

## Determinación de la tasa de emisión de CO en cocinas mejoradas a leña con chimenea mediante el modelo de caja con ventilación constante

*Determination of the emission rate of CO in improved wood-burning stoves with chimney using the box model with continuous ventilation*

Marcelo Gorritty<sup>†\*</sup>, Tatiana Torrico<sup>‡</sup>, Y. Montenegro<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>IIDEPROQ, <sup>‡</sup>CPC-Centro de Pruebas de Cocinas, GIZ-UMSA  
Campus de Cota Cota, Calle 27, La Paz, BOLIVIA

[mgorritty@umsa.bo](mailto:mgorritty@umsa.bo)

**Resumen:** Con la finalidad de evaluar el impacto ambiental y en la salud debido al uso de cocinas mejoradas a leña en general, se utilizan como parámetros de evaluación las emisiones de CO generadas por la cocina [masa contaminante/tiempo] y las concentraciones intradomiciliarias [masa contaminante/volumen] medidas en el ambiente de cocinado generalmente para periodos de 1 hora y/o 24 horas. Los procedimientos teórico-prácticos realizados en éste trabajo permitieron determinar los valores de estos parámetros para un modelo de cocina mejorada a leña con chimenea de uso común en Bolivia (Malena). Las pruebas experimentales se realizaron en el Centro de Pruebas de Cocinas ubicado en la ciudad de La Paz, a 3.600 m s.n.m. La metodología se basa en el uso de un modelo de caja asumiendo una tasa de ventilación constante en el ambiente de testeo. Los valores obtenidos permiten la comparación con estándares nacionales e internacionales. La tasa de emisión resultante tiene un valor de  $0,28 \pm 0,1$  [gCO/min] y  $0,21 \pm 0,08$  [gCO/min] para 1 hora y 24 horas respectivamente. La concentración promedio de CO para 1 h fue de  $5,21 \pm 0,23$  [mg/m<sup>3</sup> CN], mientras que para 24 h fue de  $5,79 \pm 0,44$  [mg/m<sup>3</sup> CN] bajo las condiciones de ventilación natural del ambiente de testeo. En cuanto a la emisión, el nivel de rendimiento respecto al estándar IWA/ISO 2012 permite establecer un Nivel 4 donde la emisión debe ser  $< 0,42$  [gCO/min], siendo este el nivel de mayor eficiencia de emisión. Por otro lado, respecto a las concentraciones, existe una diferencia relativa de acuerdo a los límites de la OMS de 85% y de 87% respecto a la ley 1333 para 1h, mientras que para 24h la diferencia relativa es

de 17% en relación a la OMS. Adicionalmente, la reducción relativa de las concentraciones respecto de una cocina tradicional para 1h es 97%.

**Palabras clave:** emisiones de CO, cocinas mejoradas, contaminación intradomiciliaria

**Abstract:** In order to assess the environmental impact and in the health due to use of improved firewood stoves in general, are used as benchmarks, the CO emissions generated by the stove [pollutant mass/time] and indoor concentrations [pollutant mass/volume] measured in the cooking environment usually for periods of 1 hour and/or 24 hours. The theoretical and practical procedures performed in this work allowed to determine the values of these parameters for an improved stove model with chimney commonly used in Bolivia (Malena). The experimental tests were performed at the Stove Test Center located in La Paz city, at 3600 masl. The methodology is based on the use of a box model assuming a constant ventilation rate in the testing environment. The obtained values allow the comparison with national and international standards. The resulting emission rate has a value of  $0.28 \pm 0.1$  [gCO/min] and  $0.2 \pm 0.08$  [gCO/min] for 1 hour and 24 hours respectively. The average CO concentration for 1 h was  $5.21 \pm 0.23$  [mg/m<sup>3</sup> NC], while for 24 hours was  $5.79 \pm 0.44$  [mg/m<sup>3</sup> NC] under conditions of natural ventilation of the testing environment. As for the emission, the level of performance respect to the IWA/ISO standard allows for a Tier 4 where the emission should be  $<0.42$  [gCO/min], being this the highest efficiency level of emission. On the other hand, for concentrations, there is a relative difference according to the WHO limits of 85% and 87% respect to the Act 1333 for 1h, while for 24h the relative difference is 17% compared to WHO. Additionally, the relative reduction of concentrations respect to a traditional stove is 97% for 1h.

**Keywords:** CO emissions, improved stoves, indoor air pollution

## 1 Introducción

Alrededor de 3 mil millones de personas en el mundo cocinan sus alimentos en sus hogares, utilizando fuego abierto y cocinas tradicionales de quema de biomasa (leña, residuos animales o vegetales). En los últimos años, el tema del impacto del uso de cocinas a leña en países en desarrollo ha recibido una gran atención debido a su directa relación con aspectos ambientales, de salud y socioeconómicos [1].

Desde el punto de vista de la salud, las cocinas tradicionales a leña generan emisiones importantes de gases contaminantes y material particulado en el entorno intradomiciliario. La exposición a estos contaminantes generan serios efectos, en especial, a madres y niños que se consideran como la población más sensible a este problema. Por otro lado, se estima que cerca de 2 millones de

personas mueren prematuramente al año en el mundo debido a enfermedades atribuibles al uso de biomasa en cocinas tradicionales [2].

En nuestro país, los esfuerzos para implementar programas de diseminación de cocinas mejoradas (diseños optimizados para reducir emisiones y mejorar la eficiencia energética) se han concentrado en el apoyo de la Cooperación Técnica Alemana, GIZ bajo el proyecto Endev-Bolivia, Acceso a Energía. En este sentido, se ha diseñado la cocina denominada Malena, la cual debe cumplir con estándares nacionales (NB 83001) [3] e internacionales de rendimiento. Para esto, el Centro de Pruebas de Cocinas que opera en la ciudad de La Paz, bajo convenio con la Universidad Mayor de San Andrés ha llevado a cabo pruebas de testeo de cocinas mejoradas bajo protocolos internacionalmente aceptados.

El objetivo del presente trabajo, consiste en determinar las tasas de emisión de monóxido de carbono (CO) utilizando un modelo de caja de mezcla completa en base a una tasa de ventilación constante [4].

En la Sección 2 se describe la aplicación del modelo de caja, la determinación experimental de la tasa de ventilación y la determinación de las concentraciones promedio de CO para 1 h y 24 h de operación de la cocina Malena. La Sección 3 muestra los resultados obtenidos y las características de cumplimiento con los estándares nacionales e internacionales de referencia.

## 2 Metodología

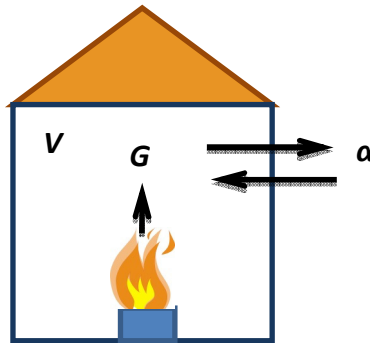
### 2.1 Modelo de caja y tasa de ventilación

Para cualquier ambiente habitacional, se define la tasa de ventilación como la cantidad de volúmenes de aire renovados naturalmente por unidad de tiempo, denominado aquí como  $\alpha$  [ $\text{h}^{-1}$ ].

La determinación de este valor puede realizarse comúnmente utilizando un gas trazador sobre el cual se analiza la dilución del mismo en el ambiente de estudio a partir de un valor inicial conocido. En estudios de ventilación relacionados con cocinas mejoradas, se usa el monóxido de carbono generado en una combustión incompleta para el cual, luego de un determinado tiempo, se detiene la emisión dejando que el ambiente se ventile naturalmente. [5]

Para medir la evolución de los niveles de CO (ppm) en el ambiente de cocina se utiliza un equipo de monitoreo continuo, (Indoor Air Pollution IAP Meter) el cual permite almacenar los valores de concentración en función del tiempo de prueba con una resolución ajustable.

El sistema de estudio se esquematiza en la Figura 1. Dentro del ambiente existirá en cualquier momento una concentración del contaminante dependiente del tiempo,  $C(t)$  donde se supone mezcla perfecta. Al inicio del proceso de emisión existe una concentración ambiental de fondo  $C_b$ . El problema consiste en determinar la tasa de emisión de contaminante  $G$  en base a un modelo de caja resultante de un balance másico del contaminante en estado no estacionario.



**Figura 1:** Esquema de emisiones y ventilación del sistema de estudio.

Un balance de masa para el contaminante de interés resulta en,

$$\frac{dC(t)}{dt} = \alpha[C_b - C(t)] + \frac{G(t) \cdot f}{V} \quad (1)$$

Donde,

$$G(t) = E(t) \cdot F(t) \quad (2)$$

Denominamos a  $E(t)_{total}$  como el factor de emisión total del contaminante. Para cocinas con chimenea, solo una fracción del mismo se emite directamente al ambiente interior de volumen  $V$ , por lo que en este caso es necesario aplicar un factor  $f$  que corrija el factor de emisión total mediante,

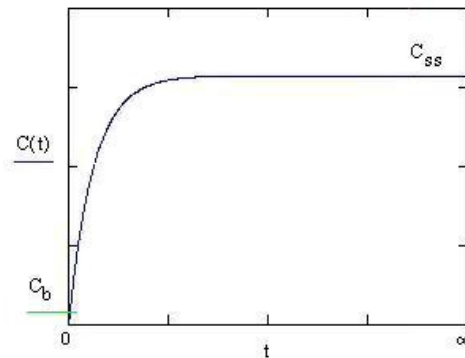
$$E(t)_{interior} = E(t)_{total} \cdot f \quad (3)$$

El modelo considera que el factor de emisión  $E(t)$  y la tasa de consumo de combustible  $F(t)$  son constantes en el tiempo y están representados por un valor medio durante el tiempo de operación de la cocina. La solución de la Ec. (1), considerando la condición inicial más general donde existe una concentración  $C_0$  cualquiera en  $t = 0$  es la siguiente,

$$C(t) = \frac{G \cdot f}{\alpha \cdot V} (1 - e^{-\alpha t}) + (C_0 - C_b)(e^{-\alpha t}) + C_b \quad (4)$$

La solución general para la Ec. (4) en un tiempo suficientemente grande para llegar al estado estacionario se esquematiza en la Figura 2. Adicionalmente, el tiempo medio de residencia del gas en el sistema se puede definir como,

$$\tau = \frac{1}{\alpha}$$



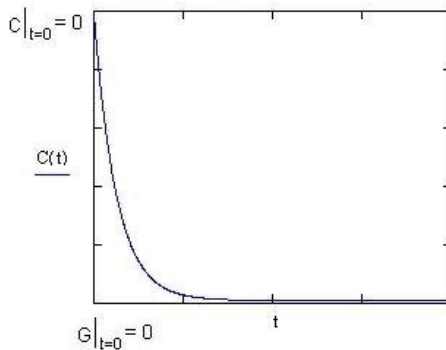
**Figura 2:** Solución de la Ec. (4) en el tiempo, mostrando la aparición del estado estacionario.

Es posible aplicar diferentes condiciones iniciales sobre la ecuación Ec. (4). Para estudios de la tasa de ventilación se considera  $G|_{t=0} = 0$  y una concentración inicial cualquiera en el ambiente diferente a la de fondo.

$$C_0 > C_b$$

$$C_{(t)} = (C_0 - C_b) \cdot (e^{-\alpha t}) + C_b \quad (5)$$

La Figura 3 muestra el desarrollo de la concentración con el tiempo en base a la Ec. (5).



**Figura 3:** Representación del proceso de ventilación natural.

En base a datos de monitoreo de la concentración del trazador (monóxido de carbono), se realiza el ajuste sobre la ecuación Ec. (5) para encontrar el valor de  $\alpha$  representativo del ambiente. En el presente estudio, el valor final se obtiene de un promedio de cuatro pruebas de ventilación.

## 2.2 Tasa de consumo de combustible

Se realizaron tres (3) pruebas del WBT (WaterBoilingTest :[www.pciaonline.org/testing](http://www.pciaonline.org/testing)) con la cocina Malena estándar y tres (3) con la misma cocina pero usando una chimenea corta, a fin de simular una cocina sin chimenea, donde toda la emisión permanece en el ambiente de testeo, cómo se observa en la Figura 4, esto con la finalidad de determinar el valor de la tasa de consumo de combustible  $F$  y verificar diferencias entre ellas.



**Figura 4:** Malena con chimenea corta y Malena estándar.

La hipótesis nula planteada es que una cocina Malena sin chimenea (chimenea corta) afecta a la tasa de consumo de combustible F, lo que afecta al valor de la tasa de emisión G.

### 2.3 Fracción de emisión liberada al ambiente de prueba

La fracción de la emisión total que la cocina emite al ambiente de testeo ( $f$ ) es igual a la unidad cuando se utilizan cocinas sin chimenea. En el presente trabajo es necesario determinar la fracción emitida al ambiente de testeo de una cocina con chimenea, tal como es la Malena estándar.

Considerando la ecuación Ec. (4) en un tiempo  $t \rightarrow \infty$ , podemos definir la concentración en estado estacionario para una cocina con chimenea y otra sin chimenea.

$$C_{SS}^s = \frac{G}{\alpha V} + C_b f = 1 \quad (6)$$

$$C_{SS}^c = \frac{Gf}{\alpha V} + C_b \quad f < 1 \quad (7)$$

Donde  $C_{SS}^s$  es la concentración del monóxido de carbono en estado estacionario para cocina sin chimenea y  $C_{SS}^c$  la concentración para cocina con chimenea. Igualando las ecuaciones (6) y (7) con respecto a  $G$  y despejando  $f$  se obtiene,

$$f = \frac{C_{SS}^c - C_b}{C_{SS}^s - C_b} \quad (8)$$

Se realizaron tres (3) pruebas de emisiones intradomiciliarias para la cocina Malena estándar y tres (3) para la cocina Malena con chimenea corta (sin emisión al exterior) para hallar  $C_{SS}^c$  y  $C_{SS}^s$ .

### 2.4 Cálculo de la reducción relativa de concentraciones

Para el cálculo del porcentaje de reducción relativa de CO, se aplicó la Norma Boliviana NB 83001 *Cocinas mejoradas - Condiciones técnicas mínimas de instalación, funcionamiento y de rendimiento*. Se requiere la concentración promedio de la cocina testeada para comparar con un valor de referencia.

$$Rt = \frac{C_{referencia}^t - C_{cocinamejorada}^t}{C_{referencia}^t} \cdot 100 \quad (9)$$

El valor de referencia a comparar se definió de tres maneras,

**Tabla 1.** Valores guía de calidad de aire intradomiciliario, OMS [6]

PERÍODO	CONCENTRACIÓN [mg/m <sup>3</sup> ]
1 hora	35
24 horas	7

**Tabla 2.** Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica de la Ley 1333 [7]

PERÍODO	CONCENTRACIÓN [mg/m <sup>3</sup> ]
1 hora	40

**Tabla 3.** Valores de referencia para CO de una cocina tradicional basado en pruebas en el CPC, refiriéndose a “tres piedras” como la cocina rudimentaria comúnmente usada en áreas rurales

PERÍODO	CONCENTRACIÓN [ppm]
1 hora	131 ± 8,9

## 2.5 Cálculo de la tasa de emisión y factor de emisión

Para determinar cuál es el nivel de rendimiento de la cocina mejorada frente a los nuevos límites recomendados por el IWA/ISO 2012 [8] para el estándar mundial de cocinas mejoradas, se realizó una prueba de emisiones intradomiciliarias durante 24 h. para un ciclo de cocinado estándar con tres comidas día.

**Tabla 4.** Niveles IWA/ISO 2012 para tasas de emisión de CO intradomiciliario.

NIVEL	IAQ CO (g/min)
0	>0,97
1	<0,97
2	<0,62
3	<0,49
4	<0,42

Es posible justificar la igualdad de G de la cocina Malena con y sin chimenea, ya que, de acuerdo a resultados obtenidos en pruebas de WBT, ambas cocinas presentan el mismo valor de F, rechazando la hipótesis nula descrita en la sección 2.2.

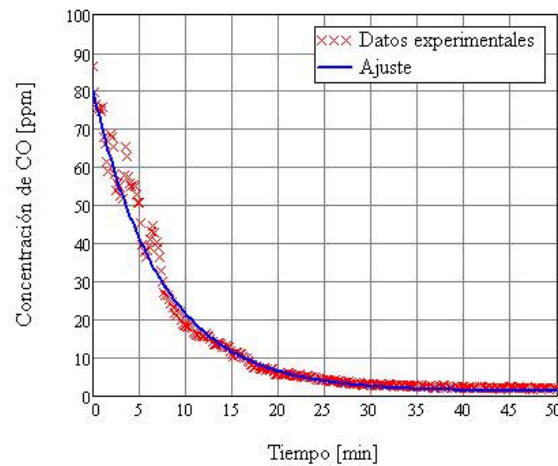


Finalmente, con todos los datos obtenidos, se halla la tasa de emisión  $G$  a partir de la ecuación Ec. (7) y el factor de emisión  $E$  de la ecuación Ec. (2).

### 3 Resultados y Discusión

#### 3.1 Tasa de Ventilación $\alpha$

Los datos obtenidos del IAP (Indoor Air Pollution IAP Meter) para las curvas de ventilación se muestran en la Figura 5 para cuatro (4) pruebas usando el método de trazador de CO,



**Figura 5:** Curvas de ventilación de datos experimentales obtenidos del IAP con el método de trazador de CO y su ajuste con el modelo de caja.

A partir de un ajuste sobre la ecuación Ec. (5), minimizamos el error absoluto para encontrar un valor promedio de  $\alpha$  que ajuste esta curva para cada contaminante. El promedio de  $\alpha$  del ajuste con la Ec. (5) para las cuatro pruebas resulta en,

$$\alpha = 10,87 \pm 2,34 \text{ [h}^{-1}\text{]}$$

#### 3.2 Tasa de consumo de combustible $F$

Se comprobó que no existe una diferencia significativa entre la tasa de consumo de combustible entre las tres fases del WBT (*Coldstart*, *Hot startySimmer*) para una cocina Malena con y sin chimenea. Para ello se realizó un análisis estadístico de contraste en el software SPSS con un nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ .

**Tabla 5.** Valores de la tasa de consumo de combustible para cada fase de la prueba del WBT.

Fases WBT	Malena con chimenea [g leña/min]			Malena sin chimenea [g leña/min]		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Cold	26	31	33	25	40	25
Hot	30	27	45	43	52	31
Simmer	23	23	34	20	21	15

Los resultados del análisis muestran que para todas las fases del WBT no existe una diferencia significativa, siendo los valores del p-valor 1, 0,39 y 0,12 para las fases de *Cold*, *Hot* y *Simmer* respectivamente.

La tasa de consumo de combustible es la misma para ambas cocinas, ya que las diferencias entre fases de las pruebas del WBT no son significativas.

$$F = 30,9 \pm 3,04 \text{ [g leña/mi}^2\text{]}$$

### 3.3 Fracción de emisión liberada al ambiente de prueba $f$

Los datos de concentración promedio en estado estacionario para pruebas de 1 hora y 24 horas, con y sin chimenea resultan en,

**Tabla 6.** Concentraciones promedio en estado estacionario con y sin chimenea

PERÍODO	CONCENTRACIÓN DE CO [ppm]
1 h	Concentración media en estado estacionario Malena chimenea corta (sin chimenea) $125,37 \pm 4,84$
	Concentración media en estado estacionario Malena estándar (con chimenea) $4,55 \pm 0,2$
24 h	Concentración media en estado estacionario Malena estándar (con chimenea) $5,05 \pm 0,38$

Mediante la Ec. (8),

$$f_{Malena}^{1h} = 0,036 \pm 0,003$$

$$f_{Malena}^{24h} = 0,04 \pm 0,005$$

### 3.4 Reducción relativa de concentraciones $R^t$

La Tabla 6 muestra un resumen de la comparación de los resultados obtenidos para concentraciones promedio para 1h y 24h frente a los estándares establecidos.

**Tabla 7.** Reducción relativa de concentración de CO en cocina Malena

Periodo	Concentración promedio de CO cocina mejorada [mg/m <sup>3</sup> ]	Diferencia relativa
1 h	5,21	85% <sup>a</sup>
		87% <sup>b</sup>
		97% <sup>c</sup>
24 h	5,79	17% <sup>a</sup>

<sup>a</sup>OMS <sup>b</sup>Ley 1333 RMCA <sup>c</sup>Valor referencial cocina “tres piedras”

La diferencia relativa de la concentración de CO es de 85% con la OMS, 87% respecto a la Ley 1333 y 97% con el valor referencial de “tres piedras”. Para 24 h la diferencia es de 17 %, si bien el valor de la concentración de CO está por debajo del valor límite de la OMS para éste periodo, no cumple con la norma boliviana PNB 83001 de que la reducción relativa sea > 85 %, pero aún así existe una reducción.

### 3.5 Tasa y factor de emisión

Con todos los anteriores datos, se usa la Ec. (7) para hallar la tasa de emisión de monóxido de carbono para 1 y 24 horas.

$$G_{CO}^{1h} = 0,28 \pm 0,10 \text{ [g CO/mi}^2\text{]}$$

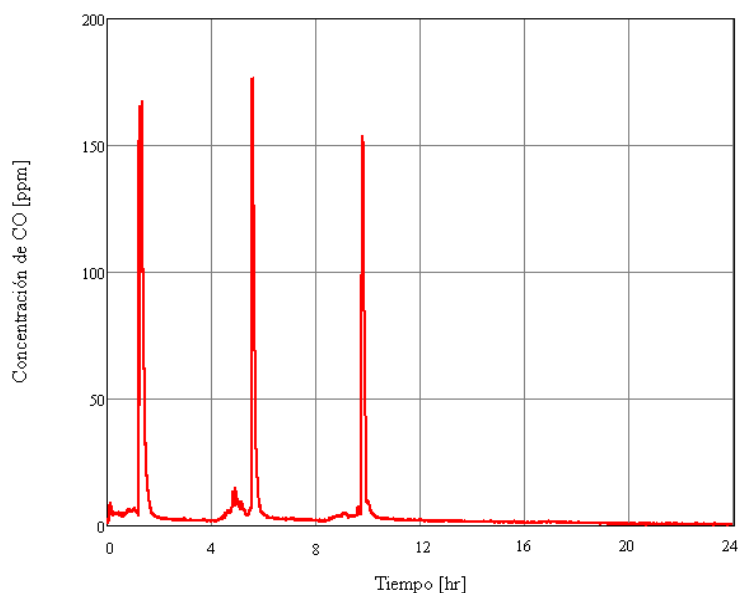
$$G_{CO}^{24h} = 0,21 \pm 0,08 \text{ [g CO/mi}^2\text{]}$$

De la misma manera, se usa la Ec. (2) para hallar el factor de emisión.

$$E_{CO}^{1hr} = 9,1 \pm 4,1 \text{ [g CO/kg leña]}$$

$$E_{CO}^{24hrs} = 6,8 \pm 3,3 \text{ [g CO/kg leña]}$$

Por otro lado, comparando el valor de la tasa de emisión de CO en 24 hrs, para evaluar el nivel de rendimiento de la cocina mejorada Malena frente a los nuevos límites recomendados emitidos en el IWA/ISO (Tabla. 4) para el estándar mundial de cocinas mejoradas, la cocina Malena se encuentra en el nivel 4.



**Figura 6:** Concentraciones intradomiciliarias para emisiones en 24 h.

## 4 Conclusiones

Se demuestra que la metodología empleada en el presente trabajo, permite estimar los valores de las tasas de emisión y concentraciones del monóxido de carbono de cocinas mejoradas con chimenea. Esto, a su vez, permite la comparación del rendimiento en emisiones internacionales. El concepto de medir las reducciones relativas de contaminantes emitidos se amplía a estándares de la OMS y de la Ley 1333 y ya no se limita solamente a reducciones respecto a la cocinas de Tres Piedras.

La cocina Malena analizada en el presente trabajo cumple con los diferentes estándares internacionales y bolivianos respecto a emisiones intradomiciliarias de CO para 1h y para 24 h. De acuerdo a la OMS, los valores límites permisibles para 60 min y 24 h para el CO son 40 [mg/m<sup>3</sup>] y 7 [mg/m<sup>3</sup>] respectivamente. Los valores hallados para la cocina Malena estándar para el CO fueron 5,21 [mg/m<sup>3</sup>] para una hora y 5,79 [mg/m<sup>3</sup>] para 24 horas; de igual manera, la cocina Malena cumple con la Ley 1333 respecto al CO para 1 h siendo el valor límite de 40 [mg/m<sup>3</sup>] igual a la OMS.

La reducción relativa de la concentración de CO es de 85% y 17% para 1h y 24 h respectivamente en comparación con la OMS; 87% en comparación con la Ley 1333 y finalmente 97% con la cocina tradicional de “tres piedras”.

De acuerdo a los estándares de la IWA/ISO 2012, el nivel más exigente para emisiones de CO corresponde al nivel 4 representado por un valor  $< 0,42$  [g CO/min] en un periodo de 24 h. La cocina mejorada con chimenea alcanza un valor de  $0,21$  [g CO/min], lo que la define como una cocina Nivel 4 para el CO.

El método del trazador y el WBT fueron herramientas fundamentales para la obtención de la tasa y el factor de emisión de CO para la comparación con los límites anteriormente descritos. Se comprobó que la cocina Malena estándar y su variante con chimenea corta, emiten aproximadamente la misma cantidad de CO, esto es justificado por la tasa de consumo de combustible, que se halló mediante el WBT. La tasa de emisión G, para 1 h y 24 h, es similar ya que se asumió que F y E son constantes.

Actualmente, la determinación de tasas de emisión de cocinas mejoradas se determina utilizando equipos costosos, tal es el caso del PEMS de Aprovecho Research Center. Adicionalmente, no se tienen antecedentes de la adecuación del PEMS a cocinas con chimenea. En base a pruebas repetitivas y sistemáticas basadas en la presente metodología, bien puede conocerse la tasa de emisión de las cocinas con cierto grado de incertidumbre que debe ser cuantificado, lo que permite adecuar las posibilidades de laboratorios de la región al uso de equipamiento costoso.

Finalmente, se recomienda la aplicación de la metodología desarrollada en el presente trabajo en otros laboratorios de testeo de cocinas de la región, en especial en Perú dada la similitud del diseño con la cocina con chimenea de Bolivia con la finalidad de evaluar su rendimiento con parámetros internacionales.

## Referencias

- [1] N. Bruce, R. Pérez-Padilla and R. Albalak, "Indoor air pollution in developing countries: a major environmental and public health challenge," *Bulletin of the World Health Organization, WHO*, 2000.
- [2] OMS, Indoor Air Pollution and Health, 2011.
- [3] P. d. N. B. N. 83001, Cocinas mejoradas - Condiciones técnicas mínimas de instalación, funcionamiento y de rendimiento, 2012.
- [4] R. Bailis, D. Ogle, N. MacCarty and D. Still, The Water Boiling Test Version 4.1.2, 2009.

- 
- [5] D. Lausmann and D. Helm, "Air Change Measurements Using Tracer Gases," *Chemistry, Emission Control, Radioactive Pollution and Indoor Air Quality*, pp. 365-406, 2011.
- [6] OMS, WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants, 2010.
- [7] Ley No.1333 Ley del Medio Ambiente, Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica.
- [8] M. Johnson, Proposed Indoor Emissions Tiers for Cookstoves, 2012.