



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

# LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Centro de Investigaciones en Ecosistemas  
UNAM, campus Morelia.

**EFFECTO DE LA HUMEDAD DE LA LEÑA EN  
EL FUNCIONAMIENTO Y LAS EMISIONES  
DE LA ESTUFA PATSARI.**

# T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

P R E S E N T A

Sandra Luz Malagón García

**DIRECTOR DE TESIS: Dr. Víctor Berrueta Soriano**

**MORELIA, MICHOACÁN**

**Diciembre 2010**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
Licenciatura en Ciencias Ambientales



**100** UNAM  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE MÉXICO  
1910 - 2010

**DR. ISIDRO ÁVILA MARTÍNEZ**  
**DIRECTOR GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR, UNAM**  
**PRESENTE.**

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico de la Licenciatura en Ciencias Ambientales, celebrada el día 1ro. de septiembre del 2010, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para el Examen Profesional de la alumna **Malagón García Sandra Luz** con número de cuenta **304094446** con la tesis titulada: **"Efecto de la humedad de la leña en el funcionamiento y las emisiones de la estufa Patsari"** bajo la dirección del Tutor.- **Dr. Víctor Manuel Berrueta Soriano.**

Presidente:	Dr. Omar Raúl Masera Cerutti
Vocal:	Dr. Adrián Ghilardi
Secretario:	Dr. Víctor Manuel Berrueta Soriano
Suplente:	Lic. Alejandra Elodia Straffon Díaz
Suplente:	Dra. Cynthia Armendáriz Arnez

Sin otro particular, quedo de usted.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Morelia, Michoacán a, 8 de diciembre del 2010.

Dr. Alejandro Casas Fernández  
Coordinador de la Licenciatura

**CAMPUS MORELIA**

Apartado Postal 27-3 (Sta. Ma. de Guido), 58090, Morelia, Michoacán Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, col. Ex-hacienda de San José de la Huerta 58190, Morelia, Michoacán, México Tel. (443)322.38.03 y (55) 5623.2803, fax. (443)322.27.19 y (55)5623.2719 [www.oikos.unam.mx](http://www.oikos.unam.mx)



## **AGRADECIMIENTOS**

A la licenciatura en Ciencias Ambientales y a todos los profesores.

A CONACYT par la beca de tesis de Licenciatura en la modalidad de estudiante de proyectos de investigación de fondos sectoriales en el periodo de julio 2009 a junio 2010.

Al Programa de Fortalecimiento de los Estudios de Licenciatura (PFEL) por la beca en el periodo de enero de 2007 a junio de 2009.

A los miembros del jurado de mi examen profesional, por su guía y valiosos comentarios.

Dr. Omar Raúl Masera Cerutti

Dr. Adrián Ghilardi

Dr. Víctor Manuel Berrueta Soriano

Lic. Alejandra Elodia Traffon Díaz

Dra. Cynthia Armendáriz Arnez

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia por todo su apoyo, principalmente a mis padres por siempre estar ahí.

A mis amigos, algunos cerca y otros no tanto, pero siempre presentes al menos en espíritu.

A mis asesor el Dr. Víctor Manuel Berrueta Soriano, gracias por tu paciencia y prácticos consejos durante todo este proceso.

Al Dr. Omar Masera, gracias por todo lo que me has permitido aprender de ti durante casi cuatro años desde que tuve el placer de tomar tu clase de energía y medio ambiente.

Al Ing. Enrique Riegelhaupt, ha sido un placer poder aprender de un maestro como tú, no solo en relación a la combustión de leña, sino en relación a la ética y a la vida.

A todo el equipo del laboratorio de bioenergía, fue un placer conocerlos y poder trabajar a su lado.

## **Efecto de la humedad de la leña en el funcionamiento y las emisiones de la estufa Patsari.**

Sandra Malagón, Cynthia Armendáriz, Omar Masera, Víctor Berrueta .  
Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia.  
Antigua carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. San José de La Huerta, CP. 58190, Morelia, Michoacán,  
México.

Teléfono: (55) 56232709, e-mail: [lmalagon@lca.unam.mx](mailto:lmalagon@lca.unam.mx), [vberrueta@oikos.unam.mx](mailto:vberrueta@oikos.unam.mx).

La humedad en la leña es un factor importante para el funcionamiento de las estufas eficientes ya que esta relacionada con la velocidad de transferencia de energía y las emisiones generadas por combustión.

En este estudio, se evalúa el efecto de diferentes condiciones de humedad de leña (6%, 15% y 25% en base húmeda), sobre: a) la emisión de CO<sub>2</sub>, CO y PM<sub>2.5</sub>, b) la velocidad de transferencia de energía y c) la cantidad de leña consumida. Usando la prueba de ebullición de agua, se realizaron tres réplicas por cada condición de humedad y se obtuvieron los factores de emisión para CO, CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> de acuerdo a una metodología desarrollada con base en el concepto de aire necesario para la combustión.

Los resultados indican que la leña con humedad intermedia de 15% ofrece los mejores resultados en velocidad de transferencia de energía y uso de combustible reduciendo hasta en un 66% la emisión de CO, 34 % la de CO<sub>2</sub> y 75% la de PM<sub>2.5</sub>.

Para efectos prácticos estos resultados replantean la recomendación más frecuente en las comunidades rurales, es decir, que la leña debe ser usada lo más seca posible. Además muestran que la humedad es un factor importante para el cálculo de emisiones por quema de biomasa, y por lo tanto las mediciones deben llevarse a cabo durante temporadas secas y temporada de lluvias.

Palabras clave: contenido de humedad, factores de emisión, estufa eficiente, uso de combustible, transferencia de energía.

### ***Abstract***

*Wood moisture is a critical factor for the energy performance of efficient stoves. According to Smith (1987), it is also determinant for the type of emissions produced during wood combustion. In this study, we evaluated the effect of wood moisture conditions of 6%, 15% and 25% (wet basis) on the emission CO<sub>2</sub>, CO and PM<sub>2.5</sub>, as well as on the energy transfer rate energy and fuel use of Patsari stoves. Three replicates for each moisture condition were applied, using a water boiling test. Emission factors for CO, CO<sub>2</sub> and PM<sub>2.5</sub> according to a methodology based on the concept of air required for combustion were obtained.*

*The results indicate that the wood with intermediate moisture of 15% is most suitable to be used, as it provides the best results regarding the operation of the stove like the wood at 6%, but reduce to 66% the CO emission, 34% CO<sub>2</sub> and 75% of PM<sub>2.5</sub>. For practical purposes, these results rethink the most common recommendation in the rural communities: i.e., that the wood should be used as dry as possible. Also, the results show that wood moisture is a very important factor for calculating emissions, and thus measurements should be conducted during both dry and wet seasons.*

*Keywords: moisture content, emission factors, efficient stoves, fuel use, energy transfer.*

## 1.- INTRODUCCIÓN

Actualmente, muchas áreas rurales de países en desarrollo, utilizan combustibles sólidos, principalmente madera y carbón vegetal, para cubrir necesidades básicas de cocinado, calefacción e iluminación (Naeher et al., 2007; Smith, 1993). En México existen aproximadamente 25 millones de usuarios de leña, de la cual el 80% es usada en hogares rurales (Díaz, 2008).

En México existen aproximadamente 25 millones de usuarios de leña, razón por la cual es importante estudiar el efecto de las condiciones del combustible en la combustión.

La leña es quemada normalmente en fogones abiertos, lo que representa un alto consumo de combustible, altas concentraciones de contaminación al interior de las cocinas con sus respectivos efectos a la salud, además de contribuir de manera negativa en el ciclo global de constituyentes atmosféricos, particularmente en el del carbón, ya que no todo el carbono emitido como CO y CO<sub>2</sub> es capturado nuevamente en los bosques, contribuyendo al cambio climático global (Smith, 1993).

La combustión de biomasa es un proceso complejo, el cual es afectado por diversos factores como la cantidad de aire disponible, la temperatura y el tipo y condiciones del combustible; particularmente la humedad, de acuerdo a Smith (1993), es determinante en la emisión de contaminantes durante la combustión de biomasa, así como en la capacidad del combustible para generar calor.

Cuando existen las condiciones ideales y se da una combustión completa los productos químicos son dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua. Si no existen las condiciones entonces se generan los productos incompletos de la combustión (PICs).

Los PICs son una compleja mezcla de partículas y gases, como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), partículas y compuestos orgánicos volátiles. Las emisiones de humo de leña incluyen esta variedad de compuestos en forma de partículas sólidas, compuestos líquidos y gaseosos (Smith, 1993; Zhang et al., 2007).

Entre los principales efectos de los sub-productos de interés en este estudio figuran los siguientes:

El CO<sub>2</sub> es el más importante gas de efecto invernadero asociado a actividades humanas, emitido principalmente por la quema de combustibles fósiles. En la combustión de leña, el balance de emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera es neutro<sup>1</sup> en caso de que la vegetación sea repuesta a la misma velocidad con la que se extrae. Sin embargo, ya que esta condición no siempre se cumple, es importante cuantificar las emisiones de CO<sub>2</sub> por quema de biomasa (Martínez & Fernández, 2004).

El CO es un PIC con efectos importantes a la salud en condiciones intramuros ya que la afinidad de la hemoglobina hacia éste es aproximadamente doscientas veces mayor en comparación con la del oxígeno (Smith, 2006; Zhang et al., 2007). Aunque su contribución como GEI no es directa, tiene importancia climatológica, ya que su cantidad afecta indirectamente la formación de otros GEI como CO<sub>2</sub>, metano y el ozono troposférico, por su interacción con radicales libres en la atmósfera (Martínez & Fernández, 2004).

Las partículas (PM), por su parte son buenos indicadores de los peligros a la salud por quema de biomasa ya que contienen muchos de los compuestos

---

<sup>1</sup> Es decir sustentable ya que la cantidad de carbono emitido es igual a la cantidad capturada por la vegetación.

químicos asociados a los riesgos de exposición al humo de leña (Smith, 2006). Las partículas con diámetro aerodinámico menor a  $2.5\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) son particularmente dañinas por su capacidad de penetrar y depositarse en las partes más profundas del sistema respiratorio (Reyna et al., 2003; Fullerton et al., 2008). Como consecuencia están relacionadas directamente con enfermedades crónicas y agudas del sistema respiratorio y cardiovascular (Naeher et al., 2007; Reyna et al., 2003).

Dada la complejidad de la combustión de biomasa y la importancia de los sub-productos de ésta a la salud y el ambiente, se han desarrollado tecnologías para mejorar la combustión y reducir sus impactos negativos.

El mejor ejemplo de ésta tecnología, son las estufas eficientes de leña que se han difundido a través de programas de desarrollo e implementación y pretenden ser una alternativa tecnológica que resuelva o contribuya a la resolución de problemas asociados con la quema irracional de biomasa, la contaminación intramuros, los efectos a la salud, el impacto de gases de efecto invernadero, el alto consumo de combustible, los problemas sociales asociados a la recolección del recurso, etc.

Para este estudio se utilizó la estufa Patsari, diseñada por GIRA, A.C en colaboración con el CIEco-UNAM, y la cual ha sido ampliamente distribuida por su eficiencia y aceptación dentro de las comunidades rurales en el marco del Proyecto Patsari (Maserá et al., 2005; Berrueta et al., 2008).

## 2.- OBJETIVOS Y METODOS

En base a la importancia de los sub-productos de la combustión y la relación de éstos con las condiciones del combustible, en este estudio se busca

comprobar que la humedad en la leña es un factor importante en la emisión de contaminantes y en el funcionamiento de una estufa eficiente de leña.

Se utilizó leña de encino en tres niveles de humedad 6%, 15% y 25% en base húmeda (BH) para determinar si existen diferencias en las emisiones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  y partículas mayores a  $2.5\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ). También se evaluó el funcionamiento de la estufa Patsari en los niveles de humedad mencionados utilizando como indicadores la velocidad de transferencia de energía y uso de combustible.

Para evaluar el rendimiento de la estufa, se utilizó el protocolo internacional para evaluación de estufas de leña de ebullición de agua (WBT, *Water Boiling Test*, por sus siglas en inglés), separando los resultados para cada una de sus fases: a) alto poder inicio frío, b) alto poder inicio caliente, c) bajo poder. Las cuales son descritas a detalle por Berrueta et al. (2008).

El procedimiento experimental consistió en el acondicionamiento de la leña para lograr los niveles de humedad deseados, la realización de las pruebas de funcionamiento de la estufa, la medición en porcentaje volumétrico de las concentraciones de  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$  y la captación de  $\text{PM}_{2.5}$  en la estufa Patsari y el análisis e interpretación de los datos obtenidos.

### 2.1.- Condiciones ambientales del experimento.

El experimento se realizó en la estufa Patsari ubicada dentro de la Unidad de Ecotecnologías del Centro de Investigaciones en Ecosistemas de la UNAM, en la ciudad de Morelia Michoacán con una altura de 1,921 msnm y una temperatura media ambiente de  $20^\circ\text{C}$ .



## 2.2.- Acondicionamiento de la leña.

El acondicionamiento de leña fue simulando las condiciones reales de la región purépecha de Michoacán. Se utilizó leña de encino, cortada con hacha de longitud de 25 cm, peso de 100 g y diámetro de 4 cm aproximadamente.

La leña fue guardada de manera especial para mantener los porcentajes de humedad 6, 15 y 25, dentro de bolsas plásticas. Antes de realizar cada fase de la prueba de ebullición de agua, se sacaron 3kg de leña y se tomó el contenido de humedad de la leña en base húmeda a una muestra aleatoria de 9 leños, con un higrómetro de contacto Timbermaster modelo BLD5601, con una precisión de 0.1 y un rango de medición de 6 a 99.9%.

El tiempo entre la medición del contenido de humedad y el uso de los leños no fue mayor a 40 minutos y los leños que no fueron utilizados se descartaron en las siguientes pruebas.

## 2.3.- Prueba de eficiencia de la estufa.

Se realizaron tres réplicas de la prueba de ebullición de agua (WBT) reportada en Berrueta (2008), para cada condición de humedad de leña: 6%,15% y 25% base húmeda. Cabe resaltar que se separaron los resultados de acuerdo a las tres fases de dicha prueba:

- Alto poder inicio frío: Inicia con la estufa fría, es decir, tiene más de 12 horas de haber sido apagada la última vez.
- Ato poder inicio caliente: Inicia inmediatamente después de la fase anterior con la estufa caliente.
- Bajo poder: Inicia con la estufa caliente.

El objetivo de las fases de alto poder es llevar, de manera rápida, el agua al punto de ebullición local. Mientras que

el objetivo de la fase de bajo poder es mantener el agua a  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  del punto de ebullición local.

De estos se obtuvieron los siguientes indicadores: eficiencia térmica, consumo de combustible y velocidad de transferencia de energía corregidos por temperatura de inicio del agua.

Las fórmulas para calcular los indicadores son las siguientes:

**Consumo de combustible en base húmeda ( $C_{bs}$ )** es la cantidad de madera que se utilizó para llevar el agua a su punto de ebullición, en base húmeda.

$$C_{bh} = C_f - C_i$$

$C_f$  = combustible final (g)

$C_i$  = combustible inicial (g)

**Velocidad de transferencia de energía ( $V_{te}$ )**. Expresada como el aumento de la temperatura por unidad de tiempo (Straffon, 2009).

$$V_{te} = \frac{T_f - T_i}{t_f}$$

$T_i$  = temperatura del agua antes de la prueba ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_f$  = temperatura del agua después de la prueba ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_f$  = duración de la prueba (min.)

## 2.4.- Medición de emisiones

### 2.4.1.- $\text{CO}$ y $\text{CO}_2$

Durante el desarrollo de la prueba de ebullición de agua –WBT- se midieron en tiempo real las concentraciones de  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$  en porcentaje volumétrico, con un analizador de flujo de gases marca Autologic Applus, el cual funciona mediante dispersión de luz infrarroja, de acuerdo a la técnica descrita por Johnson (2007).

El analizador de gases se conectó mediante un tubo de aluminio a la chimenea de la estufa, bombeando una muestra del humo y guardando las

concentraciones de CO y CO<sub>2</sub> segundo a segundo en un ordenador.

Cabe mencionar que la técnica de dispersión de luz infrarroja, utilizada en este estudio, arroja resultados que son menos precisos que los obtenidos mediante técnicas por cromatografía, sin embargo, permite obtener los resultados de manera más rápida y económica.

#### 2.4.2.- PM<sub>2.5</sub>

Para la medición de PM<sub>2.5</sub> se utilizaron filtros de cuarzo 37 mm, los cuales se colocaron en una bomba SKC universal, modelo 224- PCXR8, conectada a la chimenea con un tubo de aluminio y que con un flujo de 0.85 L/min extrajo muestras de humo durante cada fase.

Para cada prueba se utilizaron tres bombas SKC una en cada fase del WBT, y se ajustaron a un flujo de 0.85 L/min con un calibrador de flujo Defender 530.

Los filtros fueron acondicionados, antes y después de cada prueba, en una estufa de secado a 150 °C durante 24 horas, y fueron pesados en una balanza analítica con precisión de 0.1 mg. Para asegurar que la variación en el peso de los filtros fue debida a la incrustación de partículas, se utilizaron tres filtros testigo, en los cuales hubo una variación de peso máxima de 0.15 mg.

#### 2.4.3.- Metodología ANC para obtención de factores de emisión.

La metodología ANC -Aire Necesario para la Combustión- se desarrolló con el objetivo de obtener los factores de emisión (FE) de CO, CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub>, es decir los gramos de dichos contaminantes por kg de leña en base seca quemada. Esta metodología se basa en los datos obtenidos del analizador de flujo de gases y los filtros de cuarzo más el concepto de aire necesario para

la combustión descrito en Dalpasquale et al. (1991).

#### Para factores de emisión de CO y CO<sub>2</sub>:

El analizador de flujo de gases arroja las concentraciones de CO y CO<sub>2</sub> como porcentaje volumétrico (%Vol<sub>gas</sub>). Para obtener los FE el porcentaje volumétrico se multiplica por el volumen total de aire (Vol<sub>aire</sub>), la densidad del gas respectivo y se divide entre los kg de leña en base seca utilizados durante la prueba.

$$FE = \frac{\%Vol_{gas} \cdot Vol_{aire} \cdot \delta_{gas}}{Kg_{leña\ bs}}$$

$$Vol_{aire} = (Kg_{leña\ bh} \cdot ANC_{m^3kg^{-1}leña}) + ((Kg_{leña\ bh} \cdot ANC_{m^3kg^{-1}leña})/2))$$

$$\delta_{gas} = \frac{P \cdot Ma}{R \cdot T}$$

**Donde:**

**%Vol<sub>gas</sub>**= Porcentaje volumétrico de CO ó CO<sub>2</sub>

**Vol<sub>aire</sub>**= Volumen total de aire durante la prueba

**P**= presión dentro de la chimenea

**Ma**=Masa atómica

**R**= Constante universal de los gases

**T**= Temperatura

Cabe destacar que para calcular el volumen total de aire durante la prueba (Vol<sub>aire</sub>), es fundamental calcular el aire necesario durante la combustión el cual se basa en la composición química porcentual de la leña en función del contenido de humedad.

$$ANC = \frac{1.37931}{1+W} \cdot \left( \frac{X_c}{12} + \frac{X_{H2}}{4} + \frac{X_{O2}}{32} \right)$$

**W**=razón de humedad del aire

**Ve**=Volumen específico del aire (m<sup>3</sup>)

$X_C$  = %químico de carbono en la leña en función de la humedad

$X_{H_2}$  = %químico de hidrógeno molecular en la leña en función de la humedad

$X_{O_2}$  = %químico de oxígeno molecular en la leña en función de la humedad.

(Dalpasquale et al. 1991)

### Para factores de emisión de $PM_{2.5}$ :

Para calcular los FE de  $PM_{2.5}$  se también se utiliza el volumen total de aire durante la prueba, y los datos sobre  $PM_{2.5}$  son obtenidos de los pesos en gramos de los filtro de cuarzo.

$$FE_{particulas} = (P_f - P_i) \cdot \frac{Vol_{aire}}{B_f \cdot B_t}$$

$P_f$  = Peso final del filtro

$P_i$  = Peso inicial del filtro

$B_f$  = Flujo promedio de la bomba

$B_t$  = Tiempo de bombeo

### 3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Las diferencias significativas entre las pruebas realizadas se obtuvieron a través de una prueba ANOVA de una vía con una confianza del 95%. Mientras que las barras de error en los gráficos, representan una desviación estándar de la media de las tres replicas del experimento.

#### 3.1.- Efectos de la humedad en la emisión de $CO_2$ .

En la figura 1 podemos observar los FE para  $CO_2$ , en cada una de las fases de la prueba de ebullición de agua. En general, en las tres fases, es interesante ver una clara tendencia en forma de V, es decir que los valores más bajos de emisión de  $CO_2$  por kilogramo de leña quemada corresponden a la humedad de 15%. En la fase de alto poder inicio frío podemos observar diferencias en las tres condiciones. En la fase alto poder inicio caliente no hay diferencias en las emisiones de 15 y 6%, sin embargo, es en la fase de alto poder inicio caliente donde se ve el contraste de valores netos más claro, ya que la emisión más alta fue de 900g de  $CO_2$  por kilogramo de leña y la más baja fue de 600.

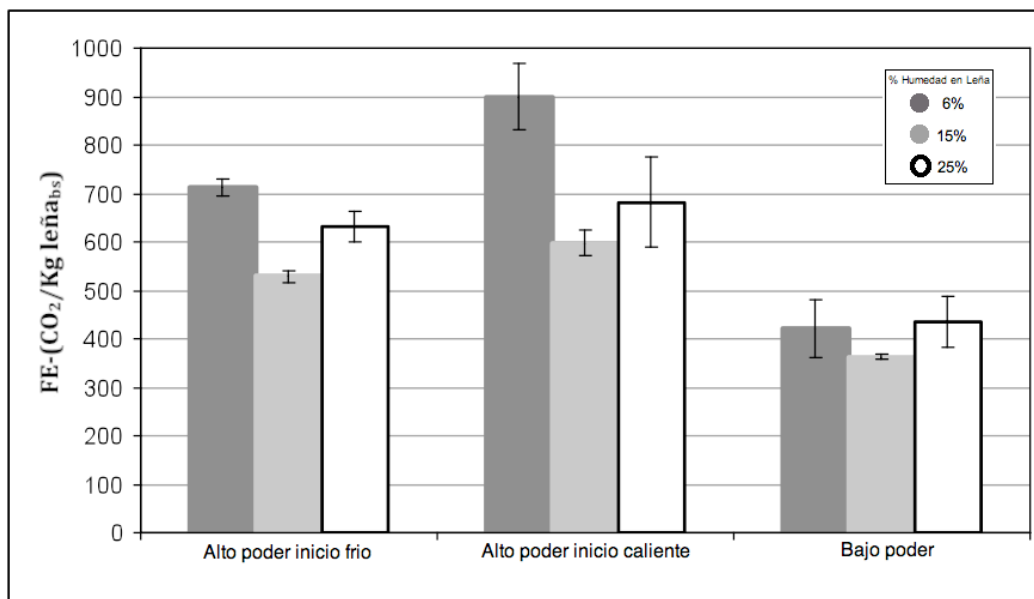


Figura 1. Factores de emisión de  $CO_2$ . Existe una clara tendencia en forma de V para las tres fases, es decir que los valores más bajos de emisión de  $CO_2$  son en leña al 15% de humedad.

### 3.2.- Efectos de la humedad en la emisión de CO.

Los resultados de CO son particularmente importantes para la contaminación intramuros y en la Figura 2 se aprecia la misma tendencia en V que para los FE de CO<sub>2</sub>, es decir que las emisiones más bajas son con leña al 15% de humedad. En las fases de alto poder existen diferencias en cada una de las condiciones, sin embargo, en la fase de bajo poder no hay diferencias entre las emisiones de leña al 6 y leña al 15% de humedad. El contraste más claro en la fase de alto poder inicio caliente, ya que los FE para leña al 6% son de 48, al 25% son de 29 y al 15% son de 16.

Cabe resaltar que la tendencia en los resultados obtenidos en las fases de alto poder concuerdan con los obtenidos por Yuntewi (2008) en una estufa Rocket, donde utilizaron valores de humedad de 5, 15 y 30%.

### 3.3.- Efectos de la humedad en la emisión de PM<sub>2.5</sub>.

Para PM<sub>2.5</sub> no se observan diferencias en las fases de alto poder inicio frío y bajo poder, sin embargo, la fase de alto poder inicio caliente, muestra consistencia con las tendencias de CO y CO<sub>2</sub>, donde las mayores concentraciones son emitidas por la leña al 6% de humedad y las menores por la leña al 15%, en valores netos la diferencia va en FE va de 2.9 a 0.7.

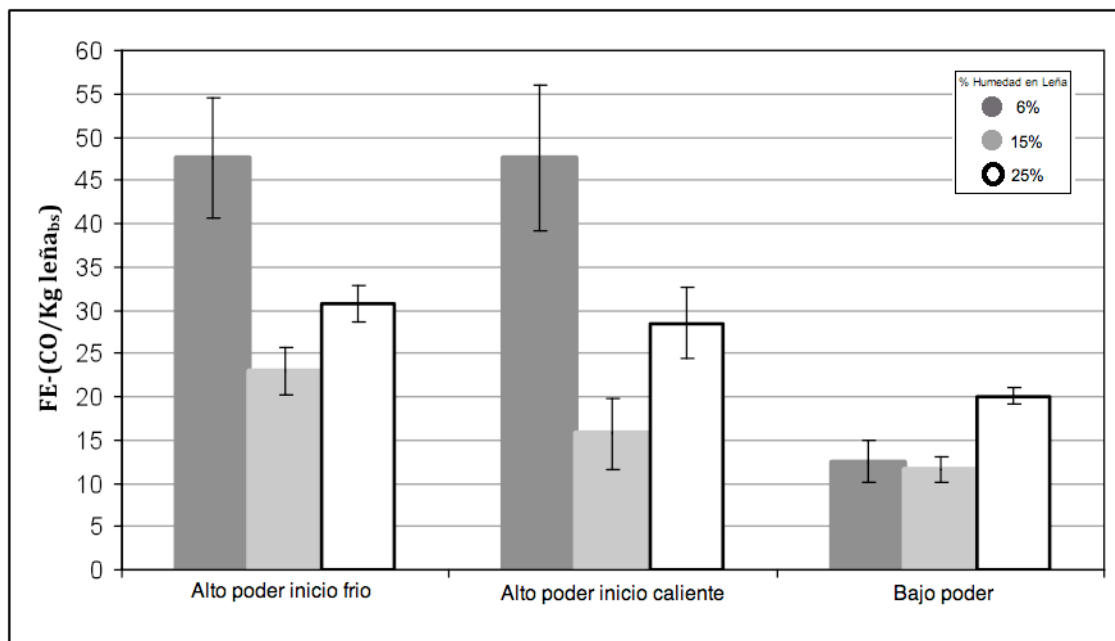


Figura 2. Factores de emisión de CO. La tendencia en los FE para CO muestra la misma forma en V que para CO<sub>2</sub>, donde las menores emisiones son para leña al 15% de humedad BH.

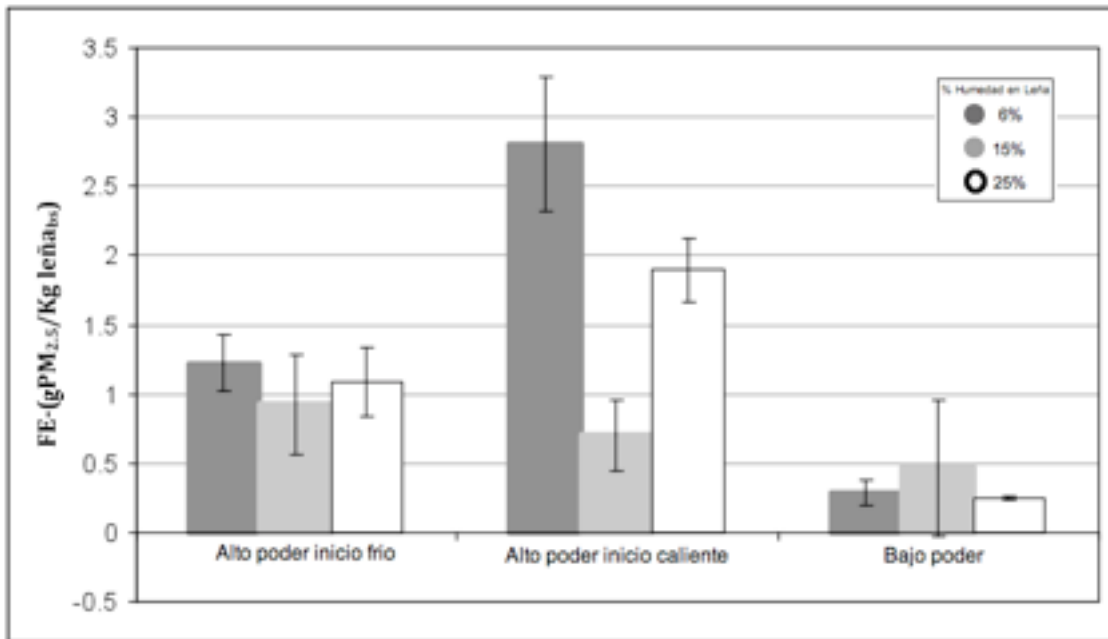


Figura 3. Factores de emisión PM<sub>2.5</sub>. No se observan diferencias en las fases de alto poder inicio frío y bajo poder, sin embargo, la fase de alto poder inicio caliente, muestra consistencia con mayores concentraciones son emitidas por la leña al 6% de humedad y las menores por la leña al 15%.

### 3.4.1.- Uso de combustible

El uso de combustible (Figura 4), contrario a lo que se podría esperar, presenta en las fases de alto poder inicio caliente y bajo poder la tendencia en V, pero en este caso los valores más altos son para leña al 30% en la que se consumieron hasta 3.9 Kg. en la fase

alto poder inicio frío en contraste al uso con leña al 6% donde sólo se consumieron 2 Kg.

Para las tres fases no existe diferencia entre las humedades 6 y 15%. Estos resultados coinciden en las fases de alto poder en lo reportado en Yuntewi (2008) para la estufa Rocket.

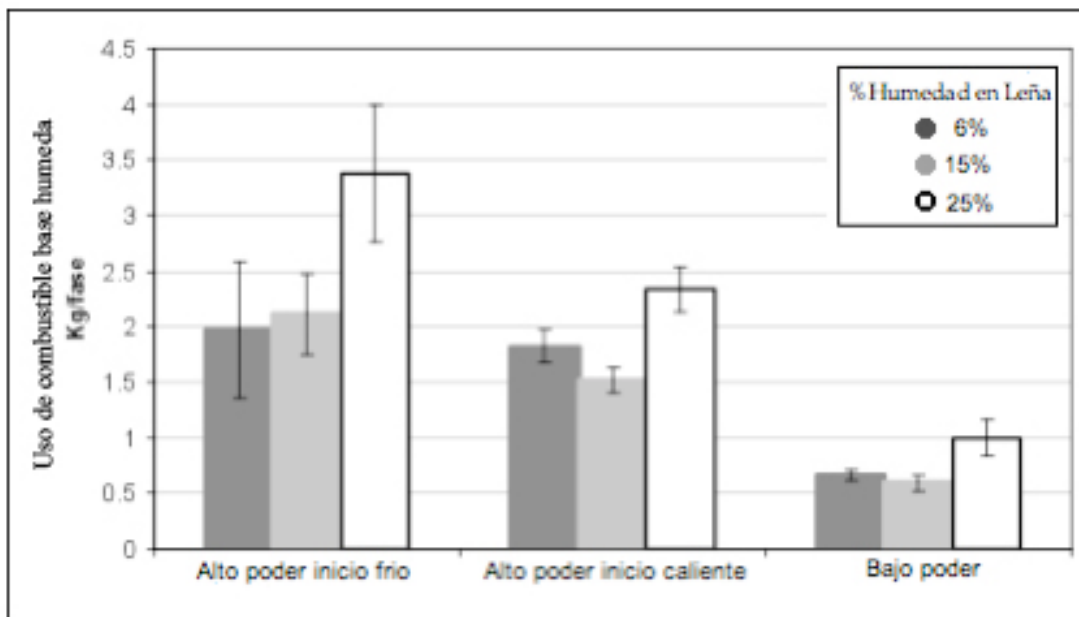


Figura 4. Uso de combustible base húmeda. Los valores más altos son para leña al 30% en la que se consumieron hasta 3.9 kg en la fase alto poder inicio frío en contraste al uso con leña al 6% donde sólo se consumieron 2 kg.

### 3.4.3.- Velocidad de transferencia de energía.

La velocidad de transferencia de energía, es una tasa de transferencia efectiva de calor hacia el alimento, es decir del calor disponible cuanto y en cuanto tiempo llega al alimento o en este caso agua (Straffon, 2009).

En este se reporta sólo para las fases de alto poder ya que por su naturaleza es imposible hacerla en la fase de bajo poder. En la Figura 5 se observa una clara tendencia descendente de la leña más seca al 6% con 2.6 °C/min hasta 1.6 °C/min para leña con 25% de humedad, el la fase de alto poder inicio caliente.

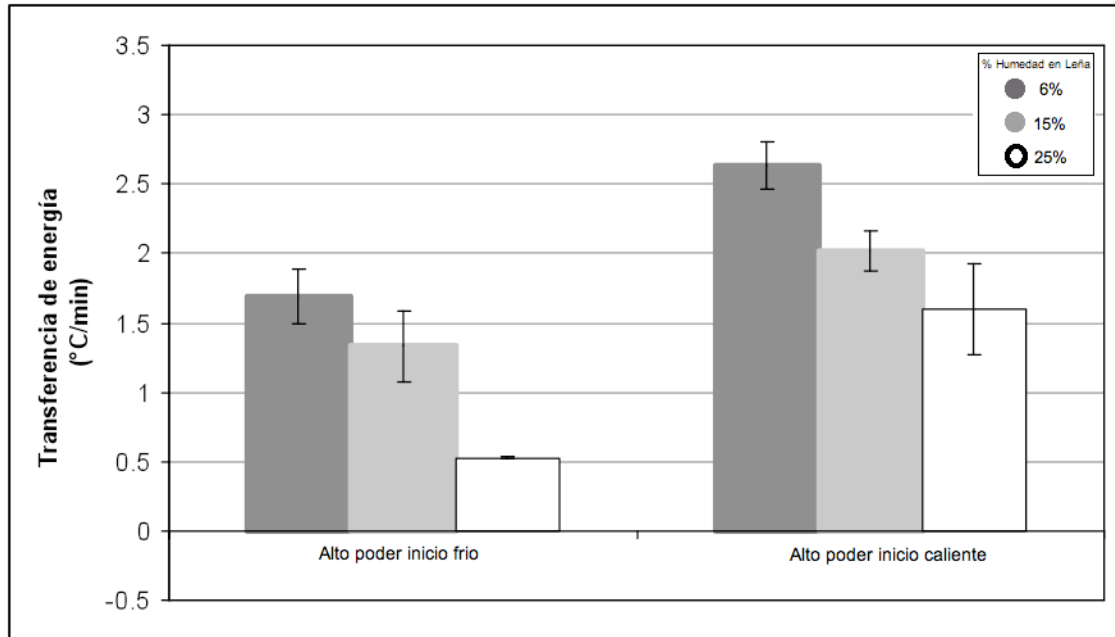


Figura 5. Velocidad de transferencia de energía. Se observa una clara tendencia descendente de la leña más seca al 6% con 2.6 °C/min hasta 1.6 °C/min para leña con 25% de humedad, el la fase de alto poder inicio caliente.

El patrón observado en los resultados de emisiones donde las menores concentraciones son emitidas por leña al 15% es explicado por las condiciones necesarias en las fases de la combustión descritas por Smith (1987), donde señala que es necesaria cierta cantidad de humedad disponible, ya que ésta evita que el calor penetre rápidamente en el combustible, evitando así la rápida liberación de compuestos volátiles durante la pirolisis.

Respecto al funcionamiento de la estufa los resultados también concuerdan con Smith (1987) quien expone que demasiada humedad disminuye la tasa

de aumento de temperatura en el combustible, resultando en que el combustible se queme más lentamente e importantes cantidades de energía sean utilizadas para evaporar agua del combustible, en vez de ser utilizados para calentar el producto de interés.

Es importante resaltar que para fines prácticos la condición ideal es aquella que mejora el funcionamiento de la estufa produciendo menores concentraciones de contaminantes, en este caso la leña al 15% de humedad es la más adecuada, ya que comparte los valores más altos de velocidad de transferencia de energía y bajo consumo

de combustible, con leña al 6% pero reduce significativamente la emisión CO, CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub>.

#### 4.- CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman los postulados teóricos descritos por Smith (1987), sin embargo, los estudios realizados sobre este tema son muy escasos, por lo que resulta importante investigar con mayor profundidad sobre el efecto de las condiciones del combustible, como el contenido de humedad, en la emisión de contaminantes y el funcionamiento de la estufa así como para el cálculo de emisiones por quema de biomasa.

Cabe destacar que de acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio se discute la recomendación para las comunidades rurales de secar la leña lo más que se pueda, ya que de acuerdo a observaciones en campo de GIRA A.C la leña guardada en cobertizos de lamina o bajo las estufas alcanza humedades hasta del 6%. Dado el aumento de las emisiones de contaminantes en leña tan seca, sin diferencias en tiempo de cocinado y ahorro de leña se sugiere utilizar leña con una cantidad intermedia de humedad.

#### Referencias

Berrueta, V. M., Edwards R. D., Masera, O. R., 2008. "Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico", *Renewable Energy*, 33: 859-870.

Dalpasquale, V. A., Marques, D. A., Sinicio, R., Olivera, D. 1991. *Secado de granos a altas temperaturas*. Santiago de Chile: Oficina regional de la FAO para America Latina y el Caribe.

Fullerton, D. G., Bruce, N., Gordona, S. B., 2008. "Indoor air pollution from biomass fuel smoke is a major health concern in the developing world" *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 102: 843-851.

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

Masera, O., Saatkamp, B. D., Kammen, D. M., 2000. "From Linear Fuel Switching to Multiple Cooking Strategies: A Critique and Alternative to the Energy Ladder Model", *World Development*, 28(12): 2083-2103.

Martínez, J. & A. Fernández (compiladores), 2004, *Cambio climático: una visión desde México*, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología. México.

Naeher, L. P., Brauer, M., Lipsett, M., Zelikoff, J.T., Simpson, C. D., Koenig, J. Q., Smith, K.R., 2007 "Woodsmoke Health Effects: A Review", *Inhalation Toxicology*, 19:67-106.

Reyna, C. MA, Quintero, N.M., Collins, K., Vildósola, R.L., 2003. "Análisis de la relación del PM10 con las enfermedades respiratorias en la población urbana de Mexicali, Baja California: Un estudio de series de tiempo", *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, 24 (2): 116-125.

Smith, K.R., 1987, *Biofuels, Air Pollution, and Health: A Global Review*, Plenum Publishing, NY.

Smith, K.R., 1993. "Fuel Combustion, Air Pollution Exposure, and Health: The Situation in Developing Countries", *Annual Review Energy Environmental*, 18:529-566.

Smith, K.R., 2006. "Health impacts of household fuelwood use in developing countries", *Unasylva*, 224 (57): 41- 44.

Straffon, A. E., 2009. *Estudio comparativo de eficiencia energética para estufas mejoradas de leña y sus implicaciones ambientales*. Tesis de Licenciatura. UNAM.

Yuntenwi, E. A. T., MacCarty, N., Still, D., Ertel, J., 2008. "Laboratory study of the effects of moisture content on heat transfer and combustion efficiency of three biomass cook stoves", *Energy for Sustainable Development*, XII (2): 66-77.

Zhang, J., Smith K. R., 2007. "Household Air Pollution from Coal and Biomass Fuels in China: Measurements, Health Impacts, and Interventions", *Environmental Health Perspectives*, 115 (6): 848-845.





## Anexo 1. Detalles de los resultados obtenidos en WBT y factores de emisión

Estufa tipo y modelo: Patsari de ladrillo

Especie de madera: Encino

Número de replicas: Tres

Porcentaje de humedad en leña BH	Unidades	6%	15%	25%
<b>1.- Fase de alto poder inicio frío</b>				
Uso de combustible base húmeda	kg	2±0.6	2.1±0.4	3.4±0.6
Velocidad de transferencia de energía	°C/min	1.7±0.2	1.3±0.3	0.5±0.003
Eficiencia térmica	%	10±2	9±1	14±3
<i>Factores de emisión</i>				
CO	g/kg	47.6±7	23±2.7	30.7±2.1
CO2	g/kg	711±17	528±13	631±30
PM2.5	g/kg	1.2±0.2	0.9±0.4	1.1±0.2
<b>2.- Fase de alto poder inicio caliente</b>				
Uso de combustible Base húmeda	kg	1.8±0.1	1.5±0.1	2.3±0.2
Velocidad de transferencia de energía	°C/min	2.6±0.2	2±0.1	1.6±0.3
Eficiencia térmica	%	10±2	11±3	13±6
<i>Factores de emisión</i>				
CO	g/kg	47.6±8.5	15.7±4.1	28.5±4.1
CO2	g/kg	899±68	598±25	682±92
PM2.5	g/kg	2.8±0.5	0.7±0.3	1.9±0.2
<b>3.- Fase de bajo poder</b>				
Uso de combustible Base húmeda	kg	0.7±0.04	0.6±0.1	1±0.2
Velocidad de transferencia de energía	°C/min	-	-	-
Eficiencia térmica	%	12±2	12±2	10±3
<i>Factores de emisión</i>				
CO	g/kg	12.5±2.4	11.6±1.5	20±0.9
CO2	g/kg	422±59	363±4	435±52
PM2.5	g/kg	0.3±0.1	0.5±0.5	0.2±0.01