. Kedari and S.A. Rane for conducting surveys and awareness programs in each of the villages selected for the study. GIRA extends its thanks to the National Autonomous University of Mexico (UNAM) for research support and the National Council of Science and Technology of Mexico (CONACYT-Fondo Sectorial de Investigación Ambiental, Project 23640), the PAPIIT Program, UNAM (Project IN109607), and the UC MEXUS CONACYT collaborative grant program for financing its activities. We also recognize the methodological backup offered by Aprovecho Research Center and the University of California and thank them for it.

### Notes

1. This paper is one of six describing work done as part of the Household Energy and Health (HEH) Project, coordinated by the Indoor Air Pollution Group at the School of Public Health of the University of California, Berkeley. The other papers, which describe the overall aims of the project, air pollution results from three NGO stove dissemination projects (1 in Mexico and 2 in India), and statistical guidelines for designing field studies, are also found in this issue of *Energy for Sustainable Development*.
2. Lu [1993] also notes that some version of a controlled cooking test was also conducted and that new and old stoves were compared, although no results are reported.
3. For example, in India, the government has claimed annual fuel savings of 700 kg for every improved stove disseminated under its National Programme on Improved Chulhas (NPIC) (*chulha* means cookstove). An independent field test found that the stoves promoted by NPIC reduced fuel consumption relative to traditional cookstoves in only two out of five communities tested. The improved-stove users in the other three communities actually used more fuel. In one community, the average increase in consumption was 62 % [citing TERI, 1989; Kistore and Ramana, 2002].
4. For example, VITA's water boiling test suggested emulating field conditions using local pots and a similar volume of water to what local cooks would use [VITA, 1985].
5. One of the original participants in the development of VITA's tests notes that the original testing procedures were published in 1983 and revised in 1985. The latter version was intended to be a more definitive report, but there was disagreement among the contributors over some definitions of thermal efficiency and fuel consumption [Dutt, 2007]. See Note 11 for more details.
6. For example, much of the research on stove emissions relies on a version of the WBT to simulate the cooking process while measurements are taken. This also allows researchers to determine the stove's efficiency, which may then be used to normalize emission factors with respect to energy "delivered" to the cooking pot [Joshi et al., 1989; Ballard-Trameer and Jawurek, 1996; McCracken and Smith, 1998; Smith et al., 2000; Zhang et al., 2000; Bhattacharya et al., 2002].
7. One indication of the relative popularity of the WBT relative to the other tests is the frequency with which it is cited in published literature. A search of two common publication databases revealed that the WBT is cited with much greater frequency than either the CGT or the KPT. For example, in Science Direct ([www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)) a search for "water boiling test" returned 7 distinct articles related to ICSS, while a search for "controlled cooking test" and "kitchen performance test" returned only two and one articles respectively. Similarly, a search on Google Scholar ([scholar.google.com](http://scholar.google.com)) for "VITA and "water boiling test" returned 17 distinct hits while searches for either "VITA and "controlled cooking test" or "VITA and "kitchen performance test" each returned only four distinct hits (searches were conducted on December 7, 2006).
8. Thermal efficiency requires initial knowledge of the calorific value of the fuel. This was estimated by measuring the moisture content with an electronic probe and estimating the effective calorific value by subtracting the energy required to evaporate the moisture from bone-dry wood. The calorific value of the bone-dry wood was taken from one of three sources, which give values for a wide range of species as well as average soft- and hard-woods [Cheremisinoff, 1980; NAS, 1980; Harker et al., 1982].
9. Historically stove performance tests have often had minor variations between groups, which has made comparisons difficult. Hence, standardizing the protocols was an additional motivation for this work, which could be adopted by the SF projects and, possibly, the greater community of ICS developers.
10. Protocols for each stove test, including a list of equipment included in the kits, are available online through the website of the Center for Entrepreneurship in International Health and Development (CEIHD). See [http://ceihd.berkeley.edu/heh\\_stove\\_perf\\_eval.htm](http://ceihd.berkeley.edu/heh_stove_perf_eval.htm).
11. Here, Baldwin broke from the 1985 VITA standard tests. In their 1985 version, VITA defined specific consumption in terms of steam evaporated, while Baldwin favored the water remaining in the pot. As noted above, this had been agreed to by the contributors to the initial VITA publication [VITA, 1982]. Disagreement arises because in determining

the energy balance of the cooking process the steam produced during the cooking task can be considered work that is extracted from the burning fuel. When added to the efficiency calculation, it raises the stove's performance. From the cook's point of view, however, the steam performs no useful work, and excess steam production should be avoided. As an appendix to the VITA publication notes, "a stove that is regulated to maintain simmering temperature with the least production of steam is, in that respect, most efficient" [VITA, 1985, p. 41].

12. This analysis utilizes a temperature-corrected specific consumption (SC) in order to control for variations in the initial water temperature.

$$\text{Temperature corrected SC} = \frac{\text{Dry weight of fuel consumed} + \text{Reference change in water temperature}}{\text{Volume of water boiled} + \text{Actual change in water temperature}}$$

The reference change is defined as 75° C – the difference between "average" room temperature of 25° C and the boiling point of 100° C (see the discussion in [Baldwin, 1986]).

In multiple-pot stoves, the water heated in secondary pots, which does not come to a boil, is included in the denominator of the ratio. However, its volume is scaled down according to the difference between the final temperature of the water and the boiling point, as in the equation below:

$$SC_{\text{multiple}} = \frac{\text{fuel consumed}}{\sum_{j=1}^n \left[ (\text{water heated in pot } 'j') * \left( \frac{\text{Temperature change in pot } 'j'}{\text{Temperature change to reach boiling}} \right) \right]}$$

13. Thermal efficiency ( $\eta$ ) is defined as:

$$\eta = \frac{[4.186 * (\text{mass of water boiled}) * (\text{change in water temperature})] - (2,260 * \text{quantity of water evaporated})}{\text{mass of fuel consumed} * \text{LHV}}$$

The numerator in this equation is the sum of two quantities: (1) the energy required to heat water from room temperature to the boiling point, defined as the product of the mass of water, the change in temperature, and the specific heat of water (4.186 J/g° C); and (2) the energy required to evaporate water from the pot, which is the product of the mass of evaporated water and the latent heat of evaporation of water (2,260 J/g at 100° C). The denominator (bottom of the ratio) is determined by taking the product of the dry-wood equivalent consumed during this phase of the test and the lower heating value (LHV).

14. Here we use the terms efficacy and effectiveness as described in [Smith et al., 2007] in this issue.
15. Protocols for each stove test are available online through the website of the Center for Entrepreneurship in International Health and Development (CEIHD). See [http://ceihd.berkeley.edu/heh\\_stove\\_perf\\_eval.htm](http://ceihd.berkeley.edu/heh_stove_perf_eval.htm).
16. The quantity of dung consumed was expressed in wood equivalent terms by multiplying the mass of dung by the ratio of each fuel's calorific value based on [Smith et al., 2000].
17. In total, ARTI measured one-day fuel consumption in 48 households spread across three communities. It also conducted seven three-day tests in a fourth community and four seven-day tests in three separate communities.
18. "p" refers to the probability that the measured difference occurred just by chance, i.e., does not represent a true difference. By convention, if the p-value of a comparison is less than 0.05 (5%), the difference is termed "significant".
19. A useful measure of the variation is the coefficient of variation defined as the standard deviation divided by the mean. See [Edwards, et al., 2007] in this issue.
20. Some significant improvements were observed in the simmering efficiency as well, but we have already explained that simmering efficiency is a potentially problematic metric in this test.
21. Both the 3-day and 7-day TCS results are confounded by selection bias and under-sampling. The increase observed in 3-day averages is not statistically significant either in terms of measurement-days or households. In addition, these results are drawn from a single community, whereas the other results are averaged over a mix of communities. The 7-day result is significant ( $p = 0.05$ ) in terms of measurement-days. However, it is derived from just four households, only one of which was tested with a TCS. With the outcome based on just one household's experience, it is impossible to generalize.
22.  $r^2$  is a statistical measure of the degree to which two measurements are correlated. In this case, it indicates that 83 % of the changes in the KPT results were predicted by the change in specific fuel consumption in the low-power simmer test.
23. For example, ARTI reported that many households in both the high- and low-rainfall regions stopped using the Laxmi stove after about 6 months. The region suffered a very heavy monsoon that year in both areas, causing the chimneys to leak and making the stoves damp. In some cases, the kitchen floor also became wet. Participants removed the stoves and reinstalled their traditional stoves. In some cases they also demanded compensation for the roof and reimbursement for the cost of the stoves. See [Dutta et al., 2007] in this issue.

### References

- Arnold, M., Köhlin, G., Persson, P., and Shepherd, G., 2003. *FueWood Revisited: What Has*

- Changed in the Last Decade?* 37, Center for International Forestry Research (CIFOR), Bogor, Indonesia.
- Baldwin, S.F., 1986. *Biomass Stoves: Engineering Design, Development, and Dissemination*, 287, Center for Energy and Environmental Studies, Princeton, NJ.
- Ballard-Trameer, G., and Jawurek, H., 1996. 'Comparison of five rural, wood-burning cooking devices: efficiencies and emissions', *Biomass and Bioenergy*, 11(5), pp. 419-30.
- Bernueta, V., Edwards, R.D., and Masera, O.R., 2007. 'Energy performance of woodburning cookstoves in Michoacán, Mexico', *Renewable Energy* (forthcoming).
- Bhattacharya, S.C., Albina, D.O., and Abdul Salam, P., 2002. 'Emission factors of wood and charcoal-fired cookstoves', *Biomass and Bioenergy*, 23(6), pp. 453-69.
- Cheremisinoff, N., 1980. 'Properties of wood', in *Wood for Energy Production*, Ann Arbor Science, Ann Arbor, MI, pp. 31-43.
- Dutt, G.S., 2007. Personal communication, April 28.
- Dutt, G.S., and Ravindranath, N.H., 1993. 'Bioenergy: direct applications in cooking', in Johansson, T.B., Kelly, H., Reddy, A.K.N., and Williams, R.H., (eds.), *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*, Island Press, Washington, DC, pp. 653-97.
- Dutta, K., Naumoff Shields, K., Edwards, R., and Smith, K.R., 2007. 'Impact of improved cookstoves on indoor air quality near Pune, India', *Energy for Sustainable Development*, XI(2) (this issue), pp. 19-32.
- Edwards, R., Hubbard, A., Khalakdina, A., Pennise, D., and Smith, K.R., 2007. 'Design considerations for field studies of changes in indoor air pollution due to improved stoves', *Energy for Sustainable Development*, XI(2) (this issue), pp. 71-81.
- Ezzati, M., and Kammen, D., 2002. 'Household energy, indoor air pollution, and health in developing countries: knowledge base for effective interventions', *Annual Review of Energy and the Environment*, 27, pp. 233-70.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 1993a. *Chinese Fuel-saving Stoves: a Compendium*, 57, Regional Wood Energy Development Program (RWEDP), Bangkok.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 1993b. *Indian Improved Cookstoves: A Compendium*, 109, Regional Wood Energy Development Program (RWEDP), Bangkok.
- Geist, H.J., and Lambin, E.F., 2002. 'Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation', *BioScience* 52(2), pp. 143-51.
- Harker, A.P., Sandels, A., and Burley, J., 1982. *Calorific Values for Wood and Bark and a Bibliography for Fuelwood*, 20, Tropical Products Institute, London.
- Joshi, V., Venkataraman, C., and Ahuja, D.R., 1989. 'Emissions from burning biofuels in metal cookstoves', *Environmental Management*, 13(6), pp. 763-72.
- Kishore, V.V.N., and Ramana, P.V., 2002. 'Improved cookstoves in rural India: how improved are they? A critique of the perceived benefits from the National Programme on Improved Chulhas (NPIC)', *Energy*, 27(1), pp. 47-63.
- Leach, G., and Meams, R., (eds.), 1988. *Beyond the Woodfuel Crisis: People, Land, and Trees in Africa*, Earthscan, London.
- Leach, M., and Meams, R., 1996. 'Environmental change and policy: challenging received wisdom in Africa', in Leach, M., and Meams, R., (eds.), *The Lie of the Land: Challenging Received Wisdom on the African Environment*, the International African Institute, London, p. 240.
- Lu, Y., *Fueling One Billion: An Insider's Story of Chinese Energy Policy Development*, Washington Institute Press, Washington, DC.
- Masera, O.R., Diaz, R., and Bernueta, V., 2005. 'From cookstoves to cooking systems: the integrated program on sustainable household energy use in Mexico', *Energy for Sustainable Development*, IX(1), pp. 25-36.
- McCracken, J., and Smith, K., 1998. 'Emissions and efficiency of improved woodburning cookstoves in highland Guatemala', *Environment International* 24(7), pp. 739-47.
- NAS (National Academy of Sciences), 1980. *Firewood Crops* (2 vols.), Vol. 1, National Academy of Sciences, Washington, DC.
- Sinton, J.E., Smith, K.R., Peabody, J.W., Liu Y., Zhang X., Edwards, R., and Gan Q., 2004. 'An assessment of programs to promote improved household stoves in China', *Energy for Sustainable Development*, VIII(3), pp. 33-52.
- Smith, K.R., Uma, R., Kishore, V.V.N., Lata, K., Joshi, V., Zhang, J., Rasmussen, R.A., and Khalil, M.A.K., 2000. *Greenhouse Gases from Small-Scale Combustion Devices in Developing Countries Phase IIa: Household Stoves in India*, 98, US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
- Smith, K.R., Dutta, K., Chengappa, C., Gusain, P.P.S., Masera, O., Bernueta, V., Edwards, R., Bailis, R., and Naumoff Shields, K., 2007. 'Monitoring and evaluation of improved biomass cookstove programs for indoor air quality and stove performance: conclusions from the Household Energy and Health Project', *Energy for Sustainable Development*, XI(2) (this issue), pp. 5-18.
- Smith, K.R., Gu S.H., Huang K., and Oiu D.X., 1993. 'One hundred million improved cookstoves in China: how was it done?' *World Development*, 21(6), pp. 941-61.
- Still, D., MacCarty, N., Ogle, D., Bond, T., and Bryden, M., *Comparing Cook Stoves*, compiled by the Aprovecho Research Center, published by the US Environmental Protection Agency (with funding from the Shell Foundation), Washington, DC, 2007.
- TERI (Tata Energy Research Institute), 1989. *Evaluation of Improved Stoves in Tamil Nadu, Rajasthan and West Bengal*, Tata Energy Research Institute reporting to the Department of Non-conventional Energy Sources, New Delhi.
- VITA (Volunteers in Technical Assistance), 1982. *Testing the Efficiency of Wood Burning Cookstoves: Provisional International Standards*, Volunteers in Technical Assistance, Mt. Rainier, Maryland, USA.
- VITA (Volunteers in Technical Assistance), 1985. *Testing the Efficiency of Wood-Burning Cookstoves: Provisional International Standards*, (2nd ed.), Volunteers in Technical Assistance, Arlington, VA, USA.
- Westhoff, B., and Germann, D., 1995. *Stove Images*, translated by Rigby, N., Apsel Verlag, Frankfurt.
- Zhang, J., Smith, K.R., Ma, Y., Ye, S., Jiang, F., Qi, W., Liu, P., Khalil, M.A.K., Rasmussen, R. A., and Thomeloe, S. A., 2000. 'Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a database for emission factors', *Atmospheric Environment*, 34, pp. 4537-49.

## Analysing Our Energy Future: some pointers for policy-makers

This report is a non-technical summary of the International Energy Agency's latest World Energy Outlook. It focuses on its Alternative Policy and Beyond the Alternative Policy Scenarios – a deliberate choice aimed to spur action by underscoring the impacts on the future of the policy decisions made today. It is written in non-technical language to make it accessible to as wide an audience as possible.

The report highlights that early moves to shift towards a more sustainable energy system are more effective and cheaper compared to delayed action. It outlines some policy approaches that can bring about this shift and the time scales involved in it, noting that a delay of 10 years in implementing the Alternative Policy Scenario, for example, would push back the date of being on a sustainable path by several decades. It concludes that there is no sensible reason – economic or otherwise – to delay implementation.

2007

24 pages

Languages: English and Spanish

ISBN: 978-92-807-2812-5

Available from <http://www.unep.fr/energy/publications/pdfs/energyfuture.pdf>.

# ANEXO 5

## Formatos y cuestionarios

**PRUEBA DE EBULLICIÓN DE AGUA, PEA (WATER BOILING TEST)**  
**HOJA DE DATOS**

**Información base**

Nombre(s)

Numero de prueba

Fecha

Modelo de estufa

Lugar

Especie de leña  Quercus Bicolor (White Oak) ▶▶

Condiciones de viento  Sin viento ▶▶

**Condiciones iniciales**

Datos	Valor	Unid	Datos	Valor	Unid
Temperatura del aire		°C	Peso del recipiente # 1 (gramos)		P1 g
Dimensiones promedio de la leña	46x2x3	cm x cm x cm	Peso del recipiente # 2 (gramos)		P2 g
Valor calorífico superior HHV (leña seca)	18,916	kJ/kg	Peso del recipiente # 3 (gramos)		P3 g
Valor calorífico inferior LHV (leña seca)	17,596	kJ/kg	Peso del recipiente # 4 (gramos)		P4 g
Contenido de humedad (base húmeda)	11%	%	Peso del contenedor de carbón (gramos)		k g
Valor calorífico efectivo	15,852	kJ/kg	Temperatura de ebullición local	93.5	T <sub>b</sub> °C

Descripción de la estufa y comentarios

**DATOS BÁSICOS**

	ALTO PODER (INICIO FRIO)		ALTO PODER (INICIO CALIENTE)		FUEGO LENTO	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Unid						
Tiempo	min					
Peso de la leña	g	$t_{cf}$	$t_{hf}$	$t_{sf}$	$t_{sf}$	$c_s$
Temp. del agua, recipiente # 1	°C	$f_{cf}$	$f_{hf}$	$f_{sf}$	$f_{sf}$	
Temp. del agua, recipiente # 2	°C	$T1_{cf}$	$T1_{hf}$	$T1_{sf}$	$T1_{sf}$	
Temp. del agua, recipiente # 3	°C	$T2_{cf}$	$T2_{hf}$			
Temp. del agua, recipiente # 4	°C	$T3_{cf}$	$T3_{hf}$			
Peso del recipiente # 1 con agua	g	$T4_{cf}$	$T4_{hf}$			
Peso del recipiente # 2 con agua	g	$P1_{cf}$	$P1_{hf}$	$P1_{sf}$	$P1_{sf}$	
Peso del recipiente # 3 con agua	g	$P2_{cf}$	$P2_{hf}$			
Peso del recipiente # 4 con agua	g	$P3_{cf}$	$P3_{hf}$			
Material para iniciar el fuego		$P4_{cf}$	$P4_{hf}$			
Peso del carbón (c/contenedor)	g	$c_c$	$c_h$			

*T1<sub>sf</sub> debería ser igual a T<sub>1</sub>, porque la fase de fuego lento inicia cuando el agua llega a temp. de ebullición*

*P1<sub>sf</sub> debe ser el peso del agua una vez que ha llegado a temperatura de ebullición.*

	INICIO FRIO		INICALIENTE		FUEGO LENTO	
	Unid	Valor	Unid	Valor	Unid	Valor
<b>Resultados</b>						
Leña consumida (húmeda)	g	$f_{cm}$	$f_{hm}$		$f_{sm}$	
Carbón remanente	g	$Dc_c$	$Dc_h$		$Dc_s$	
Equivalente de leña seca	g	$f_{cd}$	$f_{hd}$		$f_{sd}$	
Vapor de agua producido	g	$w_{cv}$	$w_{hv}$		$w_{sv}$	
Masa efectiva de agua hervida	g	$w_{cr}$	$w_{hr}$		$w_{sr}$	
Tiempo p/ebullición, recipiente # 1	min	$Dt_c$	$Dt_h$		$Dt_s$	
Eficiencia térmica	--	0%	$h_c$	0%	$h_s$	
Velocidad de quemado	g/min	$r_{cb}$	$r_{hb}$		$r_{sb}$	
Consumo específico de combust.	g/liter	$SC_c$	$SC_h$		$SC_s$	
Correc. por temp CEC	g/liter	$SC^T_c$	$SC^T_h$		$FP_s$	
Potencia (firepower)	watts	$FP_c$	$FP_h$		TDR	

**PRUEBAS: INICIO EN FRIO, INICIO CALIENTE, FUEGO LENTO**

PRUEBA DE COCINADO CONTROLADO

Descripción de la estufa: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_

Temperatura de ebullición local	<input type="text"/>	°C	Dimensiones promedio de la leña	<input type="text"/>	cm
Temperatura del aire	<input type="text"/>	°C	Contenido de humedad (base húmeda)	<input type="text"/>	%
Peso de la olla # 1	<input type="text"/>	g	Especie de leña	<input type="text"/>	
Peso del contenedor de carbón	<input type="text"/>	g			

Descripción de la tarea de cocinado

**Ingredientes**

Ingrediente	grs
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
<b>TOTAL</b>	_____

**Preparación (pasos)**

1	_____
2	_____
3	_____
4	_____
5	_____

Peso de la leña	inicial <input type="text"/>	final <input type="text"/>	g
Peso del material para iniciar el fuego	<input type="text"/>		g
Peso del carbón y el contenedor	<input type="text"/>	<input type="text"/>	g
Peso de la Olla # 1 con Alimento	<input type="text"/>	<input type="text"/>	g
Tiempo	<input type="text"/>	<input type="text"/>	min

**Cocinado de alimentos**

Tiempo (min)	Colocación de tortillas	
	1ra	2da
_____	_____	_____
Temperatura (°C) en el centro del comal	_____	_____





MEJORAMIENTO DEL NIVEL DE VIDA DE LOS HOGARES RURALES,  
MEDIANTE EL USO SUSTENTABLE DE LA LEÑA



CUESTIONARIO DE FUNCIONAMIENTO DE ESTUFAS

<b>Municipio</b>	<b>Localidad</b>	<b>Folio de vivienda</b>	<b>Folio PFC</b>
<b>Nombre de la entrevistada</b>		<b>Domicilio</b>	
<b>Fecha</b>			<b>Encuestador</b>

TECNOLOGIA PARA COCINAR

Tipos de fogones/estufas presentes en la casa	GAS	LEÑA			
		3 P	U Elevado	U al ras	PATSARI
TPC 1. Antigüedad (años)					
TPC 2. ¿Cada cuánto la utiliza?					
Diario.....	1				
2-3 veces por semana.....	2				
1 vez por semana o menos...3					
Nunca.....	0				
TPC 3. Si alguna respuesta es NUNCA, preguntar ¿por qué?					

**A OBSERVAR POR EL ENCUESTADOR (sólo para usuarias Patsari)**

**Apariencia de la PATSARI, verificar si fue utilizada recientemente**

TPC 4. Está la estufa caliente al tacto	NO.....0 SI.....1	
TPC 5. Hay ceniza o brasas en el interior	NO.....0 SI.....1	
TPC 6. Hay hollín alrededor de la cámara de combustión (sólo si es posible quitar el comal)	NO.....0 SI.....1	
TCP 7. Ubicación de la estufa Patsari	En la cocina principal.....1 En otro lugar aparte.....2 Fuera de la casa (patio).....3	
TCP 8. Que tipo de leña que utiliza normalmente	Encino.....1 Pino.....2 Ramas.....3 Residuos de carpintería.....4 Otro.....5	
TPC 9. Dimensiones aproximadas (cm x cm x cm)	_____	
TCP 10. Tiene algún terminado la estufa Patsari	NO.....0 SI.....1	
TCP 11. Cuál? (aplanado, pintura, azulejo, otro)	_____	
TCP 12. Tiene cuarteaduras	NO.....0 SI.....1	
TCP 13. Esta sucia o manchada por humo	NO.....0 SI.....1	
TCP 14. Se le ha dado mantenimiento constante	NO.....0 SI.....1	

**USOS DE LAS ESTUFAS (A preguntar a la usuaria)**

PRINCIPALES USOS	Tradicional	Patsari	Gas	
UDE 1. Cocinar o preparar alimentos				En 1er lugar.....1 En 2do lugar.....2 En 3er lugar.....3
UDE 2. Calentar alimentos				
UDE 3. Hacer tortillas				
UDE 4. Hervir agua para beber				
UDE 5. Calentar agua para bañarse				
UDE 6. Para calentar la vivienda (calefacción)				
UDE 6. Preparar alimentos para venta				
UDE 8. Otros _____				

**Sólo para usuarias Patsari**

UDE 8. ¿Qué tipo de alimentos puede cocinar en la Patsari? (marcar con X)	<table border="1"> <tr> <td>Todos</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Carnes</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Tortillas</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Verduras</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Nixtamal</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Sopas</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Frijoles</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Otros _____</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Freír</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </table>	Todos	<input type="checkbox"/>	Carnes	<input type="checkbox"/>	Tortillas	<input type="checkbox"/>	Verduras	<input type="checkbox"/>	Nixtamal	<input type="checkbox"/>	Sopas	<input type="checkbox"/>	Frijoles	<input type="checkbox"/>	Otros _____	<input type="checkbox"/>	Freír	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	UDE 9. ¿Qué alimentos NO puede cocinar en la Patsari? ¿Por qué?
Todos	<input type="checkbox"/>	Carnes	<input type="checkbox"/>																			
Tortillas	<input type="checkbox"/>	Verduras	<input type="checkbox"/>																			
Nixtamal	<input type="checkbox"/>	Sopas	<input type="checkbox"/>																			
Frijoles	<input type="checkbox"/>	Otros _____	<input type="checkbox"/>																			
Freír	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>																			
UDE 10. ¿Qué tipo de ollas utiliza en la Patsari? ¿utiliza tapas? (describir)		UDE 11. ¿Qué alimentos NO le gusta cocinar en la Patsari?																				

**Sólo para usuarias con estufa de gas**

UDE 12. ¿Qué tipo de alimentos puede cocinar en la estufa de gas? (marcar con X)	<table border="1"> <tr> <td>Todos</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Carnes</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Tortillas</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Verduras</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Nixtamal</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Sopas</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Frijoles</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Otros _____</td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Freír</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </table>	Todos	<input type="checkbox"/>	Carnes	<input type="checkbox"/>	Tortillas	<input type="checkbox"/>	Verduras	<input type="checkbox"/>	Nixtamal	<input type="checkbox"/>	Sopas	<input type="checkbox"/>	Frijoles	<input type="checkbox"/>	Otros _____	<input type="checkbox"/>	Freír	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	UDE 13. ¿Qué alimentos NO puede cocinar en la estufa de Gas? ¿Por qué?
Todos	<input type="checkbox"/>	Carnes	<input type="checkbox"/>																			
Tortillas	<input type="checkbox"/>	Verduras	<input type="checkbox"/>																			
Nixtamal	<input type="checkbox"/>	Sopas	<input type="checkbox"/>																			
Frijoles	<input type="checkbox"/>	Otros _____	<input type="checkbox"/>																			
Freír	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>																			
UDE 14. ¿Qué tipo de ollas utiliza en la estufa de Gas? ¿Utiliza tapas? ¿son los mismos que en la de leña? (describir)		UDE 15. ¿Qué alimentos NO le gusta cocinar en la estufa de gas?																				

**FUNCIONAMIENTO DE LA ESTUFA PATSARI**

	SI	NO	La Patsari es MEJOR, PEOR O IGUAL que el tradicional, ¿por qué?
FEP 1. Es difícil cocinar en la estufa			
FEP 2. Causa quemaduras			
FEP 3. Es difícil acomodar las ollas			

FEP 4. El humo tizna las ollas y la casa			
FEP 5. La estufa tarda en calentarse			
FEP 6. Es difícil de encender			
FEP 7. Es difícil mantener el fuego o se apaga			
FEP 8. El tamaño de leña le causa problemas			
FEP 9. La estufa no calienta la casa cuando hace frío			
FEP 10. La estufa necesita mucho mantenimiento			
FEP 11. La estufa se deteriora fácilmente			
FEP 12. Otros problemas (lístelos)			

#### CAMBIOS Y MANTENIMIENTO EN LA ESTUFA PATSARI

CMP 1. ¿Le han hecho algún arreglo a su estufa para que funcione bien?	Corrigieron la altura del comal .....1 Modificaron los túneles.....2 Corrigieron la entrada de leña.....3 La altura del chacuaco.....4 Modificaron las hornillas.....5 Otro _____	
CMP 2. ¿Ha hecho usted, algún cambio a su estufa?	Ninguno.....1 Otra entrada de leña.....2 Eliminó una hornilla.....3 Cambió el comal.....4 Amplió la entrada.....5 Amplió la cámara de combustión.....6 Eliminó los baffles.....7 Otro _____8	
CMP 3. ¿Qué hace para mantener bien su estufa?	Limpiar el chacuaco.....1 Limpiar los túneles.....2 Tapar las cuarteadoras .....3 Enjarrarla.....4 Otro _____	
CMP 4. ¿Cada cuánto tiempo limpia el chacuaco?	Todos los días.....1 Una vez por semana.....2 Una vez al mes.....3 Cuando regresa humo.....4	
CMP 5. ¿Cada cuánto tiempo limpia los túneles?	Todos los días.....1 Una vez por semana.....2 Una vez al mes.....3 Cuando regresa humo.....4	



MEJORAMIENTO DEL NIVEL DE VIDA DE LOS HOGARES RURALES,  
MEDIANTE EL USO SUSTENTABLE DE LA LEÑA



PREFERENCIAS

PRE 1. ¿Existe diferencia de sabor entre la comida que cocina/ba con su otro fogón y la comida que cocina con la Patsari?	NO.....0 SI.....1	
PRE 2. ¿Cuál le gusta más?	Patsari.....1 Fogón.....2 Igual.....3	
PRE 3. ¿Qué alimentos prefiere cocinar con el otro fogón y cuáles con la Patsari?	Con Patsari _____ _____ Con Fogón _____ _____	

PRE 4. En general, ¿existe diferencia de sabor entre la comida que cocina con leña y la comida cocinada con gas?	NO.....0 SI.....1	
PRE 5. ¿Cuál le gusta más?	Leña.....1 Gas.....2 Ambos igual.....3	
PRE 6. ¿Qué alimentos prefiere con leña y cuáles con gas?	Con Leña _____ Con Gas _____	

PRE 7. ¿Qué le gusta de su Patsari?	
PRE 8. ¿Qué NO le gusta de su Patsari?	
PRE 9. ¿Considera que se deben hacer cambios para que funcione mejor su Patsari? ¿Cuáles?	
PRE 10. ¿Qué le gusta de su estufa de gas?	
PRE 11. ¿Qué NO le gusta de su estufa de gas?	
PRE 12. ¿Qué le gusta de su fogón tradicional?	
PRE 13. ¿Qué NO le gusta de su fogón tradicional?	

Comentarios del encuestador:



## HOJA DE RECOPIACION DE DATOS PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DE COCINA



<b>Municipio</b>	<b>Localidad</b>	<b>Folio de vivienda</b>		<b>Tipo de tecnología</b>
				Fogón <input type="checkbox"/> Patsari <input type="checkbox"/> Gas <input type="checkbox"/>
<b>Fecha de inicio</b>	<b>Fecha de término</b>	<b>Encuestador</b>		<b>Etapa del monitoreo</b>
				Inicial <input type="checkbox"/> 1ra. <input type="checkbox"/> 2da. <input type="checkbox"/> 3ra. <input type="checkbox"/>

### NÚMERO DE PERSONAS QUE COMIERON EN LA CASA

Día de la semana		Niños 0 - 14	Mujeres más de 14	Hombres 15 - 59	Hombres más de 59	Hora	Comentarios
Día 0:							
Día 1:	Del 0 al 1						
Día 2:	Del 1 al 2						
Día 3:	Del 2 al 3						
Día 4:	Del 3 al 4						
Día 5:	Del 4 al 5						
Día 6:	Del 5 al 6						
Día 7:	Del 6 al 7						

### CONDICIONES DE CADA TIPO DE LEÑA AL INICIO Y AL FINAL DE LOS 7 DIAS

ESPECIES (Tipo de leña)	CONDICIONES DEL COMBUSTIBLE		% HUMEDAD	PARTE DEL ÁRBOL			¿SE CORTÓ?	
	SECO	HÚMEDO		Tronco	Ramas	Residuos	VIVO	MUERTO
1.	SECO	HÚMEDO		Tronco	Ramas	Residuos	VIVO	MUERTO
2.	SECO	HÚMEDO		Tronco	Ramas	Residuos	VIVO	MUERTO
3.	SECO	HÚMEDO		Tronco	Ramas	Residuos	VIVO	MUERTO
4.	SECO	HÚMEDO		Tronco	Ramas	Residuos	VIVO	MUERTO
5.	SECO	HÚMEDO		Tronco	Ramas	Residuos	VIVO	MUERTO

### MEDICIÓN DE GAS

PESO GAS INICIAL (kg)	PESO GAS FINAL (kg)	TIEMPO PROMEDIO UTILIZADO EN EL DÍA (Horas)	CONSUMO FAMILIAR	Anotar si calentaron agua para bañarse con gas o si prepararon algún tipo especial de alimento

## HOJA DE RECOPIACION DE DATOS PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DE COCINA

### CONSUMO DE LEÑA POR DIA

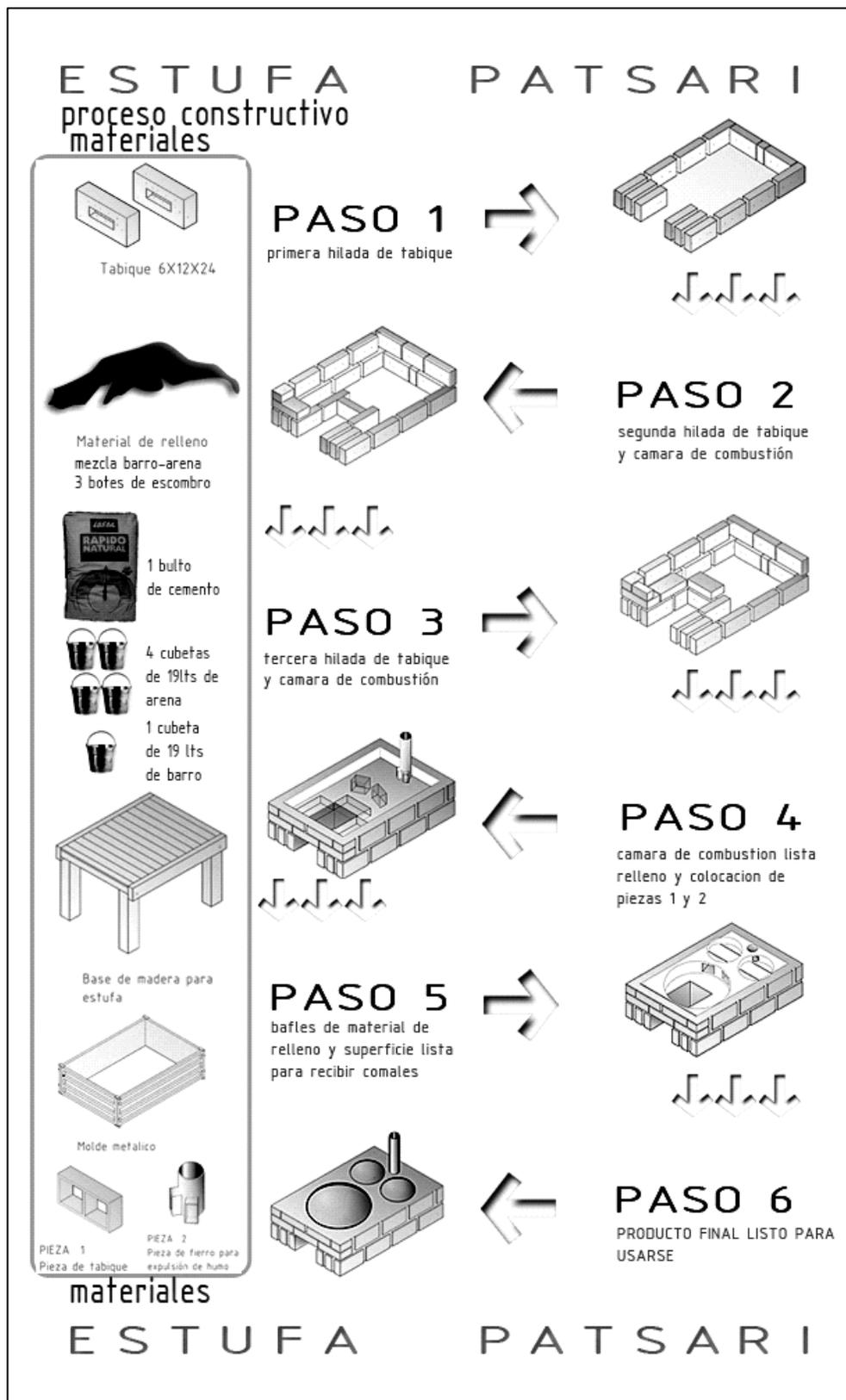
DÍA	ESPECIE (Tipo de leña)	LEÑA INICIAL (kg)	LEÑOS INICIALES	LEÑA FINAL (kg)	LEÑOS FINALES	CONSUMO FAMILIAR	Anotar si calentaron agua para bañarse o prepararon algún alimento especial
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							

Comentarios del encuestador:

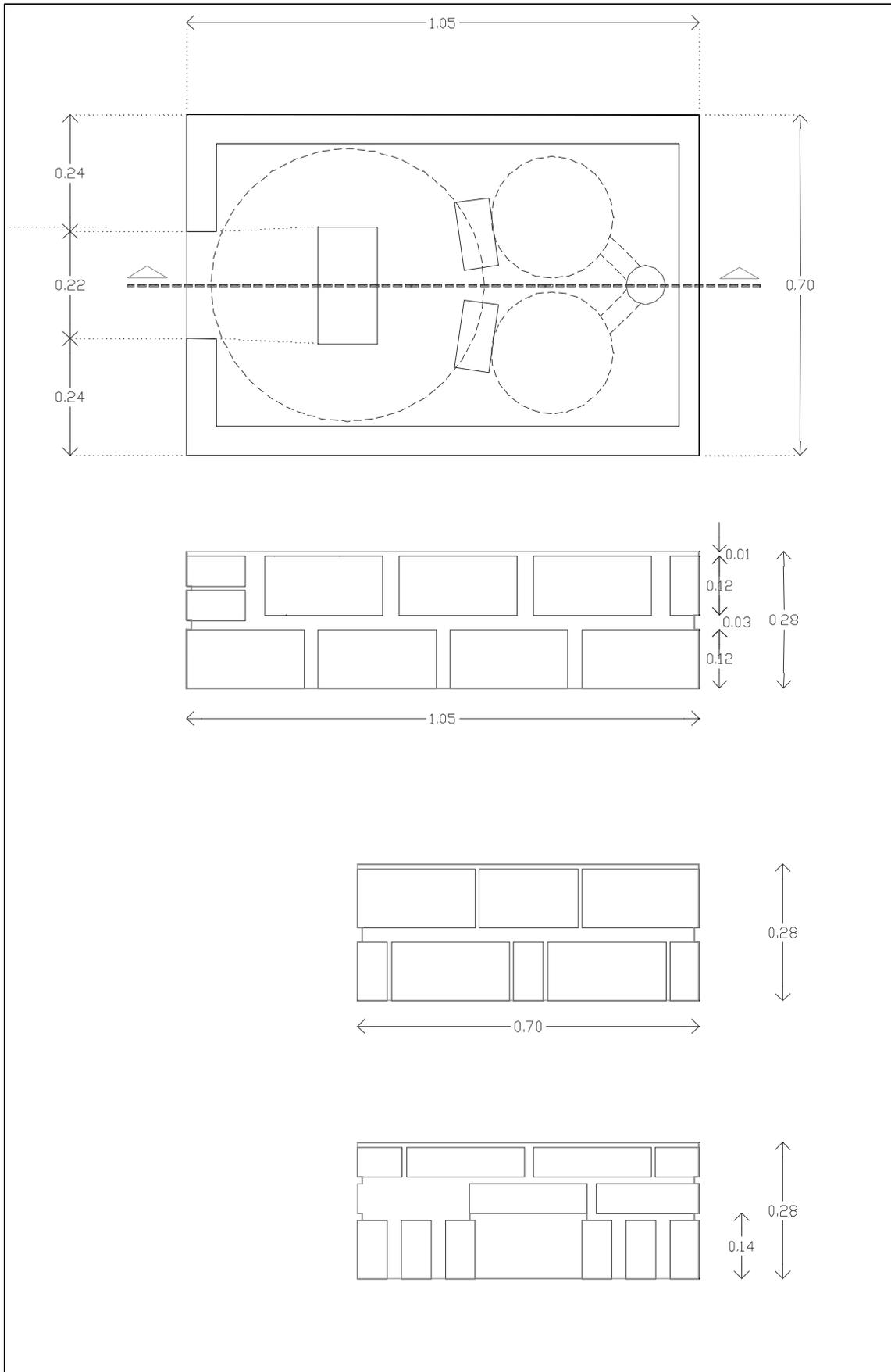
# ANEXO 6

## Diagramas y planos de la estufa Patsari Jimbani

### a) Proceso constructivo



b) Vistas lateral, frontal y de planta



## REFERENCIAS

- Almeida R.S. 1990. "Análisis Calorimétrico de Cinco Especies Vegetales que se Utilizan como Leña." Universidad Nacional Autónoma de México.
- Arias, T y V Cervantes. 1994. Las estufas de barro ahorradoras de leña ¿Una tecnología apropiada para la región de la Montaña de Guerrero?, PAIR-UNAM, México.
- Armendáriz, C., Edwards R.D., Johnson M., Zuk, M., Rojas-Bracho, L., Serrano, P., Riojas-Rodríguez, H., and Masera O. 2007. "Reductions in personal exposures and indoor concentrations of PM and CO in rural Mexico as a result of the installation of a Patsari improved cookstove". Indoor Air (submitted).
- Bailis R, V Berrueta, Ch Chengappa, K Dutt, R Edwards, O Masera, D Still and K Smith. 2007. "Performance Testing as a Tool to Monitor Improved Stove Interventions: Experiences of the Shell Foundation's Household Energy and Health Project" Energy for Sustainable Development, 11:2 pp 57-70
- Baldwin, S. F., 1986. Biomass Stoves: Engineering Design, Development, and Dissemination. Princeton, NJ, Center for Energy and Environmental Studies: 287.
- Barnes D, F Douglas, y L Qian. 1992. Urban Interfuel Substitution, Energy Use, and Equity in Developing Countries: Some Preliminary Results, Energy Series Paper No.53. The World Bank , Washington, D.C.
- Bryden M, D Still, P Scott, G Hoffa, D Ogle, R Bailis and K Goyer. 2005. Design Principles for Wood Burning Cook Stoves. Aprovecho Research Center, Shell Foundation and Partnership for Clean Indoor Air, EPA, USA.
- Berrueta V, R Edwards and O Masera. 2007. "Energy performance of woodburning cookstoves in Michoacan, Mexico", Renewable Energy, in press.
- Bhattacharya, S.C. y P. Abdul Salam, 2002. Low Greenhouse Gas Biomass Options for Cooking in the Developing Countries. Biomass and Bioenergy, 22: 305-317.
- Bruce, N., Perez-Padilla, R., and Albalak, R., 2000. "Indoor air pollution in developing countries: a major environmental and public health challenge for the new millenium, Bulletin of the World Health Organization, 78(9), pp. 1078-1092.
- Cayetano H. 1997. Curso taller de promoción y construcción de estufas rurales en la comunidad de Santa Cecilia Lalana, Oax., ASETECO, Oaxaca, Oax.
- Charless J., 1994. Energía Renovable, Guía de alternativas ecológicas. México: Edamex.
- Camps, M y F. Marcos, 2002. Los Biocombustibles. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España
- Díaz-Jiménez, R. 2000. Consumo de leña en el sector residencial de México. Evolución histórica y emisiones de CO<sub>2</sub>, Tesis Maestría en Ingeniería (energética), División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, p. 113, México, D. F.
- Díaz-Jiménez, R. y O Masera. 2001a. Estufas eficientes de leña. Metodología para planear y ejecutar programas de difusión y monitoreo. GIRA, A.C. Pátzcuaro, Michoacán.
- Díaz-Jiménez, R. y O Masera. 2001b. La estufa eficiente de leña. Diseño y funcionamiento. Documento de trabajo No 35, Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada A. C., Pátzcuaro Mich.
- Díaz-Jiménez, R y O Masera. 2003. Uso de la leña en México: situación actual, retos y oportunidades. Balance Nacional de Energía. Secretaría de Energía, México D.F. pp. 99-109.
- Dutt, G. y J. Navia. 1987. "La combustión de biomasa y la estufa mejorada". Documento de trabajo No. 6, Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, A.C. Pátzcuaro Michoacán.
- Dutt, G., J Navia, y C. Sheinbaum. 1989. "Cheranátzicurin: tecnología apropiada para cocinar con leña". Ciencias, No. 15, pp. 43-47.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 1983. Wood fuel surveys. Rome, UN Food and Agriculture Organization.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 993. Improved solid biomass burning cookstoves; A development manual. Regional Wood Energy Development Programme in Asia GCP/RAS/154/NET, Field Document No. 44, Bangkok, Thailand.

- Frausto, L. J. M., FAO, y SARH. 1991. "La leña para producción de energía: información sintética. Cinco estudios de caso sobre el uso de dendroenergía en industrias rurales de México". Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile.
- Hall D.O., and House J.I. 1993. Biomass as a Modern Fuel. IEA Bioenergy Environmental Impact Seminar. Horta Nogueira, L. A., and Trossero M. A. 1998. Introducing WEIS: the FAO Wood Energy Information System. Biomass Energy: Data, Analysis and Trends.
- Horta, L. A., and Trossero M. A. 1998. Introducing WEIS: the FAO Wood Energy Information System. Biomass Energy: Data, Analysis and Trends.
- Johnson, M.J., Edwards, R.D., Allatorre, F.C., and Masera, O., 2007. "In field emissions of air pollution and greenhouse gases from cookstoves in rural Mexican households", Atmospheric Environment (submitted).
- Leach, G., and M. Gowen. 1989. Manual de referencia sobre el sector energético residencial. Washington, D.C., EE.UU.: Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/BANCO MUNDIAL.
- Limón F y V Berrueta. 2005. Dialogo de conocimientos. Interacciones por una innovación tecnológica. En: Actores y realidades en la Frontera Sur de Mexico. Angeles H, L Huicochea, A Saldívar y E Tuñón (coord). COESPO-Chiapas y El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur).
- Magallanes, A., 2006. Estudio de Percepciones sobre el Cambio de Vida a Partir del Uso de Estufas Mejoradas, internal report, GIRA, Pátzcuaro, Mexico, 35 pp.
- Mackay, H. 1997. Simbolismo y consume: para entender la tecnología como cultura. En: Innovación tecnológica y procesos culturales: Nuevas perspectivas teoricas. Santos, M J y Diaz, R (compiladores). UNAM-Fondo de Cultura Económica.
- Masera, O., 1993. Sustainable Fuelwood Use in Rural Mexico, Volume I: Current Patterns of Resource Use, LBL-34634 UC-000.
- . 1995. Socioeconomic and Environmental Implications of Fuel Wood Use Dynamics and Fuel Switching in Rural Mexico. University of California, Berkeley, California.
- . 1997. Uso y Conservación de Energía en el Sector Rural: El Caso de la Leña., Documento de Trabajo 21. Gira, A.C., Pátzcuaro, Mich..
- Masera, O y J Navia. 1997. "Fuel Switching or Multiple Cooking Fuels? Understanding Inter-Fuel Substitution Patterns in Rural Mexican Households". Biomass and Bioenergy, Vol 12, No. 5, pp. 347-361.
- Masera O., Navia J., Arias T., and Riegelhaupt E. 1997. "Proyecto: FAO/MEX/TCP/4553(A), "Dendroenergía para el Desarrollo Rural"." Patrones de Consumo de Leña en Tres Micro-regiones de México: Síntesis de Resultados, Pátzcuaro, Michoacán.
- Masera, O., B. Saatkamp y D. Kammen., 2000. "From Linear Fuel Switching to Multiple Cooking Strategies: A Critique and Alternative to the Energy Ladder Model". World Development, (28)12:2083-2103.
- Masera, O. R., R. Drigo and M. A. Trossero. 2003. Woodfuels Integrated Supply/Demand Overview Mapping (WISDOM): A methodological approach for assessing woodfuel sustainability and support wood energy planning. FAO Reports, Wood Energy Program, Forest Products Division, FAO, Rome, July.
- Masera, O., R. Diaz and V. Berrueta. 2005. "From cookstoves to cooking systems: The integrated program on sustainable household energy use in Mexico". Energy for Sustainable Development 9 1, pp 25-36.
- Masera O, E Edwards, C Armendariz, V Berrueta, M Johnson, L Bracho, H Riojas and K Smith. 2007. "Impact of "Patsari" improved cookstoves on Indoor Air Quality in Michoacan, Mexico". Energy for Sustainable Development 11:2, pp 45-56.
- Navia, J. 1992. Estufas mejoradas, programa de difusión en Cheran Atzicurin. Primera Reunión Internacional sobre energía y medio ambiente en el sector residencial mexicano. comp. J. Quintanilla.
- Nieto, M. (1999). Las Modalidades del aprendizaje tecnológico en las empresas. Revista Madri+d. España Núm 4:3
- Olguín, E. 1994. "Evaluación y optimización del uso de la leña a nivel familiar y de pequeñas industrias rurales". Instituto de Ecología, A.C. Jalapa, Veracruz.
- Organización Ribereña contra la Contaminación del Lago de Pátzcuaro (ORCA). 1989. "Estudio sobre el uso de leña en la región. ORCA. Pátzcuaro, Michoacán.

- Pinch, T. 1997. La construcción social de la tecnología: una revisión. En: Innovación tecnológica y procesos culturales: Nuevas perspectivas teóricas. Santos, M J y Díaz, R (compiladores). UNAM-Fondo de Cultura Económica.
- Red de Tecnologías Apropriadas (RETA). 2004. Memorias del Taller de Intercambio de experiencias sobre estufas ahorradoras de leña. San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México. 11pp.
- Riegelhaupt E. 1996., Proyecto: FAO/MEX/TCP/4553(A). Dendroenergía para el desarrollo rural. "Situación dendroenergética en México", FAO. México, D. F.
- Riojas, H., Romieu, I., Marron-Mares, T., Rodríguez-Dozal, S., and Masera, O., 2006. "Health impact assessment due the introduction of improved stoves in Michoacan, Mexico", International Conference, Paris, September 2-6, Conference Abstracts Supplement, Epidemiology, 17(6) Supplement, pp. S226-S227, November.
- Salado, J. 2002. Aprendizaje tecnológico en la cultura empresarial. Cultura, Estadística y Geografía, INEGI, México, Num 17 pp 73-78.
- Saatkamp, B D, O Masera, y D M Kammen. 1998. "Fuels, Stoves, and Indoor Air Pollution in Jaracuaro, Mexico". Boiling Point 40, pp 16-18.
- Secretaría de Energía (SENER), 2002. Balance Nacional de Energía, 2001. México D. F.
- Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal (SEMIP). 1988. "Energía rural en México". (10 volúmenes). México, D. F.
- Secretaría de Industria y Comercio (SIC). 1963. "VIII
- Sheinbaum, C. 1988. "Estudio termodinámico de una estufa doméstica de leña para uso rural". Tesis de Licenciatura en Física, Facultad de Ciencias, UNAM. México, D. F.
- Shell Foundation Household Energy and Health Projects (Shell). 2004 Stove Performance Testing Protocol. Shell Foundation, University of California, Berkeley and Aprovecho Research Institute.
- Smith, K. R. 2003. Indoor air pollution and acute respiratory infections. *Indian Pediatrics* 40(9):815-819.
- Smith, K. R. y S. Mehta. 2003. The burden of disease from indoor air pollution in developing countries: comparison of estimates. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 206(4-5):279-289.
- Still D, N MacCarty, D Ogle, T Bond and M Bryden. 2007. Comparing Cool Stoves. Aprovecho Reserarch Center, Shell Foundation, United States Environmental Protection Agency and Partnership for Clean Indoor Air
- Troncoso, K., Castillo A., Masera, O., and Merino, L., 2006. "Social perceptions about a technological innovation for fuelwood cooking: case study in rural Mexico", *Energy Policy* (in press).
- Trossero, M. 2002. Dendroenergía: perspectivas de futuro. *Unasyuva* 211:53:3-9.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 1997. Revisions to the National Ambient Air Quality Standards for Particles Matter. *Federal Register*, 62: 38651-38701.
- Vargas, F. 1990. Breve diagnóstico sobre el proyecto de estufas rurales en México. SARH. Mecanografiado. 8p.
- Villavicencio, D. (2006). "Trabajo, aprendizaje tecnológico e innovación". En: *Teorías Sociales y Estudios del Trabajo: Nuevos enfoques*. ANTHROPOS, UAM-I.
- VITA (1985). Testing the Efficiency of Wood-Burning Cookstoves: Provisional International Standards. Arlington, VA, Volunteers in Technical Assistance: 76.
- Wereko-Brobby Ch.Y., and Hagen E.B. 1996. *Biomass Conversion and Technology*. England: John Wiley & Sons.
- Zuk, M., Rojas Bracho, L., Blanco, S., Serrano, P., Cruz, J., Angeles, F., Tzintzun, G., Armendáriz Arnez, C., Edwards, R.D., Johnson, M.J., Riojas-Rodríguez, H., and Masera, O.R., 2006. "The impact of improved wood burning stoves on fine particulate matter concentrations in rural Mexican homes", *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, advance online publication, May 24, doi:10.1038/sj.jes.7500499.