

Validación y evaluación comparativa de la eficiencia de una estufa de leña mejorada bajo condiciones controladas y prueba de campo¹

Validation and comparative assessment of an improved wood-burning cookstove under controlled conditions and in the field.

Recibido: 03-03-2014 Aceptado: 10-05-2014

Javier Darío Aristizábal Hernández²

Resumen

Para determinar la eficiencia y el ahorro potencial de leña de un nuevo prototipo de estufa de leña, se ejecutaron tres protocolos utilizados internacionalmente para este propósito: (1) la prueba de ebullición de agua (WBT sus siglas en inglés), que evalúa la eficiencia térmica, el tiempo de ebullición, la tasa de incineración y el consumo específico de combustible (CEC) de la estufa; (2) la prueba de cocción controlada (CCT, sus siglas en inglés), que se aplicó en 30 hogares para determinar la eficiencia de la estufa en función del CEC; (3) la prueba de funcionamiento en cocina (KPT, sus siglas en inglés), que se aplicó en 30 hogares para medir el impacto real de la estufa mejorada en condiciones de campo. Se pudo establecer que la eficiencia térmica de la estufa es del 15%, lo que supone un ahorro en el consumo de leña del 33%. Los resultados de la prueba CCT indicaron disminución de 13,4% en el CEC, mientras que la prueba KPT reveló disminución de 11,6%. Los resultados de la investigación ratifican lo encontrado por otras investigaciones sobre el tema: la eficiencia de una estufa lograda bajo condiciones controladas no parece guardar relación con los ahorros de leña que se obtienen cuando una estufa es introducida en ambiente real de cocción.

Palabras clave: Estufa mejorada; eficiencia térmica; consumo de leña.

Abstract

To assess the efficiency and potential saving of fuelwood of a new and improved prototype of wood-burning cookstove, three well-known protocols were used: (1) the water boiling test (WBT), which assesses thermal efficiency, boiling time, burning rate, and specific fuel consumption; (2) the controlled cooking test (CCT), which was implemented in 30 rural households to establish the cookstove's efficiency in terms of specific fuel consumption (SFC); and (3) the kitchen performance test (KPT), also applied in 30 rural households, to measure impact in real household conditions. The improved cookstove presented 15% thermal efficiency, representing a 33% saving in fuelwood. In contrast, the CCT showed a 13.4% reduction in fuelwood consumption, whereas the KPT showed a 11.6% decrease. These research results confirm the findings of other studies in that the efficiency of improved cookstoves under controlled conditions does not necessarily relate to the fuelwood savings achieved when cookstoves are evaluated in a real kitchen environment.

Key words: Improved cookstove; thermal efficiency; fuelwood consumption.

1. La presente investigación, se adelantó en el marco del proyecto "Mecanismo para la mitigación voluntaria de emisiones de carbono en Colombia (CO-X1008) entre marzo y diciembre del 2013. Este componente del proyecto fue ejecutado por la Fundación Natura Colombia y financiado por el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

2. Colombiano Ingeniero Forestal. Especialista en Planeación Ambiental y Manejo Integral de Recursos Naturales. Correo: jaristizabal@natura.org.co.

Introducción

Se estima que el 14% de la población colombiana, asentada mayoritariamente en las áreas rurales, dependen de la leña como su principal combustible para solventar sus necesidades de cocción de alimentos (DANE, 2008). El aprovechamiento térmico de este recurso se efectúa mediante el uso de fogones abiertos o estufas tradicionales con bajas eficiencias (menores al 10%) que demandan alto consumo para cumplir con determinadas labores de cocina. Se estima que la demanda de leña para cocción doméstica y producción de carbón vegetal, podría tener algún tipo de incidencia en los procesos de reducción y deterioro de la cobertura forestal afectando los bosques y la biodiversidad que ellos albergan; esta situación es particularmente relevante en África y menos prominente en Asia y América Latina (Kissinger *et al.*, 2012). Adicionalmente, el uso de fogones abiertos generan impactos negativos sobre el medio ambiente y la salud de las personas. El humo en espacios cerrados es responsable de 1,5 millones de decesos anuales en todo el mundo y afecta principalmente a mujeres y niños (OMS, 2006). Se sabe que la exposición frecuente al humo, producido por la combustión de la leña, tiene fuerte relación con enfermedades de tipo respiratorio como: la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), neumonía y asma, al igual que con diversos tipos de morbilidad oftálmica (OMS, 2006). Larsen (2004) indicó que en el contexto nacional, la contaminación intradomiciliaria es responsable del 16 al 25% de la morbi-mortalidad infantil entre el total de la población afectada por infección respiratoria aguda (IRA) y entre el 15% al 35% de la morbi-mortalidad en mujeres, ocasionadas por EPOC.

La combustión ineficiente de la leña produce sustancias altamente contaminantes como monóxido de carbono (CO), material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) e incluso compuestos orgánicos persistentes (COP) que son liberados a la atmósfera en concentraciones muy por encima de los límites permisibles (OMS, 2006). Un estudio adelantado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2007), señaló que la combustión de leña en el interior de la vivienda participaba con cerca del 9% de las emisiones nacionales de dioxinas y furanos. El uso de fogones o estufas ineficientes contribuyera con la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) hacia la atmósfera. La combustión ineficiente de la leña no solo es responsable de generar dióxido de carbono (CO₂), sino también otros gases con efectos potenciales de calentamiento global mucho mayores como: monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y diferentes óxidos de nitrógeno (NO_x). De forma reciente, se ha podido establecer que los aerosoles de hollín, una forma de material particulado compuesto principalmente por

carbono elemental, también presentan un fuerte potencial de calentamiento global que lo ubica como el segundo agente promotor del efecto de invernadero solo superado por el dióxido de carbono (Bachman, 2009). La producción de hollín es inherente a la combustión incompleta de la leña. Si se considera que la cocción doméstica tiene implicaciones directas en cada una de estas problemáticas, entonces es evidente que mejorar el proceso de combustión de la leña tendrá efectos benéficos sobre la salud de las personas y el medioambiente en general.

En la actualidad, los principales esfuerzos en esta materia se concentraron en el desarrollo y aplicación de tecnologías de cocción mejoradas que sustituyan los sistemas tradicionales que durante siglos han sido utilizados por muchas comunidades rurales, principalmente en países en vías de desarrollo. No obstante, existe un consenso entre investigadores y académicos que indican la necesidad de garantizar que las nuevas tecnologías de cocción cumplan con unos mínimos requisitos de rendimiento en términos de eficiencia, emisiones y seguridad (Global Alliance for Clean Cookstoves, 2013). Típicamente, la eficiencia energética ha sido el principal indicador de rendimiento que se tiene para determinar el funcionamiento de un nuevo sistema de cocción el cual se mide por los protocolos estandarizados, que se presentan en la tabla 1.

La presente investigación estableció y utilizó la eficiencia térmica del nuevo modelo de estufa mejorada, mediante la aplicación de las tres pruebas estandarizadas. De igual forma, se buscó determinar la diferencia entre la eficiencia arrojada bajo condiciones controladas, con respecto a los ahorros reales de leña cuando la estufa se introdujo en un auténtico ambiente de cocción.

Materiales y Métodos

La estufa mejorada FN es un nuevo prototipo de estufa de leña diseñado por la Fundación Natura y basada en la estufa ICA-1791 desarrollada en los años ochenta por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). Su apariencia externa es muy semejante a la ICA-1791; su diferencia fundamental consistió en la configuración de la cámara de combustión, que adoptó el diseño “rocket” implementado por diferentes modelos de estufas alrededor del mundo (MacCarty *et al.*, 2008; Bryden *et al.*, 2005). Bajo este concepto de diseño, la cámara de combustión tiene forma angular, cuya sección horizontal corresponde al lecho de ignición, y su parte vertical comprende el ducto de combustión y ascenso de gases calientes. Para reducir las pérdidas de calor por conducción, la cámara de combustión se construyó con ladrillo refractario de material silico-aluminoso con el fin de generar el aislamiento térmico apropiado. La sección

Tabla 1. Protocolos utilizados internacionalmente para medir la eficiencia energética

Protocolo	Sigla en inglés	Mide	Condiciones en que se realizan
Test de ebullición del agua	WBT	De forma directa a la eficiencia térmica de la estufa	Bajo condiciones controladas. Se consideran test de laboratorio
Test de cocción controlada	CCT	El consumo específico de combustible como variable proxy de la eficiencia	
Test de rendimiento de cocina	KPT	Cuantifica la disminución del consumo de leña	Bajo un contexto real de operación de la nueva tecnología. Se efectúa bajo una rutina normal de cocina

transversal de la cámara es rectangular con una área de 280 cm². Una descripción más amplia de la estufa puede ser consultada en Aristizábal (2010).

Ubicación

Las pruebas se realizaron en el departamento de Santander (Colombia), en los municipios: los Santos, vereda La Purnia, a 6°52'N y 73°06'W y Zapatoca vereda San Isidro a 6°53'N y 73°13'W. Las veredas presentaron condiciones climáticas muy similares, 1.150 y 1.350 m.s.n.m., temperatura promedio de 25 °C y una precipitación promedio de 1.000 mm anuales.

Selección de familias y construcción de estufas

Se escogió una muestra de 30 familias, con el objeto de lograr resultados estadísticamente significativos, dada la alta variabilidad que se presenta en el KPT, (Harvey y Tomas, 2011; Bailis *et al.*, 2007). En cada lugar se seleccionaron 15 familias que debían cumplir con los siguientes requisitos: la leña era el combustible predominante en sus labores diarias de cocción y tenían una necesidad manifiesta de sustituir su fogón tradicional por la nueva estufa propuesta (figura 1). A las familias escogidas le efectuaron los estudios y evaluaciones de consumo de leña, y se construyó una unidad de la estufa FN.



Figura 1. (a) Fogón tradicional (b) y estufa mejorada FN (c) con chimenea externa

Materiales empleados

En la tabla 2 se presentan los materiales y equipos utilizados conforme al protocolo.

Tabla 2. Materiales y equipos utilizados de acuerdo con el protocolo

Cantidad	Materiales	Protocolo		
1	Balanza electrónica LEXUS de 6 kg de capacidad y 0,2 g de precisión	WBT	CCT	
1	Balanza electrónica colgante LEXUS de 50 kg de capacidad y 0,1 kg de precisión	KPT		
1	Termómetro digital DIGI-SENSE con termocupla para inmersión en líquidos	WBT		
1	Medidor de humedad GE-PROTIMETER Timbermaster	WBT	CCT	KPT
1	Cronómetro	WBT	CCT	
1	Flexómetro	WBT	CCT	
4	Ollas de cocina de 7 litros de capacidad	WBT		
4	Ollas de cocina de 2,5 litros de capacidad	CCT		
4	Soporte en madera para la termocupla	WBT		

Para el test de cocción controlada, se utilizaron los siguientes ingredientes por cada prueba: 500 g de arroz; 500 g de yuca (sin cascara); 1.800 g de agua; 30 g de aceite de cocina; 70 g de cebolla junca; 20 g de sal y 5 kg de leña.

Test de Ebullición del Agua (WBT)

A una familia escogida aleatoriamente entre las 30 familias participantes, en su estufa mejorada, se determinó la eficiencia térmica de la estufa FN, aplicando las tres fases del test de ebullición del agua (WBT) versión 4.2.2.

- Arranque en frío (*cold start*). En cada hornilla se colocaron cuatro ollas llenas con 5 litros de agua (figura 2a), donde se registró la temperatura inicial del agua, sumergiendo la termocupla hasta una profundidad de 5 cm por encima de la base de las ollas. La estufa se encendió con la leña previamente pesada (aprox. 5 kg) y cuando se tuvo la certeza de que el fuego no se apagará, se puso en funcionamiento el cronómetro. La intención de esta fase era conseguir, lo más pronto posible, la temperatura de ebullición local del agua en la olla colocada en la hornilla principal (figura 2b). Una vez la olla principal alcanzó el punto de ebullición local, se registró el tiempo transcurrido, se removió toda la leña de la estufa, se extinguieron aquellos pedazos que aún se encontraban encendidos y se procedió a pesarlos junto con la leña sobrante que no se utilizó en la estufa. (*The Water Boiling Test*, 2013). Los tizones de la cámara de combustión se extrajeron y se pesaron en la balanza (figura 2c) y se registraron las temperaturas alcanzadas en cada una de las ollas. Finalmente, se desechó el agua caliente para iniciar la segunda fase del test. (*The Water Boiling Test*, 2013).

- Arranque en caliente (*hot start*). Se utilizaron cuatro ollas de 7 litros y se llenaron rápidamente con 5 litros de agua a temperatura ambiente, previamente aforadas y pesadas; en cada olla se midió nuevamente la temperatura del agua y se reubicaron en las hornillas de la estufa. El fuego se encendió utilizando 5 kg de leña, previamente pesada, cuando existió la certeza de que no se apagaba, se puso a funcionar el cronómetro. Al igual que en la primera fase de la prueba, la intención era conseguir que el agua de la olla emplazada sobre la hornilla principal, alcanzara el punto de ebullición local, momento en el cual se realizó el mismo procedimiento descrito para la anterior fase, salvo que no se pesaron los tizones que habían quedado en la cámara de combustión. (*The Water Boiling Test*, 2013).

- Fuego moderado (*simmering*). La última fase del test consistió en mantener el agua caliente de la olla ubicada en la hornilla principal a una temperatura fluctuante por debajo del punto de ebullición local, pero sin que decayera por menos de 6 °C respecto a dicha temperatura. En el caso de la presente investigación no debía estar por debajo de 89 °C, considerando que el punto de ebullición local calculado para el sitio de la prueba fue de 95 °C. Esta última etapa del ensayo se realizó durante 45 minutos, utilizando la mínima cantidad de leña posible; la estufa se encendió nuevamente con la leña pesada y cuando el fuego se mantuvo por sí solo, se puso en funcionamiento el cronómetro y se colocó la olla que en la fase anterior alcanzó el punto de ebullición local (olla de la hornilla principal) con la termocupla inmersa para monitorear la temperatura, la cual debía mantenerse 3 °C por debajo del punto de ebullición, pero sin caer más de 6 °C por debajo de ese nivel de temperatura, dado que se invalidaría la

prueba. Una vez transcurridos los 45 minutos se registró la temperatura final del agua, se retiraron los leños que no se habían consumido y se desprendieron los tizones de los extremos, los cuales, se pesaron juntos con aquellos recogidos de la cámara de combustión. Finalmente, se pesó tanto la olla con el agua hervida como la leña. (*The Water Boiling Test*, 2013).

Los datos se registraron en el formato de campo y se sistematizaron en la hoja de cálculo que acompaña el WBT. De cada prueba se efectuaron cinco repeticiones. En la prueba se utilizó leña de la especie guamo (*Inga edulis*). El objetivo de la prueba era determinar el funcionamiento de la estufa considerando cuatro métricas fundamentales: eficiencia térmica, tiempo de ebullición, tasa de incineración y consumo específico de combustible. Una descripción más detallada del procedimiento metodológico, así como el aplicativo para establecer los resultados de la prueba, puede ser consultada en *The Water Boiling Test Protocol* v. 4.2.2 (2013).

Test de cocción controlada (CCT)

En las 30 familias escogidas para la prueba, se implementó el test de cocción controlada (CCT) versión 2.0, preparando un alimento típico de la zona, para determinar el rendimiento de la estufa. Se comparó la tarea de cocción en la estufa eficiente, respecto a su contraparte tradicional (Bailis, 2004). La prueba se realizó bajo condiciones controladas, y se introdujo un par de variaciones respecto al CCT estándar:

- Cada familia evaluada contó con su propio operador de la estufa (ama de casa de cada hogar), quien realizó la prueba tanto en el fogón tradicional como en la estufa mejorada.

Para evitar un sesgo en los resultados, cada operador de estufa fue instruido de tal forma que todos los utilizaran de la misma manera.

- Cada familia evaluada suministró su propia leña para cada una de las pruebas. En la mayoría de los hogares, la leña no procedía de la misma fuente, lo cual implicaba una mezcla heterogénea de este combustible en términos de composición y contenido de humedad.

Las modificaciones presentadas hicieron que la prueba no fuera estrictamente controlada como sugiere el protocolo, lo cual podría afectar el resultado general del parámetro que se pretende medir. No obstante, se condujo una versión semicontrolada del CCT con el propósito de establecer el rendimiento real de la estufa bajo un contexto que se asemeje más a una rutina normal de cocción tal y como lo demuestran Adkins *et al.* (2010).

Para el área de estudio, se escogió como alimento típico arroz y yuca. Esta preparación (que también es común en otras regiones de Colombia) consiste básicamente en cocinar tanto el arroz como la yuca en agua hasta alcanzar su punto apropiado de ablandamiento, momento en el cual dicho alimento es apto para consumir. Cada alimento se cocina por separado en su propia olla.

Para la cocción se utilizó el siguiente procedimiento: en una olla de 2,5 L de capacidad, se agregaron 30 g de aceite de cocina, 10 g de sal y 70 g de cebolla junca previamente picada. En la otra olla, de igual capacidad, se colocaron 500 g de yuca (previamente pelada, lavada y pesada), con 800 g de agua y 10 g de sal. El operador de la estufa (o fogón), la encendía y cuando existió la certeza de que el fuego se mantendría por sí solo, se dio por iniciada la prueba y se puso en funcionamiento el cronómetro.

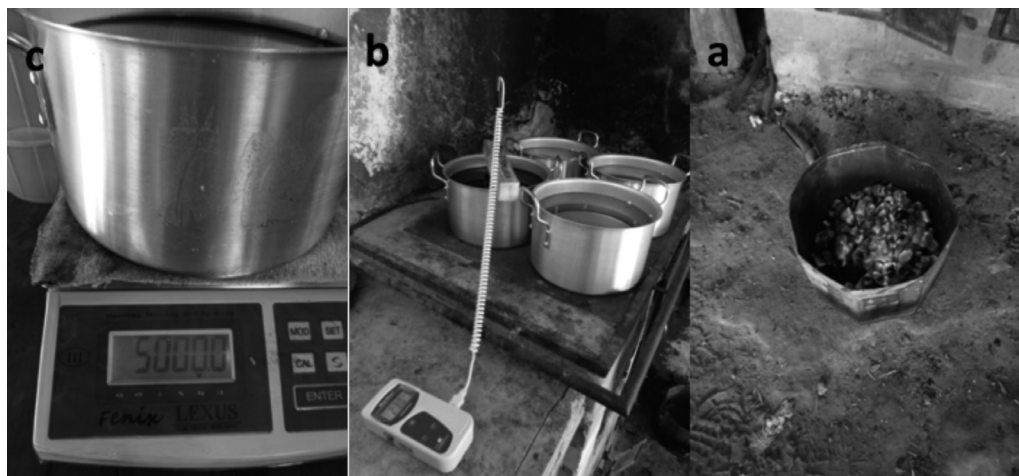


Figura 2. Test de ebullición del agua (WBT). (a) La prueba estándar (b) punto de ebullición local (c) tizones pesados en la fase arranque en frío y en la de fuego moderado.

Las ollas se colocaron al mismo tiempo. En el caso del arroz, el operador permitió que la cebolla y la sal se sofrían con el aceite caliente, por un tiempo aproximado de 3 minutos, y se procedió a agregar el agua (1.000 g). El arroz se agregó cuando el agua alcanzó su punto de ebullición y se mantuvo el fuego alto hasta lograr su completa evaporación. Cuando el arroz se encontró en estado “seco”, se colocó en fuego bajo hasta alcanzar su punto óptimo de cocimiento. Lo anterior se reconoce porque el arroz “crece”, es decir se produce el máximo hinchamiento del grano por la acción conjunta de la humedad y el calor.

Así mismo la olla con la yuca, agua y sal se colocó en fuego alto hasta que el agua alcanzó su punto de ebullición y se mantuvo en esta condición hasta el momento en que alcanzó su punto de ablandamiento. El operador de la estufa reconocía esta condición por tanteo, al aplicar presión sobre la yuca mediante el empleo de un tenedor de mesa. Es importante mencionar que en el desarrollo de la prueba en la estufa mejorada se siguió un procedimiento diferente al del fogón tradicional. En la estufa, el arroz se colocó en la hornilla principal (aquella donde la olla queda expuesta directamente al fuego), mientras que la yuca se colocó sobre una de las dos hornillas secundarias. Tan pronto como en la olla con arroz se evaporó completamente el agua, se trasladó a la hornilla terciaria en donde la menor intensidad de temperatura, le permitió lograr el punto óptimo de cocimiento sin que el arroz corriera el riesgo de quemarse. Por su parte, la olla con yuca se reubicó en la hornilla principal para acelerar su proceso de cocción.

La prueba se concluyó en el momento en que la yuca alcanzó su punto óptimo de ablandamiento. Se detuvo el cronómetro y se registró el tiempo transcurrido. Se retiraron las ollas de la estufa y se pesó en la balanza su contenido. En el caso de la olla con yuca, se pesó con el agua que aún permanecía en la misma. Se extinguió la leña que permanecía encendida y se retiró de la estufa, desprendiendo previamente los tizones de los extremos, y se colocaron en una bandeja. Se pesó la leña sobrante (incluida la parcialmente quemada). Se retiraron los tizones de la cámara de combustión y se pesaron junto con aquellos que se desprendieron de los extremos de los leños incinerados.

Se efectuaron tres repeticiones por familia, tanto en el fogón tradicional como en la estufa mejorada. Bailis (2004) ofrece una descripción pormenorizada de cada paso que debe seguirse en la ejecución del presente test.

Test de rendimiento de cocina (KPT)

En el campo se estableció el impacto real de la introducción del nuevo sistema de cocción sobre el consumo doméstico de leña, para lo cual, se evaluaron cualitativamente diferentes aspectos del funcionamiento de la nueva tecnología y se comparó cuantitativamente el consumo del nuevo sistema respecto al fogón tradicional (u otro tipo de estufa) en un contexto real de operación (Bailis, *et al.*, 2009). El evaluador no ejerció ninguna

injerencia sobre los aspectos que tienen que ver con la rutina normal de cocción, a fin de evitar situaciones artificiales.

En ausencia de datos previos que pudieran ser utilizados para definir un tamaño de muestra estadísticamente significativo, se optó por evaluar a 30 familias, lo cual se considera como la mínima cantidad recomendada para adelantar la prueba (Harvey y Tomas, 2011). Las familias no fueron escogidas aleatoriamente, sino que su participación se basó en la libre decisión de un grupo de beneficiarios que voluntariamente deseaban ser involucrados en el ejercicio de evaluación de consumo; ellos fueron informados de los requisitos y posibles complejidades a los que estarían abocados durante el periodo de duración de la prueba.

Una vez se decidió el tamaño de muestra, se eligió un enfoque pareado para el KPT, es decir las 30 familias participantes se evaluaron antes y después de la introducción de la estufa mejorada. Se definió un periodo de evaluación de 6 días con cada familia; 3 días evaluando los consumos del fogón tradicional y 3 días evaluando los consumos con la estufa mejorada. Para evaluar los consumos en cada familia se utilizó el siguiente procedimiento:

- El equipo de monitoreo definió el momento y el día en que se visitarían las familias participantes. Para evitar las alteraciones a la rutina diaria de las familias, se escogió el periodo de tiempo comprendido entre las 5 p.m. y las 7 p.m., debido a que en ese horario las familias ya se encuentran en sus hogares.
- Un día antes del inicio de la prueba, en cada familia se efectuó una visita en la que se preparó la leña para utilizarla en la jornada de cocción. Teniendo en cuenta consideraciones anteriores en experiencias de monitoreo, se concluyó que un arrume de leña de 20 kg es la medida adecuada para adelantar la prueba, de tal forma que garantice un sobrante que pueda ser pesado al final del día. El pesaje de la leña se efectuó con una báscula colgante electrónica de 50 kg de capacidad (Lexus, ref: Xenit) (figura 3a).
- Del arrume de leña se escogieron aleatoriamente cuatro palos, a los cuales se les midió la humedad con un medidor de humedad (GE-Protimeter, ref: Timbermaster). En cada leño se tomó un registro en tres puntos, cuyos resultados, posteriormente, se promediaron y consignaron en el formato de campo (figura 3b).
- Cada familia adecuó un espacio exclusivo para guardar la leña, de tal forma que no se mezclara con otro tipo de leña que no hubiese sido considerada para la prueba. Se instó a las familias para que solamente utilizaran la leña pesada para las labores de cocción del día siguiente.
- Al día siguiente, se visitó a la familia a la hora convenida y se pesó la leña sobrante, una vez se terminó de cocinar la última comida del día (figura 3c). El resultado se consignó en el formato de campo y se le preguntó al ama de casa el

número de comensales por cada comida del día, de acuerdo al género y edad, según lo establecido en la tabla 3.

Tabla 3. Categorización de comensales de acuerdo al género y la edad

Genero	Edad
Hombre	Entre 15 y 59 años
Mujer	Mayor de 14 años
Hombre	Mayor de 59 años
Niños	Menores de 14 años

- La categorización obedeció a la necesidad de determinar la fracción de adultos equivalentes por núcleo familiar, lo cual es indispensable para calcular el consumo de leña por persona.
- El procedimiento se repitió durante los tres días que duró la prueba, tanto en la primera fase (sin estufa mejorada) como en la segunda (con estufa mejorada). La prueba se efectuó de lunes a viernes y no se incluyeron los fines de semana con el objeto de evitar fuertes fluctuaciones en los consumos, como consecuencia de labores atípicas de cocción que usualmente se presentan en estos días (Bailis, *et al.*, 2009; Harvey y Tomas, 2011).

Resultados Y Discusión

Eficiencia térmica

El parámetro más importante del WBT es la eficiencia térmica que se define como la fracción de calor producida por el combustible que es transferida al cuerpo receptor (olla). Por tratarse de una medida adimensional, generalmente se expresa en valores de porcentaje. Para estufas masivas con capacidad para operar con más de dos ollas, esta métrica se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$h_c = \frac{[4,186 * (\sum_{j=1}^4 (P_{jci} - P_j) * (T_{jcf} - T_{jci})) + 2260 * W_{cv}]}{f_{cd} * LHV}$$

Donde: h_c = eficiencia térmica, P_{jci} = peso inicial de la olla j con agua, P_j = peso de la olla j , T_{jcf} = Temperatura final de la olla j con agua, T_{jci} = Temperatura inicial de la olla j con agua, W_{cv} = cantidad de agua evaporada, f_{cd} = cantidad de leña seca consumida y LHV = poder calorífico inferior.

En la tabla 4 se registran los resultados individuales de cada uno de los cinco ensayos del WBT realizados a la estufa FN y sobre los cuales se efectúa la discusión del resultado general de la prueba.



Figura 3. Test de rendimiento de cocina (KPT). (a) Peso inicial. (b) Registro del contenido de humedad. (c) Peso de la leña sobrante.

Entre la primera y segunda fase de monitoreo transcurrió un periodo aproximado de 45 días, tiempo en el que se construyó la estufa FN; en cada hogar participante, se facilitó el secado por un tiempo adecuado y se permitió la utilización para que el operador de la estufa (ama de casa) se familiarizara con su funcionamiento antes del inicio de la prueba.

En la fase de arranque en frío, la estufa FN logró una eficiencia de $14,2 \pm 1,3\%$, mientras que en la fase de arranque en caliente la eficiencia ascendió al $16,6 \pm 1,1\%$ (figura 4). Lo anterior es consecuente con lo reportado para estufas masivas, cuyo rendimiento es bajo cuando el encendido se hace en frío debido a que la mayor masa de la estufa retiene una mayor cantidad

Tabla 4. Resultados del WBT desagregado por fases

Fase	Métrica	Unidad	T1	T2	T3	T4	T5	$\bar{X}$	σ
Arranque en frío (Cold start)	Tiempo de ebullición olla No. 1	min	42	49	57	63	51	52,4	7,98
	Tasa de incineración	g/min	49	52	42	48	50	48,2	3,76
	Eficiencia térmica	%	16	13	15	13	14	14,2	1,30
	Consumo específico de combustible	g/L	168	201	195	236	195	199	24,32
Arranque en caliente (Hot start)	Tiempo de ebullición olla No. 1	min	32	26	34	39	32	32,6	4,67
	Tasa de incineración	g/min	63	69	55	50	56	58,6	7,44
	Eficiencia térmica	%	15	17	18	16	17	16,6	1,14
	Consumo específico de combustible	g/L	164	142	145	154	143	149,6	9,34
Fuego Moderado (simmering)	Tasa de incineración	g/min	37	37	37	31	40	36,4	3,29
	Eficiencia térmica	%	8	7	7	7	7	7,2	0,45
	Consumo específico de combustible	g/L	384	373	325	313	405	360	39,38

de energía térmica reduciendo la cantidad de calor transferible al cuerpo receptor. Una vez la estufa se encuentra caliente, la transferencia térmica aumenta y mejora la eficiencia del proceso (Bailis *et al*, 2007).

Sin embargo, la estufa tuvo un pobre desempeño en la fase de fuego moderado (*simmering*) dado que la eficiencia solo alcanzó un $7\pm0,4\%$, lo que significa que para labores de cocción de baja intensidad térmica, la estufa FN demandará una mayor cantidad de combustible para mantener una temperatura de referencia. La eficiencia térmica general de la estufa FN es del 15%, dado que se determina como el promedio logrado entre las fases de arranque en frío y arranque en caliente (DeFoort *et al*, 2009).

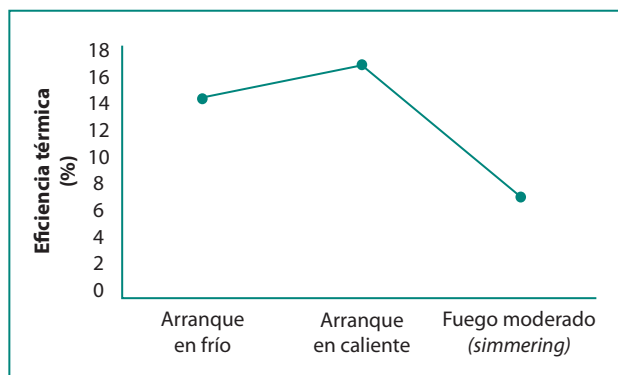
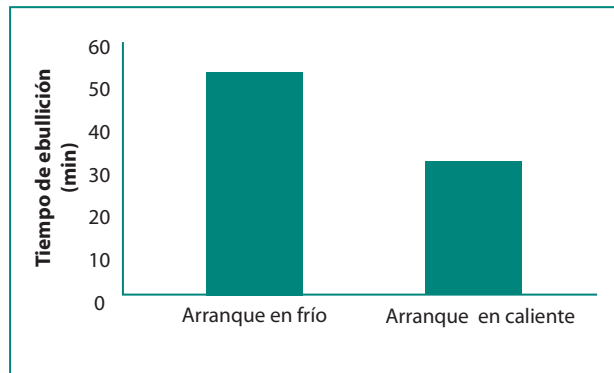


Figura 4. Eficiencia térmica en las tres fases del WBT.

Tiempo de ebullición

Se define como el tiempo que emplea la estufa en lograr que el agua de la olla principal alcance el punto de ebullición local. En la fase de arranque en frío, la estufa FN tardó en promedio $52,4\pm8$ minutos en conseguir este objetivo; mientras que en la fase de arranque en caliente el tiempo fue de $32,6\pm4,6$ minutos

en promedio (figura 5). Al efectuar la comparación de medias con la prueba *t-student*, se pudo establecer que existen diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% entre el tiempo que tarda en alcanzar el punto de ebullición entre ambas fases. Es decir, el tiempo de cocción de una determinada labor se reduce en un 37% si la estufa se utiliza en caliente.

Figura 5. Comparación del tiempo de ebullición entre las fases de arranque en frío (*cold start*) y caliente (*hot start*).

Tasa de incineración

Esta métrica se define como la cantidad de combustible (leña) consumido por el fuego, por unidad de tiempo. En la fase de arranque en frío, la tasa de incineración fue de $48,2\pm3,7$ g/min en promedio cifra que aumentó a $58,6\pm7,4$ g/min en la fase de arranque en caliente (figura 6). En consecuencia, una estufa ya caliente tiende a favorecer la turbulencia de la llama, lo que de paso contribuye a aumentar la velocidad de difusión en el resto del combustible. En la fase de fuego moderado (*simmering*), la tasa de incineración disminuyó a 36,4 g/min, un resultado lógico si se tiene en cuenta que un fuego bajo tiende a comportarse de forma laminar y con ello, la velocidad de difusión es menor.

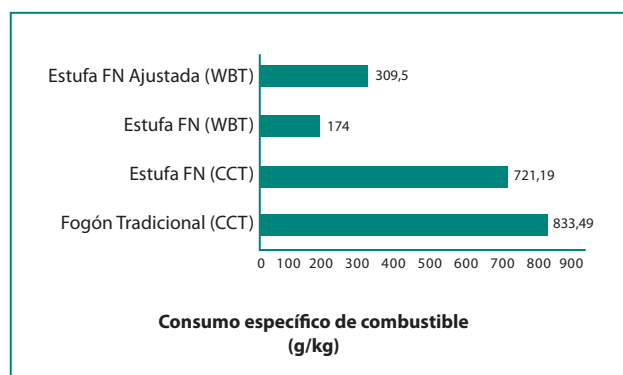


Figura 6. Tasa de incineración en las tres fases del WBT

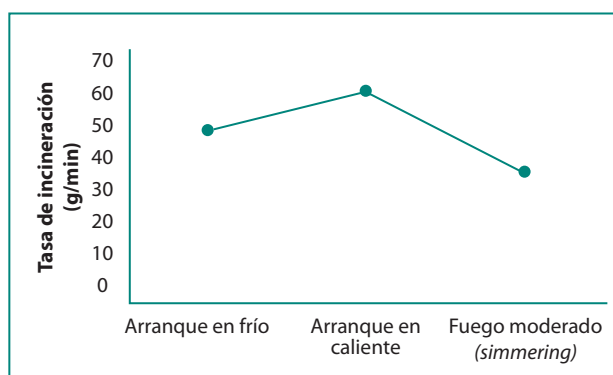


Figura 7. Comparación entre el consumo específico de combustible (SCF) logrado mediante el WBT y el CCT para la estufa FN y el fogón tradicional.

Consumo específico de combustible (SFC)

- El consumo específico de combustible en la WBT fue de $199 \pm 24,3$ g/L (equivalente a 199 g/kg) en la fase de arranque en frío y $149 \pm 9,3$ g/L (equivalente a 149 g/kg) en la fase de arranque en caliente. En la fase de fuego moderado (*simmering*), el consumo específico de combustible aumentó a $360 \pm 39,3$ g/L (figura 7). Al efectuar la comparación de medias con la prueba *t-student*, se constató que también existen diferencias estadísticamente significativas entre ambos resultados. Nuevamente, el desempeño de la estufa es mejor en un 25% cuando la labor se efectúa ya estando caliente, que iniciando completamente fría. De la misma manera que la eficiencia térmica, el SFC general se define como el promedio entre los resultados de la fase fría y caliente (174 g/L). El rendimiento en este aspecto decae en más de un 50% cuando la estufa funciona a fuego moderado, dado que el consumo se duplica respecto a las fases de alta intensidad térmica. En este sentido, se comprueba que existe una correlación que tiende a ser inversamente proporcional entre la eficiencia térmica y el consumo específico de combustible.
- En el segundo protocolo (CCT), esta métrica fue de $721,19 \pm 288$ g/kg para la estufa FN, lo que implica una diferencia de más del 360% entre las dos pruebas. Lo anterior, puede ser atribuido a las condiciones en que se ejecutó cada uno de estos protocolos. Mientras que en el WBT, la estufa fue evaluada al 100% de capacidad, es decir, las cuatro hornillas fueron ocupadas por ollas; en el CCT tan sólo se utilizaron dos hornillas dado que en la prueba solo se requerían dos ollas. Al efectuar el ajuste del WBT, considerando sólo dos hornillas, se encontró que el SFC aumenta a 309,5 g/kg con lo que la diferencia entre los dos protocolos se reduce a un 233% (figura 7).

Para determinar la eficiencia de la estufa bajo el CCT, también se midió el SFC de los fogones tradicionales utilizados por las 30 familias evaluadas, obteniéndose un valor promedio de $833,49 \pm 287$ g/kg (tabla 5). Efectuando la comparación de medias mediante la prueba *t-student*, se pudo establecer que existen diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%. En ese sentido la estufa FN consume un 13,4% menos de leña respecto al fogón tradicional cuando se ejecuta la misma labor de cocción.

Esta cifra resulta muy semejante a la hallada por el autor en una evaluación previa, en donde fueron medidos los consumos específicos de tres prototipos de la estufa FN y comparados contra un fogón tradicional, obteniéndose una diferencia del 14,66% (Aristizabal, 2010).

No obstante, es importante mencionar que al efectuar una evaluación desagregada por núcleo familiar, se pudo constatar que en el 23% de los hogares, el fogón tradicional superó en rendimiento a la estufa FN con valores que fluctuaban entre el 3% al 29%. En contraste, el restante 77% de los hogares evaluados presentaron rendimientos en favor de la estufa FN que oscilaron entre el 3% y el 78%. Lo anterior es el reflejo de la heterogeneidad relacionada con el diseño mismo de los fogones tradicionales en cada hogar participante. Algunos fogones presentaban diseños artesanales en donde el fuego se encontraba semiconfinado, mientras que en otros quedaba completamente expuesto al aire, lo cual tiene un impacto directo en la transferencia térmica del sistema y consecuentemente, en la eficiencia del mismo.

Tabla 5. Resultados del CCT y del consumo de leña (KPT) por familia antes y después del uso de la estufa FN

FAMILIA	CCT		Consumo de leña	
	SCF fogón (g/kg)	SCF estufa FN (g/kg)	Fogón tradicional (kg/persona/día)	Estufa FN (kg/persona/día)
1	1124	1040	3,30	3,87
2	1129	1035	6,39	4,13
3	852	1082	5,58	4,67
4	1055	952	2,58	2,62
5	1450	966	3,86	3,03
6	789	864	4,83	3,22
7	741	851	3,94	4,23
8	1016	657	4,69	2,82
9	966	909	2,90	2,54
10	1066	573	6,90	3,23
11	1224	943	4,54	3,74
12	664	706	13,65	12,68
13	1121	909	3,09	4,89
14	917	655	8,63	4,15
15	714	599	2,72	3,01
16	703	605	2,88	3,48
17	844	694	3,15	4,24
18	679	847	4,09	3,32
19	785	193	2,92	2,92
20	662	577	4,30	4,28
21	630	482	1,41	1,78
22	490	335	6,66	6,14
23	562	788	7,28	6,08
24	539	706	2,43	3,82
25	457	298	2,08	2,96
26	490	484	2,31	1,75
27	773	688	7,57	2,08
28	696	657	7,63	5,93
29	979	822	3,07	2,70
30	887	719	3,87	3,18
PROMEDIO	833,49	721,19	4,64	3,92

Consumo de leña

El impacto real de un nuevo sistema de cocción en el consumo de leña doméstico, sólo puede ser evaluado a partir de la variación en los patrones de consumo de este recurso. El estudio cuantitativo del KPT adelantado en las 30 familias participantes, tanto antes como después de la introducción de la nueva estufa, no arrojó un resultado concluyente respecto a los potenciales ahorros de leña debido a la alta variabilidad de los resultados entre hogares, que se presentan en la tabla 5. Lo anterior, se debe a la alta dispersión de los datos obtenidos, los cuales fluctuaron entre valores negativos (es decir, familias donde el consumo de leña aumentó con la introducción de la nueva estufa) y positivos (donde la estufa FN demostró un menor consumo por persona respecto al fogón tradicionalmente usado). El consumo promedio en el escenario de referencia (fogón tradicional) fue de $4,64 \pm 2,5$ kg/persona/día, mientras que con el uso de la estufa FN, el consumo se redujo a $3,92 \pm 2$ kg/persona/día. Los coeficientes de variación para cada escenario (consumo de leña antes y después de la implementación de la estufa) fueron del 55% y 51% respectivamente, y coinciden con lo señalado por (Bailis *et al.*, 2009) respecto a la variabilidad de los datos.

Para evaluar la normalidad de las observaciones, se utilizó la prueba de Shapiro – Wilks y se encontró que los resultados obtenidos no respondían a una distribución normal. Bajo esas circunstancias, se recurrió a la prueba de contraste de Wilcoxon con el propósito de establecer diferencias entre las medianas calculadas para ambos tratamientos. El análisis arrojado por este método encontró diferencias estadísticamente significativas entre ambos parámetros con un nivel de confiabilidad del 95%. Lo anterior significa que para la muestra evaluada, una reducción del consumo de $0,54$ kg/persona/día refleja con mayor grado de certidumbre los ahorros potenciales de leña por el uso de la estufa FN en comparación con los sistemas de cocción tradicionales, lo que equivale a una disminución del uso de este recurso en un 11,6%.

Comparación y análisis entre protocolos

La eficiencia térmica de la estufa FN calculada a partir de la implementación del WBT, indica que este sistema de cocción tiene el potencial de transferir el 15% de la energía liberada en el proceso de combustión de la leña hacia los cuerpos receptores. Si se asume que la eficiencia térmica promedio de un fogón tradicional es de aproximadamente un 10%, entonces la estufa FN es un 33% más eficiente que el sistema tradicional. Lo anterior implica que por cada kilogramo de leña utilizado en el fogón tradicional para realizar una determinada labor de cocción, la estufa FN solo requerirá $0,67$ kg para ejecutar la misma tarea.

Sin embargo, esta diferencia en la eficiencia térmica lograda con el WBT contrasta significativamente con la diferencia del

consumo específico de combustible entre el fogón tradicional y la estufa FN arrojada por el CCT (13,4%), lo que puede ser explicado por el hecho que en el WBT se utilizaron las cuatro hornillas (100% de la capacidad instalada), mientras que en el CCT tan solo se utilizaron dos (50% de la capacidad instalada). Bajo estas circunstancias, es presumible que el concepto de “economías de escala” en el consumo de leña puede ser aplicable en la medida en que la estufa pueda ser utilizada a plena capacidad.

Por otro lado, el ahorro promedio en el consumo de leña logrado por el KPT como indicador proxy de la eficiencia de la estufa, sólo representa una tercera parte de la eficiencia térmica obtenida con el WBT. Lo anterior parece ratificar una afirmación ampliamente extendida en el ámbito de la evaluación de la eficiencia de los sistemas de cocción: no existe correlación entre la eficiencia lograda bajo condiciones controladas y aquella que puede ser medida bajo condiciones reales de campo con el KPT (Lee *et al.*, 2013; Bailis *et al.*, 2007). Notablemente, se observa una mayor afinidad entre la diferencia detectada para el consumo específico de combustible con el CCT y la diferencia entre consumos de leña derivada del KPT (13,4% y 11,6%, respectivamente). Esta similitud entre resultados puede obedecer a que el CCT ejecutado en esta investigación fue conducido de forma semicontrolada, es decir, aspectos como la operación de la estufa y el tipo de leña utilizada fueron manejados de manera más flexible que se asemejan más al KPT y que distaban de la manera controlada con la que usualmente se hace dicho test. Sin embargo, esta similitud sólo resulta anecdótica si se considera que el resultado encontrado con el KPT no fue concluyente.

Conclusiones

- La eficiencia térmica calculada para la estufa mejorada de leña FN con el test de ebullición del agua (WBT) fue del 15% promediando los resultados de las fases de arranque en frío (*cold start*) y arranque en caliente (*hot start*). En la fase de fuego moderado (*simmering*) sólo alcanzó un 7% de eficiencia. Esta eficiencia representa un mejoramiento en el uso del combustible (leña) del 33% respecto a un fogón o estufa tradicional.
- El test de cocción controlada (CCT) implementado en 30 familias indica que la eficiencia, expresada en función del consumo específico de combustible (SCF) tuvo un mejoramiento del 13,4% respecto a la estufa / fogón tradicional.
- La reducción del consumo de leña del 11,6% mediante el test de rendimiento de cocina (KPT), no resulta ser concluyente, dado que el tamaño de muestra utilizado (30 hogares) probó ser insuficiente para demostrar que los datos de consumo de leña promedio por familia eran estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95%. Dado el alcance de la presente investigación, no se evaluó si el efecto de “demanda reprimida” tuvo alguna incidencia en la

variabilidad de los resultados, particularmente de aquellos donde se presentaron valores negativos. Bajo este concepto, una familia que antes del uso de la estufa FN estaba limitada a utilizar una determinada cantidad de leña que probablemente no satisfacía todas sus necesidades energéticas de cocción, con la nueva estufa, podría solventar dichas necesidades a expensas del aumento del consumo de leña. Una definición más amplia de este concepto y ejemplos que ilustran con mayor detalle dicho término pueden encontrarse en Battye *et al.* (2011)

- La comparación de consumos ex-ante/ex-post podría tener un efecto perturbador en el resultado cuando se coteja un hogar en donde el número de comensales varía ostensiblemente entre días durante el periodo de duración de la prueba. Se requiere de evaluaciones adicionales para profundizar con mayor detalle en este aspecto y corroborar dicha afirmación.
- Es necesario aumentar el esfuerzo de muestreo para obtener un resultado robusto que ratifique o impugne el dato obtenido del KPT.
- No se encontró relación alguna entre la disminución teórica del consumo de leña obtenida con el WBT respecto a la reducción del consumo obtenida mediante medición directa en campo con el KPT. Tampoco parece existir relación entre el WBT y el CCT a pesar de ser pruebas realizadas bajo condiciones muy similares y en donde no debería existir una gran variabilidad en la reducción del consumo de leña, expresado en términos de eficiencia térmica o consumo específico de combustible.

Bajo este panorama debe ser objeto de debate, la conveniencia de utilizar uno u otro método para determinar los ahorros de leña que se consiguen, cuando una estufa mejorada es introducida en un ambiente real de cocción.

Referencias

Adkins, E., Tyler, E., Wang, J., Siriri, D., Modi, W. (2010). Field testing and survey evaluation of household biomass cookstoves in rural sub-Saharan Africa. *Energy for sustainable development*. 14(3), 172 – 185. ISSN 0973-0826

Aristizabal, J. (2010). Estufas mejoradas y bancos de leña: una alternativa de autoabastecimiento energético a nivel de finca para comunidades dependientes de los bosques de roble de la Cordillera Oriental. *Colombia Forestal*. 13(2), 245 – 256. ISSN 0120-0739

Bachmann, J. (2009). *Black carbon: A science/policy primer*. Arlington: Pew Center of Global Climate Change. 45 p. Recuperado de <http://www.c2es.org/docUploads/black-carbon-12-16-09.pdf>

Bailis, R. (2014). *Controlled Cooking Test* [En línea]. Version 2. Recuperado de http://ehs.sph.berkeley.edu/hem/content/CCT_Version_2.0_with_appendix5_Aug2004a.

Baillis, R, Verrueta, V., Chengappa, C., Dutta, K. (2007). Performance testing for monitoring improved biomass stove interventions: experience of the Household Energy and Health Project. *Energy for sustainable development*. 11(2), 57 – 69. ISSN 0973-0826

Bailis, R., Kirk R., y Rufus E. (2014). *Kitchen Performance Test*. Recuperado de http://ehs.sph.berkeley.edu/hem/content/KPT_Version_3.0_Jan2007a.pdf.

Battye, W., Gavalão, M., Grapeloup, M. y Yann François, Y. (2011). *Suppressed demand and the carbon markets: Does development have to become dirty before it qualifies to become clean*. Aubagne (France): GERES – CDC Climat, 48 p. Recuperado de <http://www.geres.eu/images/publications/a-report-suppressed-demand.pdf>

Bryden, M., (2005). *Design principles for wood burning cookstoves*. Cottage Grove, OR (USA): Aprovecho Research Center. 38p. Recuperado de file:///C:/Users/andrea/Downloads/principles-wbcs.pdf

Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). *Inventario nacional de fuentes y liberaciones de dioxinas y furanos en Colombia: Línea base 2002*. Bogotá: MinAmbiente – GEF- BM – UNDP . 102 p. ISBN 978-958-97978-5-3

Departamento Nacional de Estadística. (2009). *Encuesta de Calidad de Vida 2008*. Bogotá: DANE, Anexo, cuadro 14 (archivo Excel). Recuperado de http://www.dane.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=487&Itemid=66

DeFoort, M., DeFoort, C., L'Orange y Kreutzer, C. (2014) *Stove Manufacturers Emissions & Performance Test Protocols* (EPTP) Recuperado de <http://www.cleancookstoves.org/our-work/standards-and-testing/learn-about-testing-protocols/protocols/downloads/eptp-protocol.pdf>.

Global Alliance For Clean Cookstoves. ISO (2014). *international workshop agreement: Guidance for clean cookstoves* Recuperado de. <http://www.vrac.iastate.edu/ethos/files/ethos2013/Lecture%20Hall/Saturday%20AM/Review%20of%20ISO%20International%20Workshop%20Agreement%20Cookstove%20Guidance.pdf>.

Harvey, A. y Tomas, A. (2011) *Guidelines for field performance tests of energy savings devices and kitchen performance tests (FTs – KTs)*. Oxford (UK): ClimateCare, 20 p.

Kissinger, G. Herold, M. y De Sy, V. (2012). *Drivers of deforestation and forest degradation: A synthesis report for REDD + policymakers*. Vancouver: Lexeme consulting, 46 p. Recuperado de https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/66151/Drivers_of_deforestation_and_forest_degradation.pdf

Larsen, B. (2004). *Cost of environmental damage: A socio-economic and environmental health risk assessment*. Final report. Bogotá: Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 71 p.

Lee, C.M., Chandler, C., Lazarus, M. and Johnson, F.X. (2013). *Assessing the climate impacts of cookstoves projects: Issues in emissions accounting*. Stockholm: Stockholm Environment Institute (SEI) 25 p. Recuperado de http://sei-us.org/Publications_PDF/SEI-WP-2013-01-Cookstoves-Carbon-Markets.pdf

MacCARTHY, N., Still, D., Damon Ogle, D. y Douin, T. (2008). *Assessing cookstoves performance: Field and lab studies of three rocket stoves comparing the open fire and traditional stoves in Tamil Nadu, India on measures of time to cook, fuel use, total emissions and indoor air pollution*. Cottage grove, OR (USA): Aprovecho Research Center, 18 p. Recuperado de <file:///C:/Users/andrea/Downloads/assessing-tamil-nadu.pdf>

The Water Boiling test. Version. 4.2.2. (2014). Recuperado de <http://www.aprovecho.org/lab/pubs/testing>.

World Health Organization. (2006). *Fuel for life*. Geneve: WHO. 42 p. ISBN 978-92-4-156316-1