



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



**Programa Paisajes de Conservación**

**PROGRAMA PAISAJES DE CONSERVACIÓN  
CONTRATO DE PRESTACION DE SERVICIOS No. US-447**

<b>NOMBRE DEL CONTRATISTA</b>	GREGORIO ORLANDO PORRAS REY
<b>OBJETO DEL CONTRATO</b>	Prestar servicios profesionales para el desarrollo de un modelo analítico del funcionamiento físico de la estufa eficiente que viene desarrollando Patrimonio Natural. Este modelo servirá para estudiar los efectos de modificaciones que busquen mejorar la eficiencia térmica de la estufa, y para evaluar alternativas de diseño y materiales
<b>FECHA DE INICIO DEL CONTRATO</b>	8 octubre de 2015
<b>FECHA DE TERMINACION DEL CONTRATO</b>	15 diciembre de 2015
<b>PERIODO DE PRESENTACION DEL INFORME</b>	Diciembre de 2015



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



---

## Programa Paisajes de Conservación



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



---

## Programa Paisajes de Conservación

# MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO DE LAS ESTUFAS EFICIENTES MEDIANTE ANÁLISIS DE INGENIERÍA

## REPORTE FINAL

Presentado a:

PATRIMONIO NATURAL

Presentado por:

G. ORLANDO PORRAS REY

Ingeniero Mecánico, Ph.D.

Consultor en Energía, Simulación Computacional de Productos, Sistemas y Procesos.

Bogotá, Colombia. 23 de diciembre de 2015



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



---

## Programa Paisajes de Conservación



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



## Programa Paisajes de Conservación

### Contenido

1. Introducción.....	7
2. Caracterización Experimental .....	9
2.1. Generalidades.....	9
2.2. Instrumentación y adquisición de datos .....	11
2.3. Eficiencia térmica.....	11
2.4. Temperaturas .....	12
2.5. Consumo de madera .....	16
2.6. Interpretación de los resultados .....	17
3. Modelo Analítico.....	20
3.1. Principios generales.....	20
3.2. Estructura del modelo .....	20
3.3. Análisis de las estufas .....	24
3.4. Implementación del modelo en Excel .....	25
4. Recomendaciones de Modificación del Diseño Actual.....	27
4.1. Reducción de la inercia térmica de las estufas.....	27
4.2. Mejoras en la transferencia de calor hacia las ollas.....	28
4.3. Aislamiento térmico .....	33
4.4. Manejo de cenizas .....	35
4.5. Geometría de la estufa .....	36
4.6. Control del flujo de aire.....	37
4.7. Presecado de la madera combustible .....	37
5. Alternativas de Materiales y Procesos de Fabricación .....	38
5.1. Materiales aislantes.....	38
5.2. Losa de la hornilla.....	38
5.3. Estructura .....	39
5.4. Cámara de combustión.....	40
5.5. Chimenea.....	40
6. Conclusiones .....	41
7. Anexos.....	42



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA




---

## Programa Paisajes de Conservación

7.1.	Prueba preliminar de las estufas .....	42
7.2.	Reportes de las pruebas de ebullición de agua (WBT) .....	45
7.3.	Consumo de madera de todas las pruebas .....	57
7.4.	Temperaturas y humedad relativa durante todas las pruebas .....	61
7.5.	Modelo analítico detallado .....	73
8.	Glosario de términos .....	78



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



## Programa Paisajes de Conservación

### 1. Introducción

De acuerdo con las conversaciones sostenidas con María Lucía Osorno y Lina López de la ONG *Patrimonio Natural* y con base en algunos documentos compartidos por ellas, esta organización viene trabajando en el desarrollo de soluciones apropiadas de estufas eficientes en el contexto local nacional. En Colombia cerca de dos millones de personas, gran parte de ellas viviendo bajo la línea nacional de pobreza, usan la leña como principal fuente de energía. Las estufas artesanales, que son ineficientes y generan degradación de la calidad del aire interior de las viviendas con gases de combustión y material particulado, tienen grandes efectos negativos en la salud humana y generan un costo enorme para el país. Por otro lado, están en el centro de la generación, así como de la mitigación, de impactos ambientales tales como las emisiones de gases a efecto invernadero y el uso insostenible de leña en los bosques.

Dentro de las dimensiones técnica y económica, algunos problemas identificados son:

- No se ha desarrollado un mercado sostenible y los pocos proyectos realizados para promover las estufas eficientes se han basado en grandes subsidios.
- Las estufas de biomasa convencionales disponibles localmente tienen una eficiencia térmica muy baja, de alrededor del 13%, debido a su diseño multifuncional. El modelo de estufa eficiente desarrollado por *Patrimonio Natural* no cuenta con certificaciones técnicas y su eficiencia se ha estimado preliminarmente cercana a 25% que contrasta con valores del orden del 40% reportados en la literatura internacional para equipos similares.
- El costo de las estufas en Colombia es muy alto, cercano a los USD 400 y aumenta hasta los USD 700 cuando se adicionan los costos de transporte.
- Los materiales y diseños no han tenido en cuenta el contexto cultural y ambiental de las diversas regiones colombianas, dificultando el proceso de adopción de esta tecnología.

En este escenario se han formulado una serie de necesidades para fortalecer el contexto de las estufas eficientes en Colombia, dentro de las cuales se destacan:

- Reducir los costos locales de producción y distribución de soluciones de estufas eficientes.
- Abordar la temática socio-cultural y ambiental de las diferentes regiones de Colombia a la hora de desarrollar tecnologías para así garantizar altos niveles de apropiación en las comunidades.
- Realizar procesos de evaluación y certificación de las soluciones de estufas eficientes existentes y futuras que garanticen la reducción efectiva de emisiones y del consumo de leña.

Frente a la situación descrita aquí, se propuso desarrollar el proyecto denominado *Mejoramiento de las Estufas Eficientes Mediante Análisis de Ingeniería* que busca aportar herramientas para la solución a una parte de estos problemas y retos desde una perspectiva técnica. El propósito preciso del proyecto se sintetiza en los siguientes objetivos específicos:

- I. Una caracterización experimental del funcionamiento de cada uno de los dos (2) prototipos de las estufas eficientes de Patrimonio Natural para calibrar y validar el modelo analítico del objetivo específico II. La prueba es la estándar de ebullición de agua (Water Boiling Test) con unas medidas adicionales de temperatura en puntos críticos para el modelo indicado a continuación.



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



## Programa Paisajes de Conservación

- II. Un modelo físico analítico para estimar la eficiencia térmica de la estufa con base en la geometría, las condiciones de operación, la configuración física y los materiales usados en su fabricación. El modelo se presentará como una hoja de cálculo en Microsoft Excel para que sea fácil de usar más adelante por parte de usuarios no especialistas
- III. La propuesta de una serie de recomendaciones de modificación del diseño actual de las estufas eficientes probadas destinadas a mejorar su eficiencia térmica sin complicar excesivamente su manufactura ni aumentar significativamente su costo de producción mediante la aplicación de la herramienta del objetivo específico II.
- IV. La propuesta de una serie de alternativas de materiales y procesos de fabricación para que las estufas eficientes se adapten mejor a las capacidades artesanales, las herramientas y los materiales disponibles en diversas regiones colombianas.

El presente documento reporta los resultados finales del proyecto. Inicialmente, en el capítulo 2, se presenta los resultados de la caracterización experimental tanto en lo referente a la eficiencia térmica de las estufas como a las temperaturas en diversos puntos. El capítulo 3 se dedica a introducir un modelo analítico que permite estudiar el funcionamiento de las estufas. Finalmente se reporta la implementación del modelo en una hoja electrónica de Excel. El capítulo 4 establece unas recomendaciones para mejorar el diseño actual de las estufas basadas en el modelo analítico. El capítulo 5 presenta alternativas de materiales y procesos de manufactura que podrían adaptar aún más el diseño de las estufas a los recursos materiales y técnicos regionales mejorando su adopción por parte de los fabricantes y usuarios finales. El capítulo 6 sintetiza las conclusiones más importantes de este trabajo. El capítulo 7 contiene una serie de anexos que detallan algunas partes extensas que no conviene colocar en el cuerpo central del documento porque perjudican su legibilidad. Por último, el capítulo 8 es un glosario de términos técnicos para el lector no especializado.

## Programa Paisajes de Conservación

### 2. Caracterización Experimental

#### 2.1. Generalidades

Dos prototipos diferentes de estufas eficientes fueron facilitados por Patrimonio Natural para el desarrollo del proyecto (Figura 1). Una de ellas es una estufa de un fogón sin chimenea apropiado para las condiciones en climas cálidos donde la cocina normalmente es un espacio adyacente a la vivienda con un techo y encerramientos muy porosos que facilitan la ventilación. La otra es una estufa de un fogón y plancha con chimenea más adecuada para los climas fríos donde típicamente la cocina es un espacio más cerrado e interno a la vivienda donde se requiere del ducto de evacuación para evitar que los gases de la combustión y el material particulado generados durante la cocción contaminen el ambiente interior.



Figura 1. Dos prototipos de estufas eficientes de Patrimonio Natural. Izq. Estufa de un fogón sin chimenea; der. Estufa de un fogón y plancha con chimenea.

La primera tarea fue el ensamblaje de las estufas, pues estas venían originalmente en partes separadas (Figura 2). Esta tarea tomó en cada caso unos 45 minutos a una persona sola y el procedimiento de la guía de ensamblaje fue muy fácil de seguir.



Figura 2. Partes separadas de los dos prototipos de estufa.

Ambas estufas fueron ensayadas siguiendo la parte de eficiencia térmica del protocolo de la *Prueba de Ebullición de Agua* o WBT, de su sigla en inglés, versión 4.2.3 del 19 de marzo de 2014, de común acuerdo



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



## Programa Paisajes de Conservación

con el representante de Patrimonio Natural para este proyecto. Adicionalmente se incluyó la medición de temperaturas en diferentes puntos clave de las estufas que permite caracterizar la transferencia de calor. No se hizo ningún tipo de medición de las emisiones de gases ni del material particulado generado por las estufas durante su funcionamiento.

Siguiendo las instrucciones del protocolo WBT, ambas estufas fueron encendidas y usadas en una prueba preliminar de alta potencia para la ebullición de 5 litros de agua con un arranque en frío. Estas pruebas permitieron estimar los tiempos de los ensayos y la cantidad de madera requerida, así como el aprendizaje del uso adecuado por parte del operador de tal forma que las pruebas definitivas fueran efectivas y representativas. El detalle de estas pruebas se encuentra en la sección 7.1 de este documento.

Para la realización de las pruebas definitivas se ejecutaron sistemáticamente los siguientes pasos:

- i. Instalación de la estufa en un lugar al aire libre pero resguardado de las corrientes de viento y cubierto en caso de lluvia.
- ii. Pesaje de los paquetes de madera para las tres etapas de las pruebas. Incluso se pesó leña a leña para tomar un registro preciso de la forma como se alimenta la leña a la estufa.
- iii. Toma de muestras de madera de cada paquete en empaques herméticos marcados para posterior determinación de su contenido de humedad en un equipo de laboratorio.
- iv. Ensamble del sistema de amplificación de termopares, el microcontrolador, el sensor de temperatura y humedad ambientales, y el computador. Este último permitió observar en tiempo real los valores registrados por el sistema de adquisición de datos.
- v. Calibración de los termopares y del correspondiente sistema de amplificación mediante el uso de baños de hielo y agua en equilibrio térmico para una temperatura de 0°C y agua caliente en un recipiente adiabático. Las temperaturas fueron verificadas mediante un termómetro de bulbo de alcohol que ordinariamente es más preciso y exacto.
- vi. Instalación de los termopares en los puntos críticos predefinidos para cada tipo estufa.
- vii. Ubicación de la balanza de 10 kg con una resolución de 1 g en un lugar adecuado aledaño a la estufa.
- viii. Ejecución del protocolo WBT en sus tres fases: alta potencia con arranque en frío, alta potencia con arranque en caliente, y baja potencia. Se adicionó el registro manual de la alimentación de madera.
- ix. Desmontaje de todos los sistemas indicados arriba.
  - x. Almacenamiento de la estufa bajo techo para impedir daños o exposición a la intemperie.
  - xi. Descargue de los datos de la memoria flash microSD al computador.
  - xii. Medición de la humedad de las muestras recogidas de cada paquete de madera.
  - xiii. Diligenciamiento de la hoja de cálculo en Excel asociada al protocolo WBT.
  - xiv. Procesamiento de la información adicional de temperaturas recolectada.

En total se realizaron cuatro pruebas sobre las estufas, dos para cada tipo, como reporta la *Tabla 1*. Se puede observar que las estufas se probaron bajo condiciones ambientales correspondientes a los

## Programa Paisajes de Conservación

extremos de climas frío y caliente cubriendo buena parte de las condiciones de uso posibles de las estufas en el territorio colombiano.

No.	Fecha	Lugar	Altitud (m)	Madera	Estufa	Temperatura ambiental (°C)	Humedad relativa ambiental (%)
1	04/12/2015	Cajicá, Cundinamarca	2561	Eucalyptus Globulus	Un fogón sin chimenea	15	63
2	11/12/2015	Cajicá, Cundinamarca	2561	Eucalyptus Globulus	Un fogón y plancha con chimenea	14	45
3	28/12/2015	Flandes, Tolima	287	Gliricidia Sepium	Un fogón sin chimenea	29	33
4	29/12/2015	Flandes, Tolima	287	Eucalyptus Globulus	Un fogón y plancha con chimenea	39	27

Tabla 1. Pruebas realizadas siguiendo el protocolo WBT.

### 2.2. Instrumentación y adquisición de datos

La instrumentación consistió en termopares tipo K, algunos para temperaturas hasta de 250°C fueron usados para colocar entre el agua de las ollas y para las superficies externas de las estufas, y otros para temperaturas hasta de 800°C (SEN0139) se instalaron para medir los gases de combustión y las superficies internas de las estufas. La amplificación de los voltajes se realizó mediante una tarjeta de circuito impreso (PCB) universal basada en el integrado AD595AQ. La adquisición de los datos se hizo a través de un multiplexor de ocho canales CD4051BE comandado por un microcontrolador Arduino Duemilanove (Figura 3). El registro de los datos se hizo en una tarjeta de memoria flash microSD manejada por el microcontrolador. Adicionalmente se usó la tarjeta DHT11 para la medición de temperatura y humedad relativa ambientales conectada igualmente al Arduino. Los datos se registraron cada cinco segundos a lo largo de todas las pruebas.

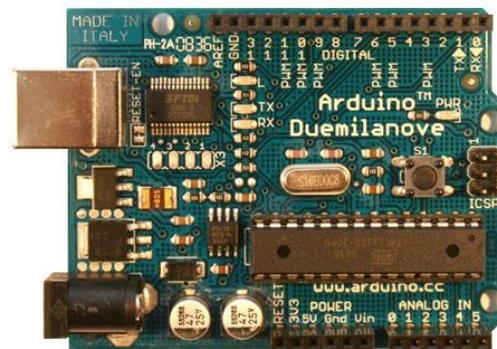
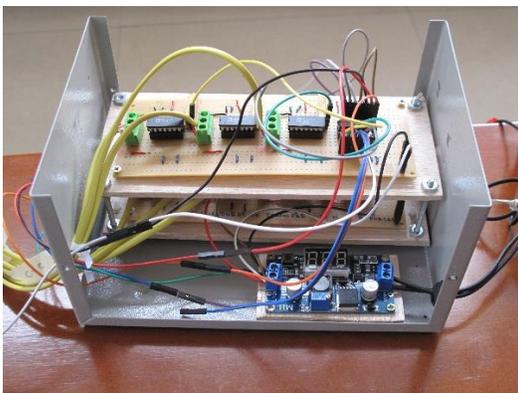


Figura 3. Electrónica analógica y digital usada en la amplificación de las señales eléctricas y en la adquisición y registro de los datos de temperatura. Izq. tarjeta de circuito impreso universal con los amplificadores AD595AQ y el multiplexor CD4051BE; der. Microcontrolador Arduino Duemilanove<sup>1</sup>.

### 2.3. Eficiencia térmica

<sup>1</sup> Imagen tomada de <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDuemilanove>



## Programa Paisajes de Conservación

De acuerdo con los resultados de los cálculos de la hoja electrónica que acompaña el protocolo WBT, presentados detalladamente en la sección 7.2 de este documento, las eficiencias y potencias térmicas desarrolladas por las dos estufas en las tres etapas de las pruebas se resumen en la Tabla 2.

Es importante aclarar que se seleccionaron las maderas usadas como combustibles del menú desplegable que trae incluida la hoja electrónica, y consecuentemente sus propiedades, en lugar de proveer los valores medidos en pruebas solicitadas por Patrimonio Natural a diversas maderas usadas en Colombia pues únicamente se cuenta con el valor del poder calorífico superior (HHV), faltando el poder calorífico inferior o neto (LHV) que es indispensable.

Tipo de Estufa	Prueba No.	Clima	EFICIENCIA TÉRMICA (%)			POTENCIA TÉRMICA (kW)		
			Alta Potencia		Baja Potencia	Alta Potencia		Baja Potencia
			Arranque en frío	Arranque en caliente		Arranque en frío	Arranque en caliente	
Un fogón sin chimenea	1	Frío	17	20	17	6.47	5.84	3.34
	3	Cálido	22	13	47	3.5	5.31	1.49
Un fogón y plancha con chimenea	2	Frío	6	7	10	7.26	7.09	7.04
	4	Cálido	11	10	ND	6.79	7.89	ND

Tabla 2. Eficiencia y potencia térmicas medidas en las pruebas de ebullición de agua (WBT) para los dos tipos de estufa. La información para la baja potencia de la prueba No.4 no se reporta ya que hubo problemas durante el ensayo.

### 2.4. Temperaturas

La temperatura del agua dentro de las ollas se midió mediante termopares de inmersión como lo ilustra la Figura 4, y en correspondencia con las recomendaciones del protocolo de la prueba de ebullición de agua.

Por otro lado, las estufas fueron instrumentadas con termopares en varios puntos clave que permiten luego estudiar asuntos como la transferencia de calor, la efectividad del calentamiento del agua en las ollas, y las pérdidas de energía. La Figura 5 muestra la localización de los termopares en el cuerpo principal de la estufa mientras que la Figura 6 ilustra el detalle del montaje realizado. Unos minutos antes de iniciar cada prueba todos los termopares se introdujeron en un baño termostático de hielo y agua (aproximadamente 0°C) y en un baño de agua caliente de temperatura conocida mediante un termómetro de bulbo de alcohol para efectos de su calibración.

En el caso de la estufa de fogón y plancha con chimenea se instaló un termopar adicional de alta temperatura dentro del ducto rectangular que conduce los gases bajo la plancha antes que lleguen a la chimenea (Figura 7). Esta medición permite estimar la cantidad de calor que los gases de combustión entregan a la olla en el fogón antes de llegar a la plancha.

La Figura 8 muestra un ejemplo de evolución de las temperaturas de los gases de combustión y las superficies dentro del cuerpo de la estufa de un fogón sin chimenea.

En la Figura 9 se presenta como ejemplo de los resultados experimentales una comparación de la evolución de temperatura del agua en la olla para la estufa de un fogón sin chimenea en las dos etapas de alta potencia de la prueba realizada en clima frío.



## Programa Paisajes de Conservación



Figura 4. Termopares de inmersión colocados dentro del agua en las ollas.

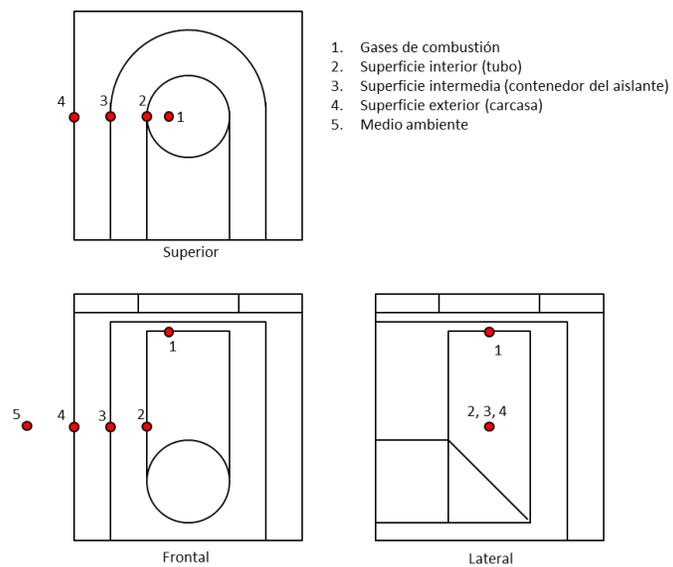


Figura 5. Esquema de la localización de los termopares en el cuerpo principal de las estufas en sus tres vistas principales.

## Programa Paisajes de Conservación



Figura 6. Fotografías del detalle de la localización de los termopares en las estufas. Arriba izq.: superficie interna (tubo); arriba der.: gases de combustión, superficie intermedia; abajo: superficie externa.



## Programa Paisajes de Conservación



Figura 7. Termopar de alta temperatura (hasta 800°C) instalado bajo la plancha de la estufa que tiene un fogón y plancha con chimenea. Izq.: localización general; der.: detalle de la punta del termopar apoyada sobre un trozo de roca volcánica para mantenerla erguida y mejorar la medición de la temperatura de los gases de la combustión.

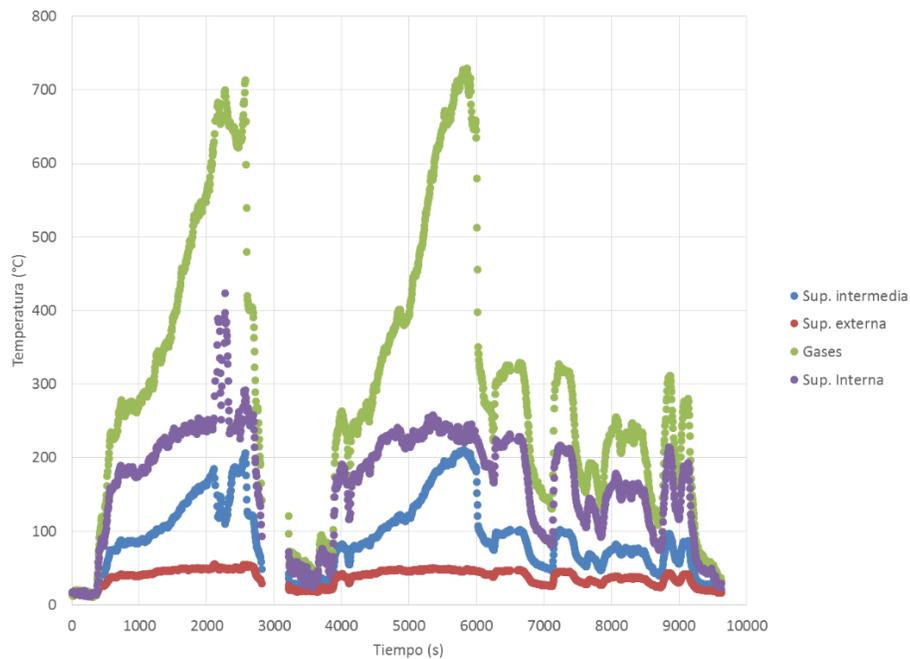


Figura 8. Evolución de las temperaturas de las superficies del cuerpo de la estufa y los gases de combustión durante las tres etapas de la prueba No. 1 en clima frío.



## Programa Paisajes de Conservación

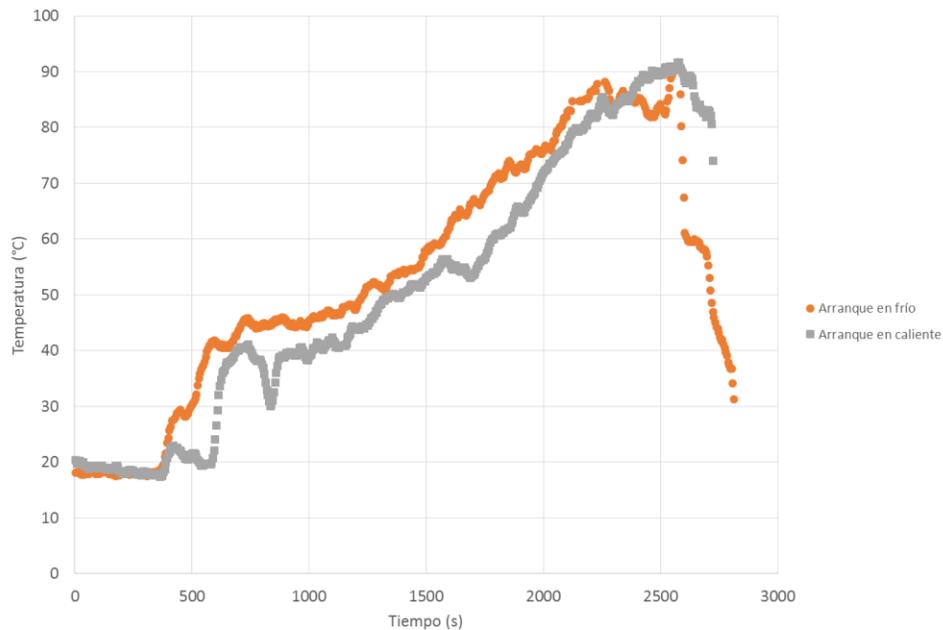


Figura 9. Ejemplo de la evolución de la temperatura del agua en la olla durante las etapas de alta potencia con arranque en frío y con arranque en caliente para la prueba No. 1.

### 2.5. Consumo de madera

El consumo de la madera durante las pruebas se registró manualmente pesando cada leño colocado en el hogar de la estufa y anotando el tiempo. En la Figura 10 se muestra el resultado para la prueba No. 1 donde cada punto corresponde a la suma del peso de todos los leños que se adicionan en un mismo instante. Esta gráfica caracteriza la forma de alimentar la estufa por parte de un operario particular. En el Anexo 7.3 se reportan las mediciones de consumo de madera para todas las pruebas realizadas.



## Programa Paisajes de Conservación

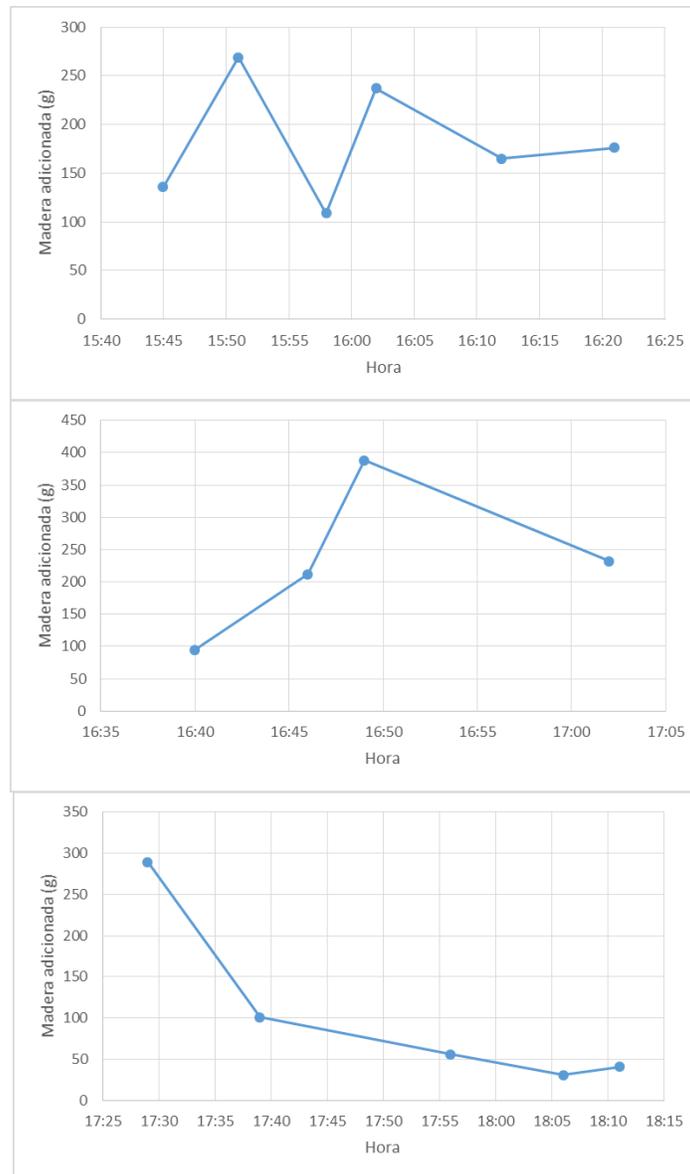


Figura 10. Ejemplo del registro del consumo de la madera en las tres fases de la prueba WBT No. 1 para la estufa de un fogón sin chimenea; alta potencia con arranque en frío (arriba), alta potencia con arranque en caliente (mitad), y baja potencia (abajo).

### 2.6. Interpretación de los resultados

#### 2.6.1. Eficiencia térmica y potencia desarrollada

Se puede observar que la estufa de un fogón sin chimenea presenta sistemáticamente una mayor eficiencia térmica y una menor potencia térmica comparada con la estufa de un fogón y plancha con chimenea. Así mismo, los resultados sugieren que ambos tipos de estufa desarrollan una menor potencia y una mayor eficiencia en clima cálido comparado con el clima frío. La variabilidad observada en estos resultados confirma que la caracterización confiable de la eficiencia y potencia térmicas de las estufas



## Programa Paisajes de Conservación

requiere de muchas réplicas y un tratamiento estadístico. En este estudio el propósito central de los experimentos era caracterizar las temperaturas dentro de la estufa, sin embargo, estos resultados dan pistas importantes sobre el efecto de la chimenea y el contacto de las ollas con los gases de combustión en la eficiencia de las estufas.

### 2.6.2. Tiempos de calentamiento y ebullición

Los tiempos de calentamiento y ebullición en ambos tipos de estufa resultan muy largos cuando se considera la potencia térmica calculada a partir del consumo de la madera. La estufa con chimenea es aún más lenta a pesar que tiene una potencia térmica mayor. Esto hace sospechar que la inercia térmica de las estufas es demasiado alta.

La inercia térmica hace referencia a la cantidad de energía en forma de calor que se necesita para aumentar un grado Celsius la temperatura de la pieza por unidad de masa o volumen. Una estufa eficiente comercial es normalmente muy compacta no solamente porque se necesita que sea de bajo costo sino porque así tiene una inercia térmica reducida al mismo tiempo que las áreas superficiales de pérdida de calor al ambiente son más pequeñas, ambos aspectos apropiados para mejorar su desempeño con respecto a estufas convencionales (Figura 11). La inercia térmica se puede calcular como el producto de la densidad del material por su calor específico.



*Figura 11. Tamaño de una estufa eficiente ampliamente comercializada en los países en vía de desarrollo<sup>2</sup>.*

Para hacerse una idea del aporte de cada tipo de material usado en las estufas desarrolladas por Patrimonio Natural la Tabla 3 muestra los valores de las inercias térmicas, también denominadas capacidades térmicas.

<sup>2</sup> Imagen tomada de la página de Internet [www.envirofit.org](http://www.envirofit.org)



## Programa Paisajes de Conservación

Material	Densidad	Calor específico	Inercia térmica volumétrica	Conductividad térmica
	kg/m <sup>3</sup>	kJ/kg-°C	kJ/m <sup>3</sup> -°C	W/m-°C
Acero	7830	0.43	3367	64
Concreto	2300	0.88	2024	1.4
Aluminio puro	2702	0.903	2440	237
Roca volcánica	287	0.87	250	3.5
Vermiculita expandida	120	0.835	100	0.068
Arena seca	1515	0.8	1212	0.27
Aire	0.8	1	1	0.02

Tabla 3. Capacidad o inercia y conductividad térmicas de algunos materiales usados en las estufas.

### 2.6.3. Temperaturas

La evolución de las temperaturas de los gases de combustión y las superficies interna (tubo), media (contenedor del aislante) y externa (carcasa de la estufa) muestra que la operación no alcanza una condición estacionaria.

Durante las etapas de alta potencia con arranque en frío y el caliente las temperaturas aumentan progresivamente partiendo de valores cercanos a la temperatura ambiental. El incremento de temperatura es más rápido en los primeros cinco minutos correspondientes al encendido del combustible sin la olla sobre la estufa. Luego el calentamiento es más lento porque la olla sobre el fogón limita el flujo de los gases y absorbe parte del calor que emite la llama por radiación. Al final de las etapas de alta potencia todas las temperaturas medidas decaen muy rápidamente buscando el equilibrio con el medio ambiente.

En la etapa de baja potencia se observa que las temperaturas promedio tanto de los gases de combustión como de las superficies se mantienen en niveles bajos comparadas con aquellas de las etapas de alta potencia. Además presentan fuertes oscilaciones asociadas a los instantes que se alimenta combustible. Estas oscilaciones además están en fase, i.e. son casi simultáneas en todas las superficies, evidenciando que la inercia térmica del cuerpo de la estufa alrededor de la cámara de combustión es insuficiente para sostener las temperaturas por periodos largos.

### 2.6.4. Consumo de madera

En cuanto al consumo de madera, las gráficas de todas pruebas realizadas muestran que la alimentación del combustible es un proceso muy variable en el tiempo porque depende de factores como la irregularidad geométrica de los leños, que tienen consecuentemente masas diferentes, incluso si están cortados a la misma longitud, y del criterio del operario sobre el momento adecuado para hacer las adiciones al hogar. Evidentemente, durante la etapa de baja potencia la masa adicionada cada vez es más pequeña comparada con aquella que se adiciona en las pruebas de alta potencia.



## Programa Paisajes de Conservación

### 3. Modelo Analítico

#### 3.1. Principios generales

La transferencia de calor entre los gases de combustión y los recipientes que contienen el agua así como las pérdidas a través del cuerpo de la estufa se modelan aquí como procesos estacionarios, es decir que se establecen de tal forma que no cambian en el tiempo. En realidad, como lo muestran las temperaturas medidas durante las pruebas (sección 2.4), los procesos asociados son transitorios, cambiando todo el tiempo con respecto al tiempo particularmente por su dependencia de la alimentación irregular del combustible. No obstante un modelo estacionario revela las proporciones relativas de los flujos de calor y estima las temperaturas que se presentarían en un uso prolongado de la estufa con una alimentación controlada de combustible y permite analizar el funcionamiento de la estufa y tomar medidas para mejorar su desempeño. Por otro lado, un modelo transitorio es excesivamente complejo e innecesario, en primera instancia, para encontrar aspectos de mejora de las estufas.

El modelo se divide en dos partes principales. Una primera parte estima el flujo de gases de combustión que se establece en el hogar y la chimenea por el principio de Arquímedes: los gases calientes (aire y/o gases de combustión) tienen menor densidad que los gases fríos de la atmósfera circundante, por lo tanto estos gases calientes sufren una fuerza ascendente proporcional a la diferencia de densidades de los gases fríos y calientes haciéndolos ascender a través del ducto que los conduce hacia los recipientes con agua y/o hacia la chimenea. Este fenómeno se denomina corrientemente como el *tiro natural*.

En una segunda parte, con base en la velocidad calculada para los gases se modelan los flujos de calor desde los gases de combustión a muy alta temperatura hacia el ambiente que tiene la temperatura más baja del sistema, calculando así las pérdidas de energía a través del cuerpo de la estufa. Luego, se realiza el modelo del intercambio de calor entre los gases de combustión, un poco más fríos debido a las pérdidas, y las superficies de calentamiento útil: olla y plancha, cuando sea pertinente.

La diferencia entre el contenido de energía inicial de los gases de combustión, las pérdidas de calor por el cuerpo de la estufa, y el calor transferido a las superficies de calentamiento útil permite calcular la energía remanente en los gases de combustión que se arrojan a la atmósfera. El cociente del calor entregado a las superficies de calentamiento útil y la energía que el combustible entrega a los gases de combustión es una medida de la eficiencia térmica de la operación de la estufa.

#### 3.2. Estructura del modelo

##### 3.2.1. Flujo de gases de combustión

Los gases de combustión se mueven dentro del ducto que conforma el hogar en las estufas impulsados por la diferencia de densidad que genera su calentamiento. Los gases de combustión son una mezcla de nitrógeno, oxígeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y vapor de agua que llega a temperaturas del orden de los 700°C a una presión cercana a la atmosférica. En tales condiciones de baja presión relativa esa mezcla de gases puede ser modelada mediante la ecuación de estado de los gases ideales:

$$pV = mRT$$



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



## Programa Paisajes de Conservación

donde  $p$  es la presión absoluta de los gases,  $V$  es su volumen total,  $m$  su masa,  $T$  su temperatura en escala absoluta (Kelvin) y  $R$  es la constante de gas ideal particular para la mezcla de gases. Como la densidad de la mezcla de gases  $\rho$  es el cociente  $m/V$ , la ecuación de los gases ideales permite calcular la densidad como:

$$\rho = \frac{p}{RT}.$$

Si el proceso de combustión ocurre a una presión aproximadamente constante, la atmosférica, la densidad únicamente cambiaría debido al aumento de la temperatura de tal forma que:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1}.$$

Si  $T_1$  es 293 K (20°C) y  $T_2$  es 973 K (700°C), entonces  $\rho_1/\rho_2$  sería 3.32. Esta variación en la densidad de los gases de combustión es el motor del movimiento.

El aire atmosférico tiene una composición aproximada de 80% de nitrógeno y 20% de oxígeno ya sea en peso o en volumen. Durante la combustión parte del oxígeno del aire y el carbono contenido en el combustible son transformados en dióxido de carbono y agua principalmente. El contenido de nitrógeno en los gases de combustión sigue siendo dominante de tal forma que el comportamiento de la mezcla de gases puede aproximarse por el del aire para efectos de estimar su densidad.

Mediante un balance de energía sobre el fluido, considerando las pérdidas de energía del flujo por fricción y por los obstáculos a todo lo largo del conducto, se estima la velocidad de los gases. El detalle de este modelo se encuentra en el Anexo 7.5.

Partiendo de la suposición que los gases se calientan hasta 700°C a partir de la temperatura ambiental, el modelo pronostica que la velocidad de los gases calientes en el ducto vertical del hogar en la estufa de un fogón sin chimenea es de 1.2 m/s. Para la estufa de un fogón, plancha y chimenea, la velocidad depende de la altura de la chimenea como ilustra la Figura 12.

## Programa Paisajes de Conservación

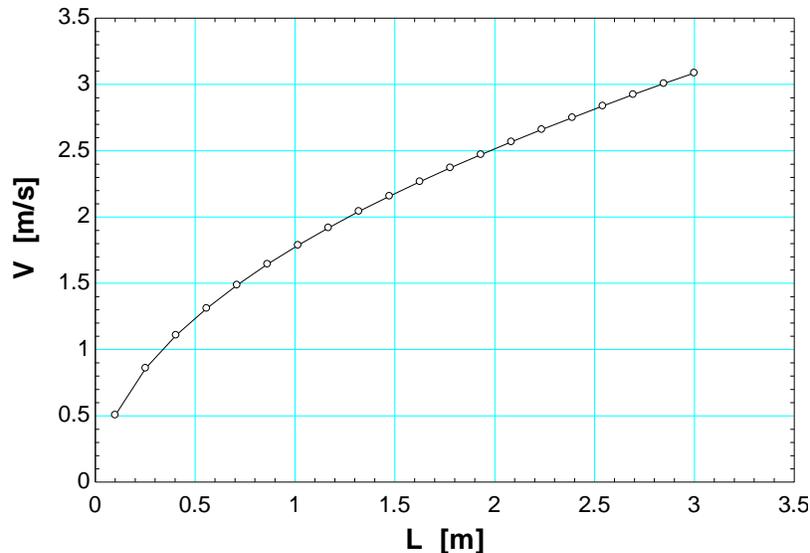


Figura 12. Velocidad de los gases calientes en el ducto vertical del hogar en la estufa de fogón y plancha con chimenea como función de la altura de la chimenea.

Dado que el aire atmosférico entra al hogar de la estufa con una densidad superior, pues se encuentra mucho más frío que los gases de combustión, su velocidad es más baja. Sin embargo, para los modelos de transferencia de calor lo que cuenta es la velocidad de los gases calientes de combustión, como se verá más adelante.

### 3.2.2. Procesos de transferencia de calor

Los procesos de transferencia de calor en las estufas se pueden dividir en aquellos relacionados con la función principal, i.e. el calentamiento del agua en los recipientes, y otros indeseados asociados a las pérdidas de energía. Los detalles de los modelos correspondientes se encuentran en la sección 7.5. A continuación se presentan separadamente sus generalidades.

#### 3.2.2.1. Calentamiento del agua

El calentamiento del agua ocurre por el flujo de calor  $\dot{Q}_{conv}$  que se presenta desde los gases de combustión hacia el recipiente que la contiene. Este calentamiento ocurre principalmente por el mecanismo de convección y es proporcional a la diferencia de temperatura entre los gases de combustión  $T_g$  y la superficie del recipiente de agua  $T_s$ , al área de contacto  $A_s$ . También depende de la velocidad de los gases y de la configuración geométrica del contacto entre los gases y las superficies del recipiente, aspectos que se sintetizan en el *coeficiente de convección térmica*  $h$ . El modelo básico es la ley de enfriamiento de Newton que tiene la forma:

$$\dot{Q}_{conv} = h A_s (T_g - T_s).$$

Suponiendo que  $T_s = 100^\circ C$  y que los gases se han enfriado un poco por las pérdidas de calor en el cuerpo de la estufa, este modelo pronostica un flujo de calor hacia la olla del fogón principal de 149 W para la

## Programa Paisajes de Conservación

estufa sin chimenea, y de 294 W para la estufa con chimenea. Adicionalmente, la plancha de la estufa con chimenea puede extraer de los gases 744 W si se considera activa toda su superficie.

### 3.2.2.2. Pérdidas

#### 3.2.2.2.1. A través del aislamiento

Las pérdidas de calor a través del aislamiento y el cuerpo de la estufa se pueden interpretar mediante un análogo eléctrico equivalente donde cada capa del cuerpo se representa mediante una resistencia térmica que se suma en serie o en paralelo a una resistencia total  $R_t$ . El voltaje aplicado a esta resistencia total corresponde a la diferencia de temperaturas extremas del sistema  $\Delta T$ , y la corriente al flujo de calor  $Q$ . La ley de Ohm válida para los circuitos eléctricos se reescribe como:

$$I = \frac{V}{R} \sim Q = \frac{\Delta T}{R_t}$$

El detalle de este modelo se presenta en el Anexo 0. En la Figura 13 se puede observar el modelo análogo eléctrico de las estufas estudiadas aquí. Las resistencias en paralelo son fenómenos de intercambio de calor por convección y radiación que ocurren simultáneamente entre dos superficies.

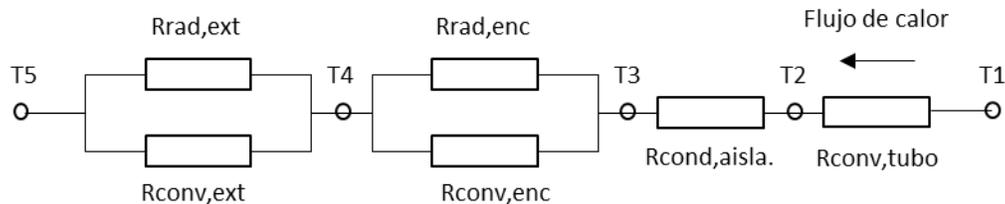


Figura 13. Esquema del modelo análogo eléctrico para la transferencia de calor a través del cuerpo de las estufas. Los subíndices corresponden con los de la Figura 5

Si se parte de un valor de la temperatura de los gases  $T_1$  de 700°C, tal como se verifica al final de las pruebas WBT cuando la cámara de combustión ya está caliente, los valores calculados de las resistencias para las dos estufas probadas son como lo muestra la Tabla 4. Se concluye que la resistencia más importante es la asociada a la convección entre los gases de combustión y la superficie interna de la tubería que conforma la cámara de combustión. Le sigue el efecto combinado de la radiación y la convección a través del encerramiento de aire. Paradójicamente, la capa de aislante tiene el menor aporte relativo a la resistencia total que limita las pérdidas de calor a través del cuerpo de la estufa. La estufa de un fogón y plancha con chimenea tiene una resistencia total menor comparada con el otro modelo de estufa que se explica principalmente por la mayor velocidad de los gases que aumentan los coeficientes de convección dentro de la cámara de combustión y, consecuentemente, reducen la correspondiente resistencia a la convección.



## Programa Paisajes de Conservación

Resistencia	Estufa			
	Un fogón sin chimenea		Un fogón y plancha con chimenea	
	Valor (°C/W)	Fracción del total (%)	Valor (°C/W)	Fracción del total (%)
Convección tubo	1.2	67%	0.9	62%
Conducción aislamiento	0.08	4%	0.08	6%
Convección encerramiento	6.2		6.1	
Radiación encerramiento	0.42		0.37	
Convección + radiación encerramiento	0.4	22%	0.35	24%
Convección externa	0.52		0.5	
Radiación externa	0.21		0.2	
Convección + radiación externa	0.13	7%	0.12	8%
Total	1.8	101%	1.45	100%

Tabla 4. Resistencias térmicas equivalentes del cuerpo de las estufas.

Las pérdidas de calor para la estufa sin chimenea se estiman en 380 W mientras que para el caso de la estufa con plancha y chimenea ascienden a 472 W. Estos valores corresponden al 8.0% y 4.2% de las potencias térmicas teóricas aportadas por el combustible (*firepower*) que se estiman en 4727 W y 11044 W respectivamente a partir del calentamiento que debe tener el aire desde la temperatura atmosférica para llegar a los 700°C.

### 3.2.2.2. En los gases de combustión

Los gases de combustión se llevan la energía restante, i.e. la que no se pierden a través del cuerpo de la estufa y ni se entrega a las ollas y la plancha según sea el caso. Para la estufa sin chimenea esto corresponde a 4198 W y para la estufa con plancha y chimenea es de 10006 W. Estos valores representan el 89% y el 86% de la energía suministrada por el combustible al aire y gases de combustión, respectivamente.

La Tabla 5 muestra un resumen de la distribución de la potencia térmica en los flujos de calor presentes.

Flujo de calor	Estufa			
	Fogón sin chimenea		Fogón y plancha con chimenea	
	Potencia (W)	Fracción del total (%)	Potencia (W)	Fracción del total (%)
Pérdidas por el cuerpo de la estufa	380	8.0%	472	4.3%
Calentamiento de las ollas	149	3.2%	1038	9.4%
Arrojado con los gases de combustión	4198	88.8%	9534	86.3%
Calentamiento de aire y gases	4727	100.0%	11044	100.0%

Tabla 5. Distribución teórica de la potencia suministrada a las estufas en los flujos de calor presentes.

### 3.3. Análisis de las estufas

De acuerdo con las pruebas WBT realizadas sobre las estufas, el modelo analítico subestima los calores transferidos a las ollas y, por lo tanto, la eficiencia térmica. Sin embargo los valores están dentro del orden de magnitud esperado. Este último hecho permite inferir que, si bien los valores estimados no son exactos, las relaciones entre los diversos componentes son aceptables para analizar el funcionamiento de las estufas. No se debe perder de vista que el modelo es de naturaleza estacionaria mientras que la estufa



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



## Programa Paisajes de Conservación

está operando todo el tiempo en una condición transitoria que depende de la rata manual de alimentación de la madera al hogar que está lejos de ser constante en el tiempo a pesar del esfuerzo del operador.

En términos generales se observa que:

- Las pérdidas de calor a través del cuerpo de la estufa son pequeñas
- El calentamiento de las ollas es deficiente en términos de la velocidad
- La potencia térmica desarrollada es alta como para calentar suficientemente rápido el contenido de las ollas o lo que se coloque sobre la plancha cuando la transferencia de calor hacia estas cargas sea adecuada
- Se está perdiendo demasiada potencia térmica en los gases de combustión que se arrojan a la atmósfera.

Estos hechos sugieren que las prioridades de las modificaciones a las estufas, después de revisar su inercia térmica, deberían estar dirigidas a mejorar la transferencia de calor desde los gases de combustión hacia las superficies de las ollas y la plancha. Posteriormente, debería dedicarse un tiempo a proponer cambios para reducir las pérdidas de calor a través del cuerpo de la estufa.

### 3.4. Implementación del modelo en Excel

El modelo presentado arriba, detallado en la sección 7.5 de los anexos, se implementó en un libro electrónico de Excel con el propósito que una persona con una comprensión básica de los fenómenos de transferencia de calor pueda evaluar variaciones en los parámetros básicos de la estufa y estimar el comportamiento asociado en cuanto al flujo de aire, los límites de quema de combustible y la eficiencia térmica de la estufa, ya sea esta de un fogón sin chimenea o de dos fogones con chimenea. Este modelo en Excel viene acompañado de un manual sencillo de usuario.

El programa requiere que se especifiquen los datos ambientales del lugar donde se va a usar la estufa. El usuario debe introducir la geometría general de la cámara de combustión, de los sistemas de aislamiento, de la chimenea y de los conductos de los gases de combustión. El libro de Excel incluye una hoja donde se presenta un esquema que describe gráficamente los parámetros solicitados por el programa. Además se debe indicar la tasa de alimentación de la madera y su tipo y contenido de humedad. El programa calcula el flujo de aire, las temperaturas de los gases de combustión, el calor entregado por la madera, la relación másica aire-combustible, las pérdidas de calor por el cuerpo de la estufa, el calor entregado a la carga térmica, la eficiencia térmica de la estufa, y el calor restante en los gases calientes que se arrojan a la atmósfera por la chimenea.

Por otro lado, la información relativa a las mediciones en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad Nacional sobre el poder calorífico de las maderas más comúnmente usadas como combustible en Colombia se incorporó dentro del libro de Excel de tal forma que se puede seleccionar una madera específica desde un menú desplegable. La información disponible en las pruebas de laboratorio es el poder calorífico superior del combustible cuyos gases se llevan a 25°C permitiendo la condensación de parte del vapor de agua contenido en los productos de la combustión y la recuperación de la energía de este cambio de fase. Sin embargo, en el uso de las estufas los gases deben salir a temperaturas más altas de tal forma



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



---

## Programa Paisajes de Conservación

que la condensación no es posible ni conveniente para asegurar el tiro natural y evitar problemas de corrosión. Por ese motivo fue necesario proponer un modelo para estimar el poder calorífico inferior a partir del poder calorífico superior. Es posible incluir nuevas maderas adicionando líneas en la hoja denominada *Tabla Maderas*. Finalmente el modelo en Excel contempla las pérdidas de energía asociadas a la evaporación del agua contenida en la madera para lo cual el usuario debe suministrar el contenido de humedad promedio de la madera usada en la estufa.



## Programa Paisajes de Conservación

### 4. Recomendaciones de Modificación del Diseño Actual

Siguiendo las prioridades indicadas en la sección 3.3 de este documento, en primer lugar se proponen modificaciones tendientes a reducir la inercia térmica de las estufas. Luego se plantean mejoras en la transferencia de calor hacia las ollas y finalmente algunas para reducir las pérdidas de calor en el cuerpo de la estufa. La evaluación del grado de conveniencia de cada propuesta sobrepasa los alcances de este trabajo pues involucra asuntos relacionados con la etnografía de los usuarios rurales, conceptos de diseño, costos de fabricación, capacidades reales de manufactura de los productores regionales, etc. Sin embargo, se aportan diversos argumentos que, con seguridad, ayudarán a Patrimonio Natural a tomar las mejores decisiones.

#### 4.1. Reducción de la inercia térmica de las estufas

La Tabla 6 presenta un análisis detallado de la inercia térmica de la estufa de un fogón sin chimenea. Se observa que está dominada por la losa de concreto en más del 67%. El acero del tubo y las superficies separadoras y externas del cuerpo de la estufa representan el 31% de la inercia total.

Parte	Material	Dimensiones			Volumen	Inercia térmica	Fracción
		L1 o D	L2	L3			
		m	m	m	m <sup>3</sup>	kJ/°C	%
Tubo cámara combustión	Acero	0.13	0.5	0.003	6.13E-04		
Pared1 separador aislante	Acero	0.775	0.283	0.001	2.19E-04		
Pared2 lateral	Acero	0.39	0.31	0.001	1.21E-04		
Pared3 lateral	Acero	0.39	0.31	0.001	1.21E-04		
Pared4 lateral	Acero	0.39	0.31	0.001	1.21E-04		
Pared5 lateral	Acero	0.39	0.31	0.001	1.21E-04		
Pared6 piso	Acero	0.423	0.423	0.001	1.79E-04		
	Subtotal				1.49E-03	5.03	31.1%
Losa	Concreto	0.4	0.4	0.04	6.40E-03		
	Vacío	0.18		0.04	1.02E-03		
	Subtotal				5.38E-03	10.89	67.3%
Aislante	Roca volcánica	0.31	0.245	0.2	1.52E-02		
	Semitubo	0.245	0.31		7.31E-03		
	Vacío cilindro	0.13	0.5		6.64E-03		
	Subtotal				1.25E-03	0.25	1.5%
Aislante	Aire	0.39	0.39	0.31	4.72E-02		
	Roca volcánica				2.25E-02		
	Total				2.47E-02	0.02	0.1%
Gran total						16.19	100.0%

Tabla 6. Inercia o capacidad térmica de la estufa de un fogón sin chimenea.

Esto sugiere dos medidas para mejorar:

- Cambiar la losa de concreto por otro material de mucho menos volumen y menor inercia térmica específica. Tal vez se pueda implementar una superficie metálica con un borde en un material aislante para limitar el riesgo de quemadura del usuario. En estufas eficientes comerciales la parte superior es complemente metálica.

## Programa Paisajes de Conservación

- b) Reducir el volumen de la estufa, o por lo menos del cuerpo de la estufa alrededor de la cámara de combustión, dándole una forma más cilíndrica, para minimizar la cantidad de acero necesario.

Estas modificaciones tendrían como impacto una cantidad menor de calor acumulado en los materiales del cuerpo de la estufa, un incremento más rápido de la temperatura de la cámara de combustión mejorando la calidad de la combustión y una mayor cantidad de calor entregado a la carga térmica (i.e. las ollas) y, por lo tanto, un aumento en la eficiencia térmica de la estufa.

Medidas similares pueden tomarse en la estufa de fogón y plancha con chimenea, bajando la inercia térmica en todos los puntos donde el calor de los gases de combustión se pierda por el paso a través de algún componente. La plancha podría reducirse de área dejando sus dimensiones cercanas al diámetro de la cámara de combustión.

Por supuesto, la reducción de la inercia está asociada a una reducción en los costos de los materiales de las estufas acercándolas a un precio más cómodo para los usuarios finales.

### 4.2. Mejoras en la transferencia de calor hacia las ollas

En primer lugar debe intentarse aumentar la transferencia de calor desde los gases de combustión hacia las ollas para llevar la eficiencia térmica de las estufas a niveles más competitivos ya que allí hay una gran oportunidad de mejora.

#### 4.2.1. Aumento de las áreas de transferencia de calor

La ley de enfriamiento de Newton (sección 3.2.2.1) indica que el calor transferido aumenta si las áreas de contacto entre las superficies de las ollas y los gases de combustión aumentan. Esto se puede lograr mediante medidas que son adecuadas en algunos casos para la estufa sin chimenea y, en otros, para la estufa con chimenea.

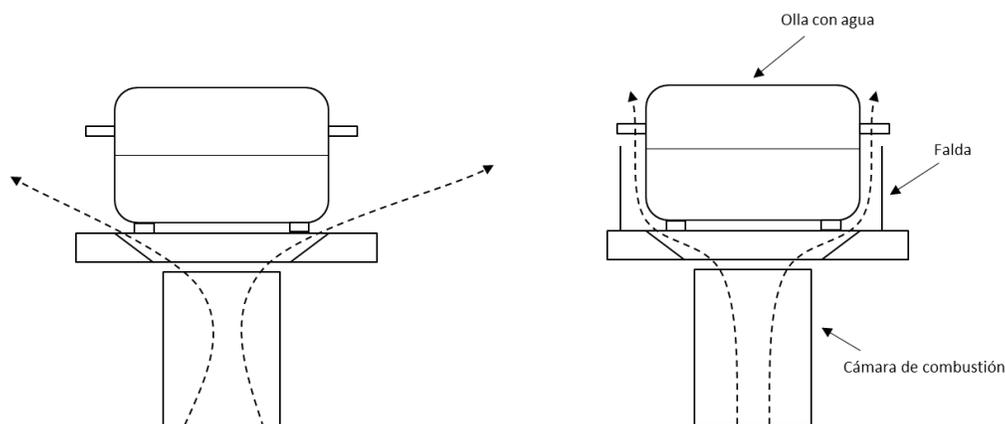


Figura 14. Esquema del cambio en el movimiento de los gases de combustión cuando se coloca una falda a la olla. Las líneas punteadas son las trayectorias esperadas de los gases de combustión en cada caso. Izq.: funcionamiento convencional; der.: funcionamiento con falda.

Para la estufa sin chimenea se recomienda suministrar una falda metálica ajustable a diferentes diámetros, i.e. un anillo de acero galvanizado o aluminio muy delgado, que cubra la mitad inferior de las ollas

## Programa Paisajes de Conservación

obligando a los gases de combustión a seguir más cercanamente su superficie<sup>3</sup>. El esquema de la Figura 14 muestra el efecto esperado de la falda y pone en evidencia el aumento del área de transferencia de calor entre la olla y los gases de combustión. La restricción al flujo de gases para una tasa de alimentación de madera dada aumenta la temperatura y la velocidad local de los gases y, por lo tanto, el coeficiente de convección y la transferencia total de calor.

Adicionalmente las faldas limitan las pérdidas de calor por radiación hacia el ambiente reflejándolo nuevamente hacia la olla e impiden que las corrientes de viento refrigeren las ollas por convección o perturben el flujo vertical de los gases de combustión. Se recomienda que el huelgo entre la falda y la olla sea menor al que existe entre de la olla y la superficie del fogón. El análisis teórico y experimental realizado por Zube propone que el huelgo para la falda debe ser de 12 mm y la altura de 7 cm aproximadamente para una olla de 22 cm de diámetro. Estas dimensiones se pueden mantener para ollas un poco más grandes. En ollas muy grandes la falda no produce mejoras sustanciales pues la base de la olla tiene un área suficientemente grande para asegurar una buena transferencia de calor desde los gases de combustión.

Para la estufa de fogón y plancha con chimenea se sugiere ampliar el área de transferencia de calor permitiendo que la olla quede **dentro** del fogón de tal forma que los gases de combustión la envuelvan antes de pasar bajo la plancha y continuar hacia la chimenea. La Figura 15 ilustra la idea esquemáticamente.

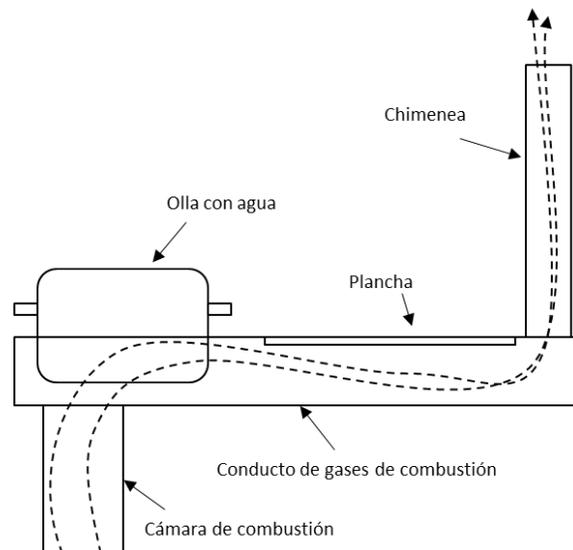


Figura 15. Esquema de la modificación que permite introducir la olla en el fogón de la estufa con chimenea.

<sup>3</sup> Heat transfer efficiency of biomass cookstoves. D. J. Zube. Master thesis. Department of Mechanical Engineering. Colorado State University. U.S.A., 2010.

## Programa Paisajes de Conservación

Esta modificación requeriría incluir un sistema de sello entre el ducto que contiene los gases y la olla pues, aunque se espera que la presión de los gases de combustión sea sub-atmosférica (i.e. un ligero vacío), puede haber fugas de gases durante la primera etapa del calentamiento y entrada de aire frío atmosférico que perjudicaría la transferencia de calor en la plancha.

Para la estufa con chimenea puede aumentarse el área de transferencia de calor adicionando aletas metálicas bajo la plancha como lo ilustra la Figura 16. Las aletas deberían ser soldadas en toda su longitud a la plancha para que el calor pase fácilmente; otros métodos de sujeción generarían una resistencia térmica de contacto que podría anular el efecto del aumento de área.

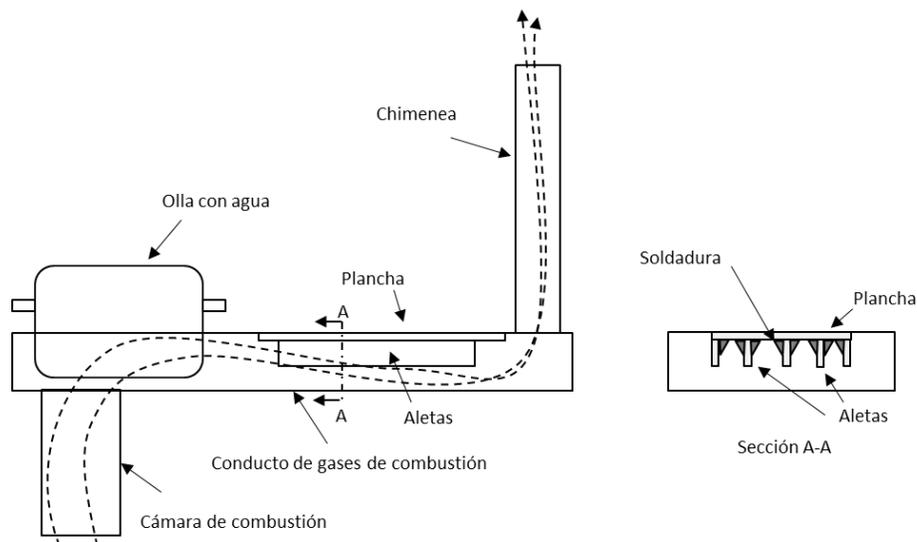


Figura 16. Detalle de las aletas bajo la plancha para aumentar el área de transferencia de calor.

### 4.2.2. Ajuste del hueco entre la olla y la hornilla

El hueco entre la olla y la hornilla es la mínima distancia que se presenta entre la base de la olla y la superficie superior de la estufa, espacio por donde pasan los gases de combustión. En el caso de la estufa sin chimenea estudiada aquí, la distancia es de aproximadamente media pulgada (~ 13 mm). Sin embargo, en modelos de estufas comerciales de mayor eficiencia térmica el hueco es un poco mayor<sup>4</sup>. Tradicionalmente el hueco entre la olla y la hornilla se ha establecido con el criterio de que el anillo de flujo de gases bajo la olla tenga la misma área transversal que el ducto vertical de la cámara de combustión. Sin embargo, las estufas existentes tienen un hueco tal que la relación de áreas del anillo a la cámara de combustión es de 1.4.

No debe exagerarse el hueco pues, como lo sugiere la comparación de la evolución de la temperatura del agua en la olla entre los casos de la prueba preliminar y la prueba No. 1 mostrada en la Figura 17, el

<sup>4</sup> En la estufa G3300 de Envirofit el hueco es de 18 mm para una potencia térmica de 2500 W.

## Programa Paisajes de Conservación

calentamiento fue mucho más lento en la primera prueba dado que el huelgo era superior (~ 30 mm) porque, por error en la fabricación, se contaba con una rejilla inadecuada como lo ilustra la Figura 18.

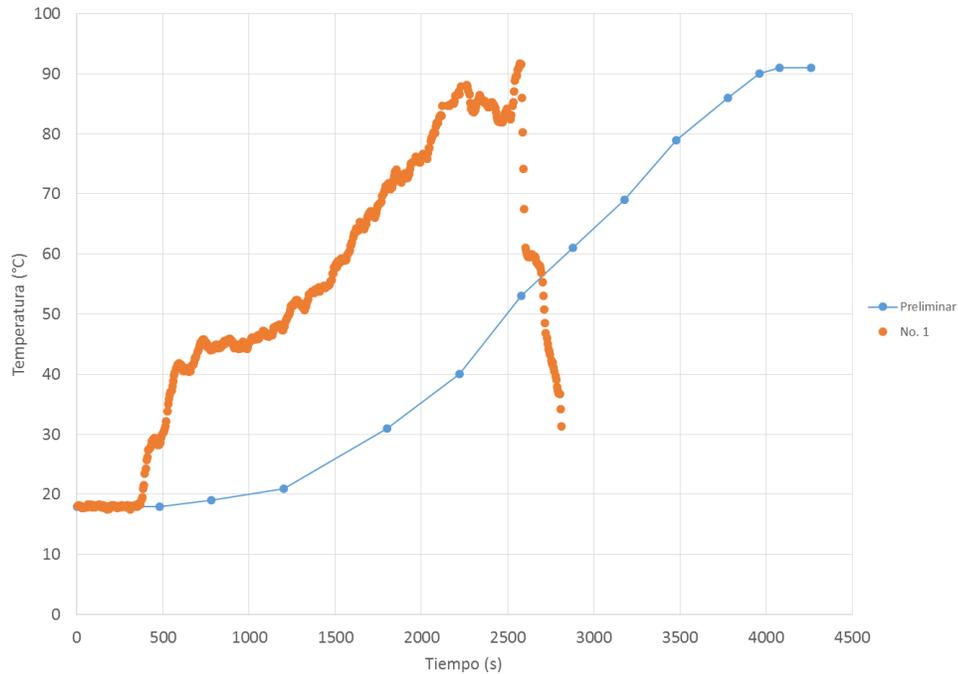


Figura 17. Comparación de la evolución de la temperatura del agua en la olla para las pruebas preliminar y No. 1 de la estufa de un fogón sin chimenea.



Figura 18. Comparación de los huelgos de las rejillas de las hornillas usadas durante las pruebas de la estufa de un fogón sin chimenea; preliminar (izquierda) y No. 1 (derecha).

### 4.2.3. Inducción de turbulencia en el flujo de los gases cerca de las superficies de calentamiento

## Programa Paisajes de Conservación

Los gases de combustión fluyen sobre las superficies de calentamiento (olla y plancha) en un régimen laminar que limita la transferencia de calor por convección. Existe la posibilidad de introducir pequeños elementos en la estufa que generen localmente algún grado de turbulencia. El movimiento errático del fluido en este régimen aumenta los coeficientes de convección.

Algunas ideas de generadores de turbulencia son:

- Una placa con orificio en la parte final del ducto vertical de la cámara de combustión (Figura 19). La placa reduce el flujo de los gases generando el riesgo de que el aire sea insuficiente para lograr una combustión completa, por lo que es necesario que el agujero no sea demasiado pequeño. Se recomienda que el diámetro del orificio sea  $2/3$  del diámetro interno de la cámara de combustión.

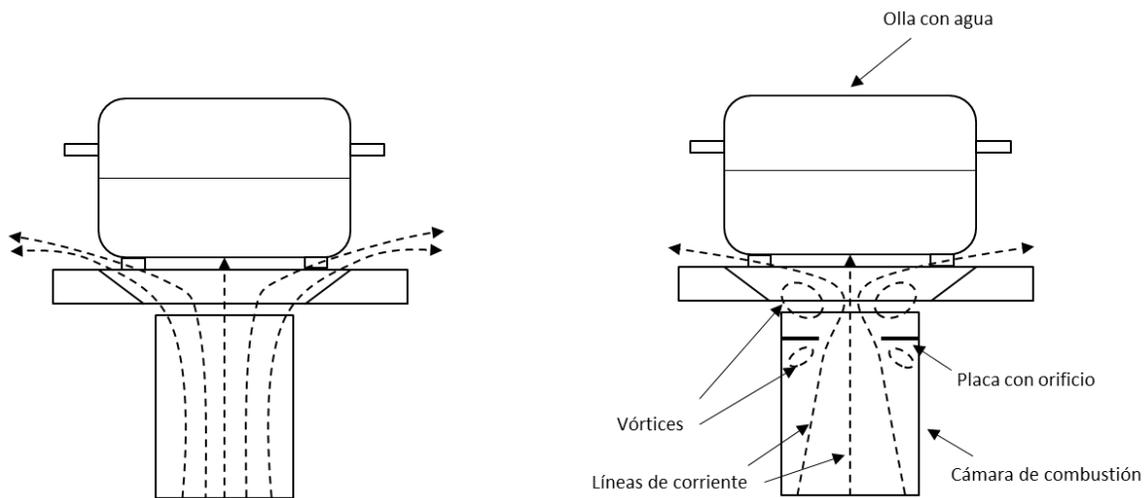


Figura 19. Efecto esperado de una placa con orificio como generador de turbulencia.

- Se podría colocar unas barras cilíndricas o tubos metálicos a unos cinco centímetros por debajo del plano de la base de la olla, perpendiculares al flujo de los gases, para que se genere una calle de vórtices de von Kármán corriente abajo como la que se muestra en la Figura 20. Estos vórtices mejorarían la transferencia de calor por convección. El diámetro exterior sugerido de las barras o tubos es de 15 mm distanciadas por lo menos dos diámetros una de otra para el caso de la estufa sin chimenea. Para la estufa con chimenea el diámetro de las barras puede ser de 10 mm y su distanciamiento de dos diámetros.

Se recomienda hacer ensayos de bajo costo para poner estas ideas a prueba y seleccionar las más efectivas en la práctica.



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



**patrimonio natural**  
Fondo para la Biodiversidad y Áreas Protegidas

## Programa Paisajes de Conservación



Figura 20. Calle de vórtices de von Kármán que se forma corriente abajo cuando un fluido en régimen de flujo estacionario pasa sobre una forma cilíndrica<sup>5</sup>.

### 4.3. Aislamiento térmico

Aunque el análisis de la sección 3.2.2.2.1 mostró que el aislamiento térmico es responsable de pérdidas entre el 4% y el 8% de la energía entregada por la combustión de la madera. Hay oportunidades de mejora que se presentan a continuación.

#### 4.3.1. Conducción

La resistencia térmica asociada al mecanismo de conducción está esencialmente presente en el flujo de calor a través del material aislante y representa entre el 4% y 6% de la resistencia térmica total del cuerpo de las estufas. Esto quiere decir que conviene buscar alternativas para mejorar el aporte a la resistencia térmica de la capa de aislamiento. El efecto aislante puede ser mejorado esencialmente mediante dos principios: usando un material de menor conductividad térmica y aumentando el espesor de la capa de aislamiento. La segunda opción no parece la mejor pues las estufas ya son voluminosas. Considerando la primera opción se podría reemplazar la piedra pómez, que tiene una conductividad térmica esperada  $k$  de 0.5 a 3.5 W/m-°C, por otros materiales fáciles de conseguir in situ como la arena seca ( $k$  de 0.15 a 0.25 W/m-°C).

La piedra pómez suministrada para las pruebas de las estufas contiene una mezcla de piedras volcánicas. Cuando fueron colocadas en agua para verificar su densidad se encontró que menos del 20% de las piedras flotaba sugiriendo que, en promedio, la densidad de este producto es muy alta (mayor a 1000 kg/m<sup>3</sup>) y, por lo tanto, su conductividad térmica es mucho más grande de lo esperado. Las piedras que funcionan bien como aislantes térmicos deben tener densidades de alrededor de 200 kg/m<sup>3</sup>. Se sugiere buscar mejores proveedores y acordar con ellos un control de calidad basado en la medición de la densidad media de las piedras.

<sup>5</sup> Fotografía de Jürgen Wagner usada bajo la licencia *Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International*.



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



## Programa Paisajes de Conservación

Se recomienda explorar el uso de la vermiculita expandida<sup>6</sup> con costo superior y una disponibilidad menor comparada con otros materiales pero con una capacidad aislante mucho más grande ( $k$  de 0.065 W/m-°C).

Para el caso de la estufa de un fogón y plancha con chimenea se sugiere incluir un aislamiento en la superficie inferior del conducto de gases que pasa bajo la hornilla secundaria puesto que se presentan grandes pérdidas de calor. Esta superficie alcanza, como la chimenea, temperaturas cercanas a los 150°C.

### 4.3.2. Convección

El encerramiento de aire que separa el material aislante de la superficie exterior de la carcasa de las estufas representa la mayor resistencia térmica cuando se evalúa el fenómeno de convección natural bajo la suposición que es totalmente hermético. Infortunadamente se presenta en paralelo una transferencia calor por radiación mucho menor que junto a la anterior produce una resistencia térmica combinada muy pequeña<sup>7</sup>.

La resistencia térmica de la convección natural en la cámara de aire aumenta con el espaciamiento entre las superficies como lo muestra la Figura 21. Sin embargo, se observa que después de los 7 mm el crecimiento es menos pronunciado. Esto quiere decir que se debe evaluar la relación beneficio/costo cuando se quiere aumentar la resistencia de la convección natural ya que un mayor espaciamiento representa un mayor volumen de la estufa y, consecuentemente, mayores costos de materiales.

Es posible aumentar la resistencia de la convección dentro del encerramiento de aire colocando pequeñas protuberancias perpendiculares a las paredes interna y externa de un centímetro de longitud distanciadas verticalmente cada 2 cm para limitar el movimiento vertical del aire. Es mejor si las protuberancias son hechas en materiales que no conduzcan el calor.

Es importante que esta cámara sea totalmente hermética, especialmente en la parte inferior, para evitar la entrada de aire frío y la salida de aire caliente por la parte superior. Para esto se recomienda sellar el contacto de la superficie contenedora del material aislante con el entrepaño que hace de piso mediante silicona para alta temperatura.

<sup>6</sup> En Bogotá la empresa Electrofumigación Toro y Cía Ltda (Cra. 92 No. 64C-43 Centro Empresarial El Dorado, Bodega 51, Tel. 4302022) vende este producto con una granulometría inferior a 5.6 mm. El saco de 10 kg cuesta \$36,400 sin incluir el IVA.

<sup>7</sup> Las leyes de los circuitos eléctricos, que son aplicables como análogos en la transferencia de calor, indican que la resistencia combinada de dos resistencias en paralelo es menor que cualquiera de las dos resistencias independientes.

## Programa Paisajes de Conservación

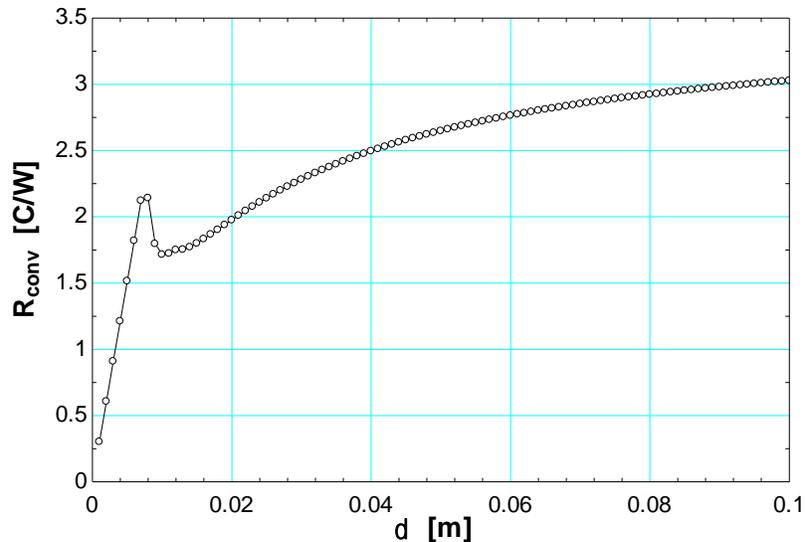


Figura 21. Resistencia térmica de la convección natural como función del espaciamiento entre las superficies.

### 4.3.3. Radiación

La resistencia por radiación dentro del encerramiento de aire es muy pequeña. Se puede mejorar separando el espacio con una superficie vertical intermedia muy delgada para partir la cámara en dos. Los lados de las superficies que quedan mirando hacia el aire contenido en las dos sub-cámaras deben ser recubiertos con pintura metalizada plateada o con una película (*foil*) de aluminio sin permitir que se arrugue para que la emisividad de la radiación infrarroja sea más baja (~0.3). Cuando se hace esto, los cálculos indican que la pérdida de calor a través del cuerpo de las estufas se reduciría en un 30%. Ese calor se quedaría en los gases de combustión aumentando la cantidad que recibe la olla pero sólo en un 3% si no se hacen modificaciones para mejorar la convección. Adicionalmente la temperatura de la superficie externa del cuerpo de la estufa pasaría de 63°C a 51°C mejorando las condiciones de seguridad y comodidad para el usuario.

Un color plateado para las superficies externas de la estufa, i.e. la carcasa, ayudaría a reducir las pérdidas por radiación hacia el ambiente mejorando la resistencia total del cuerpo de la estufa.

### 4.4. Manejo de cenizas

Durante los primeros minutos de operación de las etapas de alta potencia el flujo de aire y gases es pequeño porque están muy fríos limitando el efecto del tiro natural. Esto hace que la combustión inicialmente resulte incompleta y se formen carbones vegetales de volumen apreciable. Así se obstruye, casi desde el comienzo del uso de las estufas, el flujo de aire a la cámara de combustión en detrimento de la capacidad térmica de la estufa. Hacia el final de la etapa de alta potencia los carbones son tan voluminosos que la combustión de la madera ocurre en la boca del lugar dando lugar a pérdidas de energía por radiación al medio ambiente como lo ilustra la Figura 22.

## Programa Paisajes de Conservación



Figura 22. Combustión en la boca del hogar ocasionada por la obstrucción que hacen por los carbones formados al comienzo del uso de la estufa sin chimenea (izquierda); cámara de combustión obstruida por carbones y cenizas al final de una prueba de la estufa con chimenea (derecha).

Por eso se sugiere generar un mecanismo simple para remover fácilmente los carbones y las cenizas que van quedando al fondo de la cámara de combustión. Puede incorporarse un cenicero hecho de lámina metálica que se deslice por debajo de la parrilla de combustión. También podría ayudar una modificación a la geometría de la boca del hogar para ampliar el área de acceso y facilitar la manipulación de estos residuos y evitar que los usuarios se expongan a las altas temperaturas de la cámara de combustión.

### 4.5. Geometría de la estufa

Las experiencias realizadas y los cálculos hechos con el modelo sugieren algunas variantes en las formas y las dimensiones de las partes de las estufas como se indica a continuación.

#### 4.5.1. Boca del hogar

Para facilitar el acceso al hogar a la hora de retirar los residuos y adicionar más madera para aumentar la potencia térmica debería ampliarse la boca del hogar. Cuando el acceso es muy estrecho, se limita el flujo de aire y, así mismo la potencia de la estufa con relación a su volumen. Por otro lado, la forma del conducto debería ser angulada para empalmar con la parte vertical de la cámara de combustión de menor diámetro. Se sugiere una relación de áreas de dos a uno entre la boca del hogar y la salida vertical de la cámara de combustión.

#### 4.5.2. Cuerpo de la estufa

La forma del cuerpo de la estufa debería ser más un cilindro que un paralelepípedo por varios motivos relacionados con la eficiencia térmica. Una forma cilíndrica tiene menor área expuesta al medio ambiente por unidad de volumen y, por lo tanto, menores pérdidas de calor. Así mismo, esta forma demanda menor cantidad de materiales de construcción y podría reducir su costo si se seleccionan los procesos de manufactura apropiados. La altura del cuerpo actual parece ser correcta y la estructura que soporta la estufa es más ergonómica que las versiones comerciales hechas para cocinar en posición sentada. Se sugiere simplificar la estructura para contener un cuerpo de estufa menos voluminoso al tiempo que se



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



---

## Programa Paisajes de Conservación

continúa proveyendo un apoyo resistente para las ollas grandes así como superficies de trabajo para cocinar.

### 4.6. Control del flujo de aire

Una vez que la cámara de combustión se ha calentado suficientemente el flujo de aire y gases se acerca a su máximo y podría ser útil limitarlo para quemar más lentamente la madera cuando el uso requiere medias o bajas potencias. En el caso de la estufa con chimenea podría incluirse una válvula tipo mariposa en ese ducto. Para la estufa sin chimenea, podría colocarse una compuerta en la boca del hogar que cierre parcialmente el área de flujo. En ambos casos la operación deber ser manual.

### 4.7. Presecado de la madera combustible

El hecho que los gases de combustión se arrojen al medio ambiente a temperaturas muy altas sugiere que esta energía podría utilizarse para secar la madera que más adelante será usada como combustible, mejorando aún más su poder calorífico y, como consecuencia, reduciendo aún más el consumo de madera. Esta idea es más fácil de poner en práctica en la estufa con chimenea si se aprovecha la superficie de ese ducto para apoyar leña húmeda. Esto podría adicionalmente servir de protección para que los usuarios no entren en contacto por accidente con las superficies muy calientes de la chimenea. Las mediciones experimentales mostraron que el ducto de la chimenea alcanza temperaturas de hasta 150°C.



## Programa Paisajes de Conservación

### 5. Alternativas de Materiales y Procesos de Fabricación

A lo largo de este trabajo han surgido una serie de ideas sobre materiales y procesos de fabricación alternativos que podrían explorarse para futuros modelos de las estufas. Algunas de ellas ya han sido presentadas en otras secciones de este documento. Sin embargo, se colocan juntas en este capítulo para facilitar su consulta.

#### 5.1. Materiales aislantes

La capa aislante del cuerpo de la estufa puede ser rellena con materiales alternativos como los que se presentan en la Tabla 7. Algunos de estos materiales se pueden conseguir in situ a costos muy bajos y deberían considerarse como rellenos alternativos para la cámara de material aislante. La información del aire sirve para estimar correctamente la conductividad térmica efectiva o equivalente cuando el material es granulado mediante una ponderación con base en las fracciones volumétricas de cada componente presente. La arena y la arcilla tienen una inercia térmica elevada pero son muy baratas al mismo tiempo.

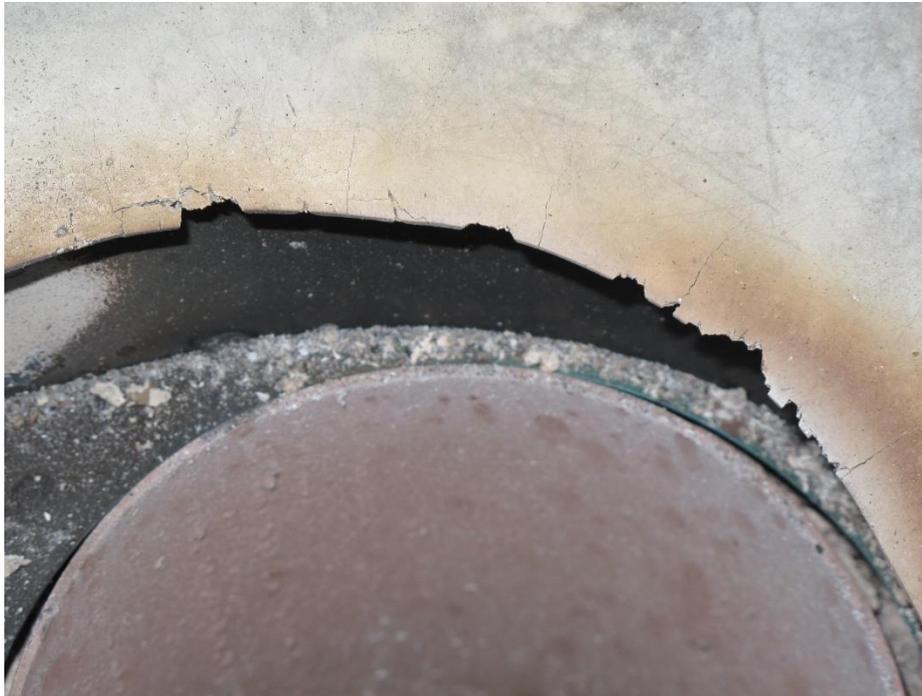
Material	Densidad	Calor específico	Inercia térmica volumétrica	Conductividad térmica
	kg/m <sup>3</sup>	kJ/kg-°C	kJ/m <sup>3</sup> -°C	W/m-°C
Roca volcánica	287	0.87	250	3.5
Vermiculita expandida	120	0.835	100	0.068
Arena seca	1515	0.8	1212	0.27
Aire	0.8	1	0.8	0.02
Arcilla seca	1460	0.88	1285	1.3
Suelo	2050	1.84	3772	0.52

*Tabla 7. Propiedades de materiales alternativos para la capa aislante de las estufas.*

#### 5.2. Losa de la hornilla

Se vio en la sección 2.6.2 de este reporte que la losa de la hornilla representa el mayor componente de la inercia total de la estufa de un fogón sin chimenea haciéndola de calentamiento lento. Por otro lado, la forma y el espesor de la losa en el agujero circular la hacen muy susceptible a grietas y fracturas como se puede observar en la Figura 23. Por estos motivos conviene encontrar alternativas.

## Programa Paisajes de Conservación



*Figura 23. Detalle de las grietas y fracturas encontradas en el borde interno de la losa en concreto durante un uso ordinario de las estufas de Patrimonio Natural estudiadas.*

La primera idea es desarrollar una losa menos masiva pero sin secciones delgadas que sólo cubra el perímetro de la superficie superior de la estufa y sirva de marco para otra pieza hecha en lámina metálica donde realmente se apoya la rejilla y la olla.

En regiones donde se cuente con artesanos alfareros, se podría desarrollar una cubierta hecha en arcilla refractaria cocida que puede tener suficiente resistencia mecánica como para servir de apoyo a las rejillas y las ollas.

Finalmente queda la alternativa de desarrollar una superficie totalmente metálica que podría hacerse conformando y soldando láminas de acero de bajo carbono o moldeando y colando las partes en hierro gris.

### 5.3. Estructura

La estructura de las estufas estudiadas aquí es sencilla y fácil de armar. Las patas se unen a los marcos a través de unas pestañas en un ajuste de interferencia (Figura 24). Sin embargo, cuando se desea mover una estufa armada la sujeción de las patas a los marcos de la estructura no asegura que las partes permanezcan juntas. Por eso se sugiere incluir algunos sistemas de sujeción como tornillos y tuercas para mantener unidas las patas a los marcos incluso cuando la estufa sea desplazada.



## Programa Paisajes de Conservación



Figura 24. Ensamble de ajuste por interferencia entre las patas y los marcos que integran la estructura de las estufas.

Adicionalmente, la estructura puede ser más sencilla y barata cuando se considere reducir el volumen del cuerpo de la estufa que encierra la cámara de combustión.

### 5.4. Cámara de combustión

En muchas regiones de Colombia se encuentra disponible la tubería de gres y sus accesorios muy usados en la construcción de acueductos, alcantarillados y en chimeneas de estufas convencionales de carbón y/o madera. Un codo de 90° de 6 u 8 pulgadas de diámetro podría servir muy bien de cámara de combustión en lugar del codo metálico. Además de ser menos costoso<sup>8</sup> tiene una conductividad térmica menor y una resistencia química superior al desgaste por corrosión que sufren los materiales en presencia de altas temperaturas y altas concentraciones de oxígeno y humedad, típicas de la combustión de la biomasa. Sus principales desventajas son mayores peso y fragilidad.

### 5.5. Chimenea

La chimenea de la estufa también podría considerarse en tubería de gres vitrificado de 6 pulgadas de diámetro siempre y cuando sea viable la estructura de soporte del peso de 18 kg por metro lineal. Las ventajas son mayor aislamiento térmico y mayor durabilidad por resistencia a la corrosión comparado con el tubo cuadrado hecho en lámina de acero galvanizado.

<sup>8</sup> Los codos de gres vitrificado de 6 y 8 pulgadas de diámetro cuestan \$9250 y \$14105 por unidad (IVA incluido) respectivamente, comparados con \$35000 por unidad para el caso metálico.



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



## Programa Paisajes de Conservación

### 6. Conclusiones

Las conclusiones más importantes de este estudio se pueden resumir así:

- a) El diseño de las estufas es muy bueno con relación a los requerimientos de empaque compacto para el transporte y de ensamble in situ por parte de un usuario sin conocimientos técnicos ni herramientas especializadas.
- b) Las pruebas experimentales realizadas a las estufas de Patrimonio Natural en dos condiciones ambientales que cubren gran parte de situaciones del territorio colombiano muestran que, a pesar de desarrollar potencias térmicas típicas, son de calentamiento lento y baja eficiencia térmica cuando se las compara con alternativas de estufas mejoradas caracterizadas con los mismos protocolos. Esta situación representa oportunidades de mejora importantes.
- c) Los análisis de transferencia de calor permiten concluir que sería conveniente bajar la inercia térmica de las estufas mediante un rediseño para mejorar su eficiencia y aumentar la velocidad de calentamiento, disminuir los requerimientos de materiales y, eventualmente, su costo.
- d) Adicionalmente, conviene mejorar el intercambio de calor por convección entre los gases de combustión y las superficies de calentamiento mediante diversas estrategias que se han propuesto en este estudio.
- e) Se han propuesto materiales y procesos alternativos de manufactura para futuros modelos de las estufas de Patrimonio Natural.
- f) Se cuenta ahora con una herramienta de cálculo en forma de libro de Excel que permite estudiar los efectos de modificaciones en el diseño de las estufas sin ser especialista en transferencia de calor y/o energía. La herramienta incorpora la base de datos, proporcionada por Patrimonio Natural, de poderes caloríficos de las maderas más comúnmente usadas en Colombia como combustible.

## Programa Paisajes de Conservación

### 7. Anexos

#### 7.1. Prueba preliminar de las estufas

La prueba preliminar de cada estufa se realizó en el municipio de Cajicá (Cundinamarca)<sup>9</sup>. Se usó una instrumentación reducida en la medición de la temperatura de los gases de combustión y la temperatura del agua de las ollas y de la pared externa de la estufa. Por otro lado, se hizo un registro manual a intervalos de tiempo irregulares de estas temperaturas. La madera utilizada en ambos casos fue la especie *Eucalyptus Globulus* adquirida en el mismo expendio (Supertienda Olímpica Autopista Norte km 21) y preparada por el mismo proveedor (Barbacoa).

Las pruebas preliminares mostraron varios aspectos interesantes que se observan en la Figura 25 para la estufa de un fogón sin chimenea, y en la Figura 26 para la estufa de un fogón y plancha con chimenea.

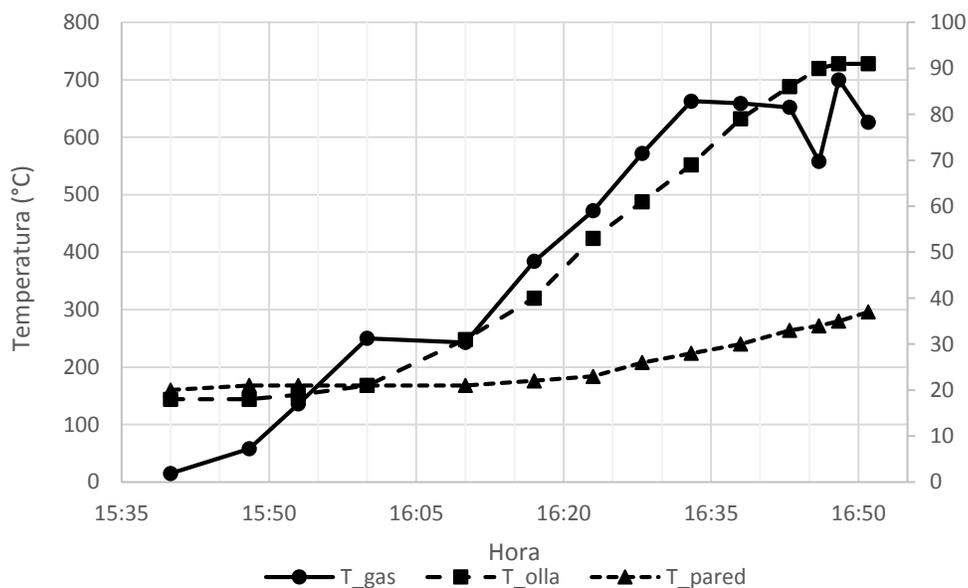


Figura 25. Evolución de las temperaturas de la prueba preliminar de la estufa de un fogón sin chimenea. La escala de la izquierda corresponde a la temperatura de los gases de combustión. La escala de la derecha a las temperaturas del agua en la olla y en la superficie externa de la estufa.

En el caso de la estufa de un fogón sin chimenea los datos se registraron en intervalos irregulares de 2 a 10 minutos con un promedio para toda la prueba de 5.5 minutos. La temperatura de los gases de combustión aumentó a una razón de 16°C por minuto de forma aproximadamente constante. El tiempo total de la prueba fue de 1 hora y 11 minutos.

<sup>9</sup> El lugar seleccionado se encuentra a 2561 m sobre el nivel del mar. Cajicá tiene una temperatura promedio de 14°C y una precipitación anual promedio de 830 mm.

## Programa Paisajes de Conservación

Para la estufa de un fogón y plancha con chimenea los datos se registraron en intervalos irregulares de 5 a 14 minutos con un promedio para toda la prueba de 7.5 minutos. El calentamiento de los gases de combustión fue muy irregular con altibajos que no se podían controlar mediante la alimentación de la madera. El tiempo total de la prueba fue de 1 hora y 45 minutos.

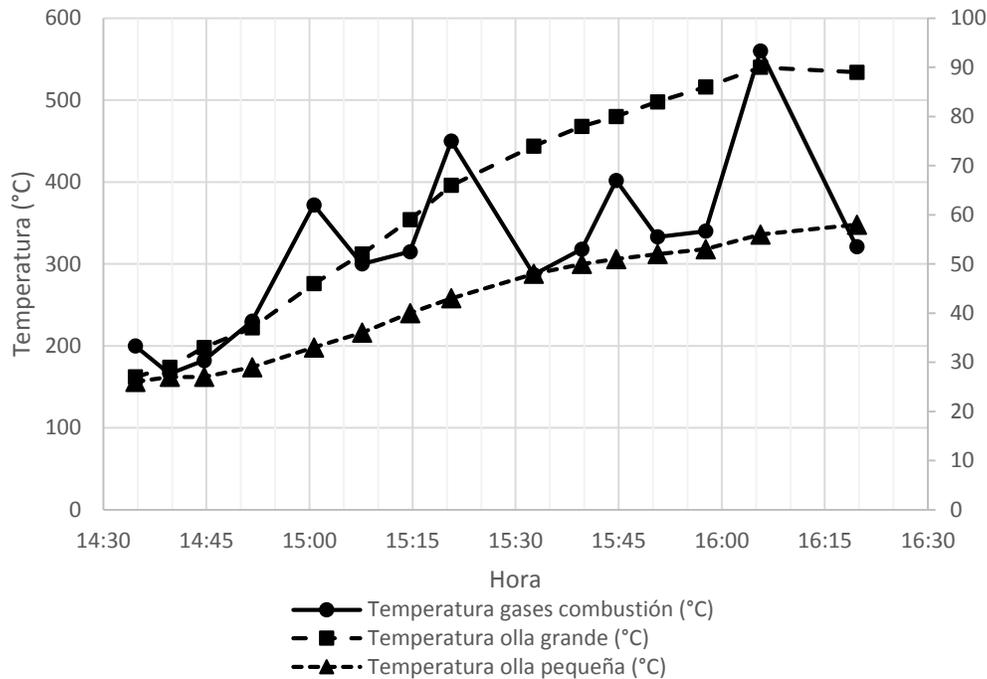


Figura 26. Evolución de las temperaturas de la prueba preliminar de la estufa de un fogón y plancha con chimenea. La escala de la izquierda corresponde a la temperatura de los gases de combustión. La escala de la derecha a las temperaturas del agua en las ollas.

En ninguna de las estufas el sistema entró en condición estacionaria en las variables térmicas, por lo cual se estimó que la temperatura de las paredes externas seguiría aumentando con el uso extendido en el tiempo de la estufa. La diferencia en el tiempo requerido por la ebullición puso en evidencia que las estufas tienen un comportamiento diferente pues la especie de madera usada, su presentación física y su contenido de humedad eran muy similares.

Tanto en las pruebas preliminares como en las definitivas se usó el equipo de protección que se muestra en la Figura 27 recomendado en el protocolo del WBT. Adicionalmente se usó un overol y botas con puntera reforzada dado que se manipulan cargas pesadas como la losa de concreto donde se apoya la olla principal.



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



**patrimonio natural**  
Fondo para la Biodiversidad y Áreas Protegidas

## Programa Paisajes de Conservación



Figura 27. Equipo de protección usado en las pruebas: monogafas, respirador con filtro de humos y partículas, y guantes largos para alta temperatura.



## Programa Paisajes de Conservación

### 7.2. Reportes de las pruebas de ebullición de agua (WBT)

A continuación se presentan las tablas incluidas en la hoja electrónica (versión 4.2.4) que acompaña las pruebas de ebullición de agua (versión 4.2.3) para las cuatro pruebas realizadas.

#### 7.2.1. Estufa de un fogón sin chimenea

##### Water Boiling Test - General Information

<b>Test &amp; stove description</b>	
Name of Tester(s)	Orlando Porras, Carlos de Castro
Test Number or Code	1
Test Dates	04/12/2015
Test Year	2015
Test Location	Cajicá, Cundinamarca
Replicate Test Number	
Altitude/Elevation (m)	2561
Stove Type/Model	Patrimonio Natural un fogón sin chimenea
Manufactured by	
Description and Notes	Estufa de un fogón sin chimenea
Description of Pot(s)	
Aluminio alta pureza Imusa 24 cm 7 L recortada	
<b>Ambient conditions</b>	
Air relative humidity (%)	62.8
Local boiling point (C)	91.7
<b>Emission testing</b>	
Atmospheric P (kPa)	
Pitot delta-P	
Hood flow rate (m3/hr)	
<b>Notes or description about stove or operation not included elsewhere on this form</b>	

##### Version 4.2.4

<b>Fuel description</b>	
Your general description	Eucalipto cortado y empacado por Barbacoa
Fuel type	Eucalyptus Globulus (Southern Blue Gum, Fever Tree)
Fuel description	Cut to size
Average length (cm)	30
Cross-sectional dimensions (cm x cm)	3.5 x 1.0
<b>Default values (looked up)</b>	
Gross calorific value	20,160 HHV, kJ/kg
Net calorific value	18,840 LHV, kJ/kg
Char calorific value	29,500 LHV, kJ/kg
Char carbon content	95% by mass
<i>If possible, enter a calorific value from measurements of local fuel below.</i>	
<input type="checkbox"/> Check box if you have a measured calorific value	
Measured gross calorific value	HHV measured, kJ/kg
Measured net calorific value	LHV, kJ/kg
Assumed net calorific value	LHV, kJ/kg
<b>Values to be used for tests</b>	
Gross calorific value	20,160 HHV, kJ/kg
Net calorific value	18,840 LHV, kJ/kg
Fuel carbon content	0.500 by mass
<b>Description of firestarter (e.g. paper, fluid) and small wood or kindling</b>	
(note: Kindling should be weighed and reported with wood)	
Trapo de algodón de 10 cm x 10 cm impregnado de alcohol etílico industrial	

<b>Description of operation during the high-power test</b>	
How is fire started?	Mediante el encendido de un trapo de algodón impregnado un poco de alcohol etílico industrial. Se colocaron algunos de los maderos más delgados para facilitar el encendido (136 g parte 1, 95 g parte 2).
When do you add new fuel to the fire?	Cuando la temperatura de los gases de combustión empezaba a descender
How much fuel do you add at one time?	Para la etapa 1, un promedio de 191 g, 5 veces Para la etapa 2, un promedio de 277 g, 3 veces
How often do you feed the fire without adding fuel (e.g. push sticks)?	Cada dos o tres minutos
Do you control the air above or below the fire? If so, what do you do?	No se hizo ningún control del aire

<b>Description of operation during the simmering test</b>	
How is fire started?	Mediante las pavesas incandescentes se prendió el resto de la madera
When do you add new fuel to the fire?	Cuando la temperatura del agua descendía debajo de los 88°C
How much fuel do you add at one time?	Para la etapa 3, un promedio de 57 g, 4 veces
How often do you feed the fire without adding fuel (e.g. push sticks)?	Cada tres o cuatro minutos
Do you control the air above or below the fire? If so, what do you do?	No se hizo ningún control del aire



## Programa Paisajes de Conservación

### WATER BOILING TEST - VERSION 4.2.4 - TEST #1

#### DATA AND CALCULATION FORM (for one to four pots)\*

*Shaded cells and arrows require user input; unshaded cells automatically display outputs*

#### Qualitative data

Name(s) of Tester(s)	Orlando Porras, Carlos de Castro
Test Number	1
Date	04/12/2015
Location	Cajicá, Cundinamarca
Stove type/model	Patrimonio Natural un fogón sin chimenea
Type of fuel	Eucalipto cortado y empacado por Barbacoa

gray: efficiency

blue: emissions

pink: error, missing input

#### Initial Test Conditions

Data	value	units	label	Data	value	units	label
Air temperature	15.0	°C		Dry weight of Pot # 1 (grams)	537	g	P1
Wind conditions	Light breeze			Dry weight of Pot # 2 (grams)		g	P2
Fuel dimensions	30 cm			Dry weight of Pot # 3 (grams)		g	P3
Fuel moisture content (wet basis)	10%	%	MC	Dry weight of Pot # 4 (grams)		g	P4
Gross calorific value (dry fuel)	20,160	kJ/kg	HHV	Weight of container for char (grams)	21	g	k
Net calorific value (dry fuel)	18,840	kJ/kg	LHV	Local boiling point	91.7	°C	T <sub>b</sub>
Effective calorific value				Background concentrations: CO <sub>2</sub>		ppm	CO <sub>2,b</sub>
(accounting for fuel moisture)	16,783	kJ/kg	EHV	CO		ppm	CO <sub>b</sub>
Char calorific value	29,500	kJ/kg		PM		ug/m <sup>3</sup>	PM <sub>b</sub>

#### Notes about this test:

A lo largo de toda la prueba la estufa produjo mucho humo intermitentemente al punto de obligar a los operadores a retirarse para recuperar la respiración.

Olla apoyada en varilla de sección transversal cuadrada de 1/2 "de lado. El espacio entre la olla y la salida del ducto de gases es de 2 cm



## Programa Paisajes de Conservación

TEST #1 1		COLD START HIGH POWER				HOT START HIGH POWER (OPTIONAL)				SIMMER TEST			
Measurements	Units	Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: 45 min	
		data	label	data	label	data	label	data	label	data	label	data	label
Time (in 24 hour form)	hr:min	15:50	t <sub>ci</sub>	16:24	t <sub>cf</sub>	16:46	t <sub>hi</sub>	17:18	t <sub>hf</sub>	17:29	t <sub>si</sub>	18:14	t <sub>sf</sub>
Weight of fuel	g	2272	f <sub>ci</sub>	1261	f <sub>cf</sub>	2552	f <sub>hi</sub>	1659	f <sub>hf</sub>	2354	f <sub>si</sub>	1,856	f <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 1	°C	18.0	T1 <sub>ci</sub>	91.7	T1 <sub>cf</sub>	18.0	T1 <sub>hi</sub>	91.7	T1 <sub>hf</sub>	88.0	T1 <sub>si</sub>	88.0	T1 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 2	°C		T2 <sub>ci</sub>		T2 <sub>cf</sub>		T2 <sub>hi</sub>		T2 <sub>hf</sub>		T2 <sub>si</sub>		T2 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 3	°C		T3 <sub>ci</sub>		T3 <sub>cf</sub>		T3 <sub>hi</sub>		T3 <sub>hf</sub>		T3 <sub>si</sub>		T3 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 4	°C		T4 <sub>ci</sub>		T4 <sub>cf</sub>		T4 <sub>hi</sub>		T4 <sub>hf</sub>		T4 <sub>si</sub>		T4 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 1 with water	g	5537	P1 <sub>ci</sub>	5223	P1 <sub>cf</sub>	5537	P1 <sub>hi</sub>	5214	P1 <sub>hf</sub>	5214	P1 <sub>si</sub>	4526	P1 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 2 with water	g		P2 <sub>ci</sub>		P2 <sub>cf</sub>		P2 <sub>hi</sub>		P2 <sub>hf</sub>		P2 <sub>si</sub>		P2 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 3 with water	g		P3 <sub>ci</sub>		P3 <sub>cf</sub>		P3 <sub>hi</sub>		P3 <sub>hf</sub>		P3 <sub>si</sub>		P3 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 4 with water	g		P4 <sub>ci</sub>		P4 <sub>cf</sub>		P4 <sub>hi</sub>		P4 <sub>hf</sub>		P4 <sub>si</sub>		P4 <sub>sf</sub>
Fire-starting materials (if any)	--	Trapo algodón, alcohol				Trapo algodón, al				Pavesas incandesc			
Weight of charcoal+container	g			149	c <sub>c</sub>			149	c <sub>h</sub>			127	c <sub>s</sub>
Average CO2	ppm				CO2 <sub>c</sub>				CO2 <sub>h</sub>				CO2 <sub>s</sub>
Average CO	ppm				CO <sub>c</sub>				CO <sub>h</sub>				CO <sub>s</sub>
Average PM	ug/m3				PM <sub>c</sub>				PM <sub>h</sub>				PM <sub>s</sub>
Average Duct Temperature	°C				T <sub>cd</sub>				T <sub>hd</sub>				T <sub>sd</sub>
Total CO2 (if available)	g				m <sub>CO2,c</sub>				m <sub>CO2,h</sub>				m <sub>CO2,s</sub>
Total CO (if available)	g				m <sub>CO,c</sub>				m <sub>CO,h</sub>				m <sub>CO,s</sub>
Total PM (if available)	g				m <sub>PM,c</sub>				m <sub>PM,h</sub>				m <sub>PM,s</sub>

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START		SIMMER TEST (CALCULATIONS DIFFER FROM HIGH POWER TEST)			
		data	label	data	label	Units	data	label	
Fuel consumed (moist)	g	1,011	f <sub>cm</sub>	893	f <sub>hm</sub>	Fuel consumed during the simmer phase (n	g	498	f <sub>sm</sub>
Net change in char during test	g	128	Δc <sub>c</sub>	128	Δc <sub>h</sub>	Net change in char during test phase	g	(22)	Δc <sub>s</sub>
Equivalent dry fuel consumed	g	700	f <sub>cd</sub>	595.1163	f <sub>hd</sub>	Equivalent dry fuel consumed	g	478	f <sub>sd</sub>
Water vaporized from all pots	g	314	w <sub>cv</sub>	323	w <sub>hv</sub>	Water vaporized	g	688	w <sub>sv</sub>
Effective mass of water boiled	g	4,686	w <sub>cr</sub>	4,677	w <sub>hr</sub>	Water remaining at end - All Pots	g	3,989	w <sub>sr</sub>
Time to boil Pot # 1	min	34	Δt <sub>c</sub>	32	Δt <sub>h</sub>	Time of simmer (should be ~45 minutes)	min	45	Δt <sub>s</sub>
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	35	Δt <sub>c</sub>	33	Δt <sub>h</sub>	Thermal efficiency	%	17%	h <sub>s</sub>
Thermal efficiency	%	17%	h <sub>c</sub>	20%	h <sub>h</sub>	Burning rate	g/min	10.6	r <sub>sb</sub>
Burning rate	g/min	20.6	r <sub>cb</sub>	18.6	r <sub>hb</sub>	Specific fuel consumption	g/liter remaining	119.9	SC <sub>s</sub>
Specific fuel consumption	g/liter boiled	149	SC <sub>c</sub>	127.2432	SC <sub>h</sub>	Firepower	watts	3336	FP <sub>s</sub>
Temp-corr sp consumption	g/liter	152.0678151	SC <sub>c</sub>	129.4876	SC <sub>h</sub>	Turn down ratio	--	1.94	TDR
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	2,865	SE <sub>c</sub>	2,440	SE <sub>h</sub>	Specific Energy Consumption	kJ/liter	2,258	SE <sub>s</sub>
Firepower	watts	6467	FP <sub>c</sub>	5840	FP <sub>h</sub>	Fuel Benchmark to Complete 5L WBT	g	1,303	BF
						Energy Benchmark to Complete 5L WBT	kJ	24,552	BE

Emissions Calculation Method: Carbon Balance

IWA PERFORMANCE METRICS		Data	Tier
High Power Thermal Efficiency	%	0.19	1
Low Power Specific Fuel Consumption	MJ/(min-L)	0.050	0
High Power CO	g/MJ		
Low Power CO	g/(min-L)		
High Power PM	mg/MJ		
Low Power PM	mg/(min-L)		
Indoor CO Emissions	g/min		
Indoor PM Emissions	mg/min		



## Programa Paisajes de Conservación

### Water Boiling Test - General Information

<b>Test &amp; stove description</b>	
Name of Tester(s)	Orlando Porras
Test Number or Code	3
Test Dates	28/12/2015
Test Year	2015
Test Location	Flandes, Tolima
Replicate Test Number	
Altitude/Elevation (m)	287
Stove Type/Model	Patrimonio Natural un fogón sin chimenea
Manufactured by	
Description and Notes	Estufa de un fogón sin chimenea
Description of Pot(s)	
Aluminio alta pureza Imusa 24 cm 7 L recortada	
<b>Ambient conditions</b>	
Air relative humidity (%)	33
Local boiling point (C)	99
<b>Emission testing</b>	
Atmospheric P (kPa)	
Pitot delta-P	
Hood flow rate (m3/hr)	
<b>Notes or description about stove or operation not included elsewhere on this form</b>	

### Version 4.2.4

<b>Fuel description</b>	
Your general description	Matarraón entregado por Patrimonio Natural
Fuel type	Glicidia Sepium
Fuel description	Cut to size
Average length (cm)	19
Cross-sectional dimensions (cm x cm)	3 x 2
<b>Default values (looked up)</b>	
Gross calorific value	20,580 HHV, kJ/kg
Net calorific value	19,260 LHV, kJ/kg
Char calorific value	29,500 LHV, kJ/kg
Char carbon content	95% by mass
<i>If possible, enter a calorific value from measurements of local fuel below.</i>	
<input type="checkbox"/> Check box if you have a measured calorific value	
Measured gross calorific value	HHV measured, kJ/kg
Measured net calorific value	LHV, kJ/kg
Assumed net calorific value	LHV, kJ/kg
<b>Values to be used for tests</b>	
Gross calorific value	20,580 HHV, kJ/kg
Net calorific value	19,260 LHV, kJ/kg
Fuel carbon content	0.500 by mass
<b>Description of firestarter (e.g. paper, fluid) and small wood or kindling</b>	
(note: Kindling should be weighed and reported with wood)	
Una hoja de papel periódico cortado en pedazos y arrugado.	

### Description of operation during the high-power test

How is fire started?	Mediante el encendido de una hoja de papel periódico cortado en pedazos y arrugado. Se colocaron algunos de los maderos más delgados para facilitar el encendido (69 g parte 1, 303 g parte 2).
When do you add new fuel to the fire?	Cuando la temperatura de los gases de combustión empezaba a descender
How much fuel do you add at one time?	Para la etapa 1, un promedio de 125 g, 6 veces Para la etapa 2, un promedio de 197 g, 4 veces
How often do you feed the fire without adding fuel (e.g. push sticks)?	Cada dos o tres minutos
Do you control the air above or below the fire? If so, what do you do?	No se hizo ningún control del aire

### Description of operation during the simmering test

How is fire started?	Mediante las pavesas incandescentes se prendió el resto de la madera
When do you add new fuel to the fire?	Cuando la temperatura del agua descendía debajo de los 95°C
How much fuel do you add at one time?	Para la etapa 3, un promedio de 69 g, 4 veces
How often do you feed the fire without adding fuel (e.g. push sticks)?	Cada tres o cuatro minutos
Do you control the air above or below the fire? If so, what do you do?	No se hizo ningún control del aire



## Programa Paisajes de Conservación

### WATER BOILING TEST - VERSION 4.2.4 - TEST #1

#### DATA AND CALCULATION FORM (for one to four pots)\*

*Shaded cells and arrows require user input; unshaded cells automatically display outputs*

#### Qualitative data

Name(s) of Tester(s)	Orlando Porras
Test Number	3
Date	28/12/2015
Location	Flandes, Tolima
Stove type/model	Patrimonio Natural un fogón sin chimenea
Type of fuel	Matarratón entregado por Patrimonio Natural

gray: efficiency
blue: emissions
pink: error, missing input

#### Initial Test Conditions

Data	value	units	label	Data	value	units	label
Air temperature	29.5	°C		Dry weight of Pot # 1 (grams)	545	g	P1
Wind conditions	No wind			Dry weight of Pot # 2 (grams)		g	P2
Fuel dimensions	19 cm x 3 cm x 2 cm			Dry weight of Pot # 3 (grams)		g	P3
Fuel moisture content (wet basis)	10%	%	MC	Dry weight of Pot # 4 (grams)		g	P4
Gross calorific value (dry fuel)	20,580	kJ/kg	HHV	Weight of container for char (grams)	21	g	k
Net calorific value (dry fuel)	19,260	kJ/kg	LHV	Local boiling point	99.0	°C	T <sub>b</sub>
Effective calorific value				Background concentrations: CO <sub>2</sub>		ppm	CO <sub>2,b</sub>
(accounting for fuel moisture)	16,992	kJ/kg	EHV	CO		ppm	CO <sub>b</sub>
Char calorific value	29,500	kJ/kg		PM		ug/m <sup>3</sup>	PM <sub>b</sub>

Notes about this test:

Olla apoyada en varilla de sección transversal cuadrada de 1/2 "de lado. El espacio entre la olla y la salida del ducto de gases es de 2 cm aprox.



## Programa Paisajes de Conservación

TEST #13		COLD START HIGH POWER				HOT START HIGH POWER (OPTIONAL)				SIMMER TEST			
Measurements	Units	Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: 45 min	
		data	label	data	label	data	label	data	label	data	label	data	label
Time (in 24 hour form)	hr:min	17:10	t <sub>ci</sub>	17:59	t <sub>cf</sub>	18:34	t <sub>hi</sub>	19:26	t <sub>hf</sub>	19:40	t <sub>si</sub>	20:25	t <sub>sf</sub>
Weight of fuel	g	2116	f <sub>ci</sub>	1293	f <sub>cf</sub>	1567	f <sub>hi</sub>	375	f <sub>hf</sub>	1228	f <sub>si</sub>	970	f <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 1	°C	36.0	T1 <sub>ci</sub>	99.0	T1 <sub>cf</sub>	32.0	T1 <sub>hi</sub>	99.0	T1 <sub>hf</sub>	93.0	T1 <sub>si</sub>	96.0	T1 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 2	°C		T2 <sub>ci</sub>		T2 <sub>cf</sub>		T2 <sub>hi</sub>		T2 <sub>hf</sub>		T2 <sub>si</sub>		T2 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 3	°C		T3 <sub>ci</sub>		T3 <sub>cf</sub>		T3 <sub>hi</sub>		T3 <sub>hf</sub>		T3 <sub>si</sub>		T3 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 4	°C		T4 <sub>ci</sub>		T4 <sub>cf</sub>		T4 <sub>hi</sub>		T4 <sub>hf</sub>		T4 <sub>si</sub>		T4 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 1 with water	g	5545	P1 <sub>ci</sub>	5127	P1 <sub>cf</sub>	5548	P1 <sub>hi</sub>	5250	P1 <sub>hf</sub>	5250	P1 <sub>si</sub>	4437	P1 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 2 with water	g		P2 <sub>ci</sub>		P2 <sub>cf</sub>		P2 <sub>hi</sub>		P2 <sub>hf</sub>		P2 <sub>si</sub>		P2 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 3 with water	g		P3 <sub>ci</sub>		P3 <sub>cf</sub>		P3 <sub>hi</sub>		P3 <sub>hf</sub>		P3 <sub>si</sub>		P3 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 4 with water	g		P4 <sub>ci</sub>		P4 <sub>cf</sub>		P4 <sub>hi</sub>		P4 <sub>hf</sub>		P4 <sub>si</sub>		P4 <sub>sf</sub>
Fire-starting materials (if any)	--	Papel periodico								Pavesas incandescc			
Weight of charcoal+container	g			146	c <sub>c</sub>			146	c <sub>h</sub>			158	c <sub>s</sub>
Average CO2	ppm				CO2 <sub>c</sub>				CO2 <sub>h</sub>				CO2 <sub>s</sub>
Average CO	ppm				CO <sub>c</sub>				CO <sub>h</sub>				CO <sub>s</sub>
Average PM	ug/m3				PM <sub>c</sub>				PM <sub>h</sub>				PM <sub>s</sub>
Average Duct Temperature	°C				T <sub>cd</sub>				T <sub>hd</sub>				T <sub>sd</sub>
Total CO2 (if available)	g				m <sub>CO2,c</sub>				m <sub>CO2,h</sub>				m <sub>CO2,s</sub>
Total CO (if available)	g				m <sub>CO,c</sub>				m <sub>CO,h</sub>				m <sub>CO,s</sub>
Total PM (if available)	g				m <sub>PM,c</sub>				m <sub>PM,h</sub>				m <sub>PM,s</sub>

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START		SIMMER TEST (CALCULATIONS DIFFER FROM HIGH POWER TEST)			
		data	label	data	label	Units	data	label	
Fuel consumed (moist)	g	823	f <sub>cm</sub>	1,192	f <sub>hm</sub>	Fuel consumed during the simmer phase (n	g	258	f <sub>sm</sub>
Net change in char during test	g	125	Δc <sub>c</sub>	125	Δc <sub>h</sub>	Net change in char during test phase	g	12	Δc <sub>s</sub>
Equivalent dry fuel consumed	g	535	f <sub>cd</sub>	860.1732	f <sub>hd</sub>	Equivalent dry fuel consumed	g	209	f <sub>sd</sub>
Water vaporized from all pots	g	418	w <sub>cv</sub>	298	w <sub>hv</sub>	Water vaporized	g	813	w <sub>sv</sub>
Effective mass of water boiled	g	4,582	w <sub>cr</sub>	4,705	w <sub>hr</sub>	Water remaining at end - All Pots	g	3,892	w <sub>sr</sub>
Time to boil Pot # 1	min	49	Δt <sub>c</sub>	52	Δt <sub>h</sub>	Time of simmer (should be ~45 minutes)	min	45	Δt <sub>s</sub>
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	58	Δt <sub>c</sub> <sup>T</sup>	58	Δt <sub>h</sub> <sup>T</sup>	Thermal efficiency	%	47%	h <sub>s</sub>
Thermal efficiency	%	22%	h <sub>c</sub>	13%	h <sub>h</sub>	Burning rate	g/min	4.6	r <sub>sb</sub>
Burning rate	g/min	10.9	r <sub>cb</sub>	16.5	r <sub>hb</sub>	Specific fuel consumption	g/liter remaining	53.8	SC <sub>s</sub>
Specific fuel consumption	g/liter boiled	117	SC <sub>c</sub>	182.8211	SC <sub>h</sub>	Firepower	watts	1493	FP <sub>s</sub>
Temp-corr sp consumption	g/liter	138.9042932	SC <sub>c</sub> <sup>T</sup>	204.6505	SC <sub>h</sub> <sup>T</sup>	Turn down ratio	--	2.35	TDR
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	2,675	SE <sub>c</sub> <sup>T</sup>	3,942	SE <sub>h</sub> <sup>T</sup>	Specific Energy Consumption	kJ/liter	1,035	SE <sub>s</sub>
Firepower	watts	3502	FP <sub>c</sub>	5310	FP <sub>h</sub>	Fuel Benchmark to Complete 5L WBT	g	1,128	BF
						Energy Benchmark to Complete 5L WBT	kJ	21,719	BE

Emissions Calculation Method: Carbon Balance

IWA PERFORMANCE METRICS		Data	Tier
High Power Thermal Efficiency	%	0.17	1
Low Power Specific Fuel Consumption	MJ/(min·L)	0.023	3
High Power CO	g/MJ		
Low Power CO	g/(min·L)		
High Power PM	mg/MJ		
Low Power PM	mg/(min·L)		
Indoor CO Emissions	g/min		
Indoor PM Emissions	mg/min		



## Programa Paisajes de Conservación

### 7.2.2. Estufa de un fogón y plancha con chimenea

#### Water Boiling Test - General Information

<b>Test &amp; stove description</b>	
Name of Tester(s)	Orlando Porras
Test Number or Code	2
Test Dates	11/12/2015
Test Year	2015
Test Location	Cajicá, Cundinamarca
Replicate Test Number	
Altitude/Elevation (m)	2561
Stove Type/Model	Patrimonio Natural con chimenea
Manufactured by	
Description and Notes	
Description of Pot(s)	
No. 1: Aluminio alta pureza Imusa 24 cm 7 L recortada	
No. 2: Molde para ponqués en aluminio	
<b>Ambient conditions</b>	
Air relative humidity (%)	44.5
Local boiling point (C)	91.7
<b>Emission testing</b>	
Atmospheric P (kPa)	
Pitot delta-P	
Hood flow rate (m3/hr)	
<b>Notes or description about stove or operation not included elsewhere on this form</b>	

#### Version 4.2.4

<b>Fuel description</b>	
Your general description	Eucalipto cortado y empacado por Barbacoa
Fuel type	Eucalyptus Globulus (Southern Blue Gum, Fever Tree)
Fuel description	Cut to size
Average length (cm)	30
Cross-sectional dimensions (cm x cm)	3.5 x 1.0
<b>Default values (looked up)</b>	
Gross calorific value	20,160 HHV, kJ/kg
Net calorific value	18,840 LHV, kJ/kg
Char calorific value	29,500 LHV, kJ/kg
Char carbon content	95%, by mass
<i>If possible, enter a calorific value from measurements of local fuel below</i>	
<input type="checkbox"/> Check box if you have a measured calorific value	
Measured gross calorific value	HHV measured, kJ/kg
Measured net calorific value	LHV, kJ/kg
Assumed net calorific value	LHV, kJ/kg
<b>Values to be used for tests</b>	
Gross calorific value	20,160 HHV, kJ/kg
Net calorific value	18,840 LHV, kJ/kg
Fuel carbon content	0.500, by mass
<b>Description of firestarter (e.g. paper, fluid) and small wood or kindling</b>	
(note: Kindling should be weighed and reported with wood)	
Trapo de algodón de 10 cm x 10 cm impregnado de alcohol etílico industrial	

<b>Description of operation during the high-power test</b>	
How is fire started?	Mediante el encendido de un trapo de algodón impregnado un poco de alcohol etílico industrial. Se colocaron algunos de los maderos más delgados para facilitar el encendido (189 g parte 1, 88 g parte 2).
When do you add new fuel to the fire?	Cuando la temperatura de los gases de combustión empezaba a descender
How much fuel do you add at one time?	Para la etapa 1, un promedio de 199 g, cada 6.8 min, 8 v Para la etapa 2, un promedio de 236 g, 8.45 min, cada 1
How often do you feed the fire without adding fuel (e.g. push sticks)?	Cada dos o tres minutos
Do you control the air above or below the fire? If so, what do you do?	No se hizo ningún control del aire

<b>Description of operation during the simmering test</b>	
How is fire started?	Mediante las pavesas incandescentes se prendió el resto de la madera
When do you add new fuel to the fire?	Cuando la temperatura del agua descendía debajo de los 86°C
How much fuel do you add at one time?	Para la etapa 3, un promedio de 80 g, cada 4.3 min,
How often do you feed the fire without adding fuel (e.g. push sticks)?	Cada dos minutos
Do you control the air above or below the fire? If so, what do you do?	No se hizo ningún control del aire



## Programa Paisajes de Conservación

### WATER BOILING TEST - VERSION 4.2.4 - TEST #1

#### DATA AND CALCULATION FORM (for one to four pots)\*

*Shaded cells and arrows require user input; unshaded cells automatically display outputs*

#### Qualitative data

Name(s) of Tester(s)	Orlando Porras
Test Number	2
Date	11/12/2015
Location	Cajicá, Cundinamarca
Stove type/model	Patrimonio Natural con chimenea
Type of fuel	Eucalipto cortado y empacado por Barbacoa

gray: efficiency
blue: emissions
pink: error, missing input

#### Initial Test Conditions

Data	value	units	label	Data	value	units	label
Air temperature	14.0	°C		Dry weight of Pot # 1 (grams)	544	g	P1
Wind conditions				Dry weight of Pot # 2 (grams)	176	g	P2
Fuel dimensions	30 cm			Dry weight of Pot # 3 (grams)		g	P3
Fuel moisture content (wet basis)	12%	%	MC	Dry weight of Pot # 4 (grams)		g	P4
Gross calorific value (dry fuel)	20,160	kJ/kg	HHV	Weight of container for char (grams)	21	g	k
Net calorific value (dry fuel)	18,840	kJ/kg	LHV	Local boiling point	91.7	°C	T <sub>b</sub>
Effective calorific value				Background concentrations: CO <sub>2</sub>		ppm	CO <sub>2,b</sub>
(accounting for fuel moisture)	16,269	kJ/kg	EHV	CO		ppm	CO <sub>b</sub>
Char calorific value	29,500	kJ/kg		PM		ug/m <sup>3</sup>	PM <sub>b</sub>



## Programa Paisajes de Conservación

TEST #1 2	Units	COLD START HIGH POWER				HOT START HIGH POWER (OPTIONAL)				SIMMER TEST			
		Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: 45 min	
		data	label	data	label	data	label	data	label	data	label	data	label
Time (in 24 hour form)	hr:min	16:56	t <sub>ci</sub>	18:15	t <sub>cf</sub>	18:53	t <sub>hi</sub>	20:25	t <sub>hf</sub>	20:50	t <sub>si</sub>	21:35	t <sub>sf</sub>
Weight of fuel	g	2403	f <sub>ci</sub>	6	f <sub>cf</sub>	2844	f <sub>hi</sub>	157	f <sub>hf</sub>	1593	f <sub>si</sub>	271.00	f <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 1	°C	18.0	T1 <sub>ci</sub>	90.0	T1 <sub>cf</sub>	17.0	T1 <sub>hi</sub>	89.0	T1 <sub>hf</sub>	84.0	T1 <sub>si</sub>	85.0	T1 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 2	°C	18.0	T2 <sub>ci</sub>	65.0	T2 <sub>cf</sub>	17.0	T2 <sub>hi</sub>	66.0	T2 <sub>hf</sub>	85.0	T2 <sub>si</sub>	84.0	T2 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 3	°C		T3 <sub>ci</sub>		T3 <sub>cf</sub>		T3 <sub>hi</sub>		T3 <sub>hf</sub>		T3 <sub>si</sub>		T3 <sub>sf</sub>
Water temperature, Pot # 4	°C		T4 <sub>ci</sub>		T4 <sub>cf</sub>		T4 <sub>hi</sub>		T4 <sub>hf</sub>		T4 <sub>si</sub>		T4 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 1 with water	g	5544	P1 <sub>ci</sub>	5451	P1 <sub>cf</sub>	5465	P1 <sub>hi</sub>	5177	P1 <sub>hf</sub>	5177	P1 <sub>si</sub>	4380	P1 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 2 with water	g	1676	P2 <sub>ci</sub>	1616	P2 <sub>cf</sub>	1672	P2 <sub>hi</sub>	1512	P2 <sub>hf</sub>	1512	P2 <sub>si</sub>	1445	P2 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 3 with water	g		P3 <sub>ci</sub>		P3 <sub>cf</sub>		P3 <sub>hi</sub>		P3 <sub>hf</sub>		P3 <sub>si</sub>		P3 <sub>sf</sub>
Weight of Pot # 4 with water	g		P4 <sub>ci</sub>		P4 <sub>cf</sub>		P4 <sub>hi</sub>		P4 <sub>hf</sub>		P4 <sub>si</sub>		P4 <sub>sf</sub>
Fire-starting materials (if any)	--												
Weight of charcoal+container	g			177	c <sub>c</sub>			177	c <sub>h</sub>			262	c <sub>s</sub>
Average CO2	ppm				CO2 <sub>c</sub>				CO2 <sub>h</sub>				CO2 <sub>s</sub>
Average CO	ppm				CO <sub>c</sub>				CO <sub>h</sub>				CO <sub>s</sub>
Average PM	ug/m3				PM <sub>c</sub>				PM <sub>h</sub>				PM <sub>s</sub>
Average Duct Temperature	°C				T <sub>cd</sub>				T <sub>hd</sub>				T <sub>sd</sub>
Total CO2 (if available)	g				m <sub>CO2,c</sub>				m <sub>CO2,h</sub>				m <sub>CO2,s</sub>
Total CO (if available)	g				m <sub>CO,c</sub>				m <sub>CO,h</sub>				m <sub>CO,s</sub>
Total PM (if available)	g				m <sub>PM,c</sub>				m <sub>PM,h</sub>				m <sub>PM,s</sub>

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START		SIMMER TEST (CALCULATIONS DIFFER FROM HIGH POWER TEST)			
		data	label	data	label	Units	data	label	
Fuel consumed (moist)	g	2,397	f <sub>cm</sub>	2,687	f <sub>hm</sub>	Fuel consumed during the simmer phase (n	g	1,322	f <sub>sm</sub>
Net change in char during test	g	156	ΔC <sub>c</sub>	156	ΔC <sub>h</sub>	Net change in char during test phase	g	85	ΔC <sub>s</sub>
Equivalent dry fuel consumed	g	1826	f <sub>cd</sub>	2076.098	f <sub>hd</sub>	Equivalent dry fuel consumed	g	1009	f <sub>sd</sub>
Water vaporized from all pots	g	153	w <sub>cv</sub>	448	w <sub>hv</sub>	Water vaporized	g	864	w <sub>sv</sub>
Effective mass of water boiled	g	5,712	w <sub>cr</sub>	5,342	w <sub>hr</sub>	Water remaining at end - All Pots	g	4,959	w <sub>sr</sub>
Time to boil Pot # 1	min	79	Δt <sub>c</sub>	92	Δt <sub>h</sub>	Time of simmer (should be ~45 minutes)	min	45	Δt <sub>s</sub>
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	80	Δt <sub>c</sub>	92	Δt <sub>h</sub>	Thermal efficiency	%	10%	h <sub>s</sub>
Thermal efficiency	%	6%	h <sub>c</sub>	7%	h <sub>h</sub>	Burning rate	g/min	22.4	r <sub>sb</sub>
Burning rate	g/min	23.1	r <sub>cb</sub>	22.6	r <sub>hb</sub>	Specific fuel consumption	g/liter remaining	203.4	SC <sub>s</sub>
Specific fuel consumption	g/liter boiled	320	SC <sub>c</sub>	388.6441	SC <sub>h</sub>	Firepower	watts	7037	FP <sub>s</sub>
Temp-corr sp consumption	g/liter	325.2501118	SC <sub>c</sub>	390.2049	SC <sub>h</sub>	Turn down ratio	--	1.03	TDR
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	6,128	SE <sub>c</sub>	7,351	SE <sub>h</sub>	Specific Energy Consumption	kJ/liter	3,832	SE <sub>s</sub>
Firepower	watts	7256	FP <sub>c</sub>	7086	FP <sub>h</sub>	Fuel Benchmark to Complete 5L WBT	g	2,806	BF
						Energy Benchmark to Complete 5L WBT	kJ	52,857	BE

Emissions Calculation Method: Carbon Balance

IWA PERFORMANCE METRICS		Data	Tier
High Power Thermal Efficiency	%	0.07	0
Low Power Specific Fuel Consumption	MJ/(min-L)	0.085	0
High Power CO	g/MJ		
Low Power CO	g/(min-L)		
High Power PM	mg/MJ		
Low Power PM	mg/(min-L)		
Indoor CO Emissions	g/min		
Indoor PM Emissions	mg/min		



## Programa Paisajes de Conservación

### Water Boiling Test - General Information

<b>Test &amp; stove description</b>	
Name of Tester(s)	Orlando Porras
Test Number or Code	4
Test Dates	29/12/2015
Test Year	2015
Test Location	Flandes, Tolima
Replicate Test Number	
Altitude/Elevation (m)	287
Stove Type/Model	Patrimonio Natural con chimenea
Manufactured by	
Description and Notes	
Description of Pot(s)	
No. 1: Aluminio alta pureza Imusa 24 cm 7 L recortada	
No. 2: Molde para ponqués en aluminio	
<b>Ambient conditions</b>	
Air relative humidity (%)	26.9
Local boiling point (C)	99
<b>Emission testing</b>	
Atmospheric P (kPa)	
Pitot delta-P	
Hood flow rate (m3/hr)	
Notes or description about stove or operation not included elsewhere on this form	

### Version 4.2.4

<b>Fuel description</b>	
Your general description	Eucalipto cortado y empacado por Barbacoa
Fuel type	Eucalyptus Globulus (Southern Blue Gum, Fever Tree)
Fuel description	Cut to size
Average length (cm)	30
Cross-sectional dimensions (cm x cm)	3.5 x 1.0
<b>Default values (looked up)</b>	
Gross calorific value	20,160_HHV, kJ/kg
Net calorific value	18,840_LHV, kJ/kg
Char calorific value	29,500_LHV, kJ/kg
Char carbon content	95%, by mass
<i>If possible, enter a calorific value from measurements of local fuel below</i>	
<input type="checkbox"/> Check box if you have a measured calorific value	
Measured gross calorific value	HHV measured, kJ/kg
Measured net calorific value	LHV, kJ/kg
Assumed net calorific value	LHV, kJ/kg
<b>Values to be used for tests</b>	
Gross calorific value	20,160_HHV, kJ/kg
Net calorific value	18,840_LHV, kJ/kg
Fuel carbon content	0.500_by mass
<b>Description of firestarter (e.g. paper, fluid) and small wood or kindling</b>	
(note: Kindling should be weighed and reported with wood)	
Hoja de papel periódico cortada en pedazos y arruçada	

### Description of operation during the high-power test

How is fire started?	Mediante una hoja de papel periódico en pedazos. Se colocaron algunos de los maderos más delgados para facilitar el encendido (189 g parte 1, 88 g parte 2).
When do you add new fuel to the fire?	Cuando la temperatura de los gases de combustión empezaba a descender
How much fuel do you add at one time?	Etapas 1, un promedio de 220 g, cada 9.4 min, 10 veces. Etapas 2, un promedio de 248 g, 8.67 min, cada 6 veces.
How often do you feed the fire without adding fuel (e.g. push sticks)?	Cada dos o tres minutos
Do you control the air above or below the fire? If so, what do you do?	No se hizo ningún control del aire

### Description of operation during the simmering test

How is fire started?	
When do you add new fuel to the fire?	
How much fuel do you add at one time?	
How often do you feed the fire without adding fuel (e.g. push sticks)?	
Do you control the air above or below the fire? If so, what do you do?	



## Programa Paisajes de Conservación

### WATER BOILING TEST - VERSION 4.2.4 - TEST #1

#### DATA AND CALCULATION FORM (for one to four pots)\*

*Shaded cells and arrows require user input; unshaded cells automatically display outputs*

#### Qualitative data

Name(s) of Tester(s)	Orlando Porras
Test Number	4
Date	29/12/2015
Location	Flandes, Tolima.
Stove type/model	Patrimonio Natural con chimenea
Type of fuel	Eucalipto cortado y empacado por Barbacoa

gray: efficiency
blue: emissions
pink: error, missing input

#### Initial Test Conditions

Data	value	units	label	Data	value	units	label
Air temperature	38.5	°C		Dry weight of Pot # 1 (grams)	547	g	P1
Wind conditions				Dry weight of Pot # 2 (grams)	179	g	P2
Fuel dimensions	30 cm			Dry weight of Pot # 3 (grams)		g	P3
Fuel moisture content (wet basis)	11%	%	MC	Dry weight of Pot # 4 (grams)		g	P4
Gross calorific value (dry fuel)	20,160	kJ/kg	HHV	Weight of container for char (grams)	21	g	k
Net calorific value (dry fuel)	18,840	kJ/kg	LHV	Local boiling point	99.0	°C	T <sub>b</sub>
Effective calorific value				Background concentrations: CO <sub>2</sub>		ppm	CO <sub>2,b</sub>
(accounting for fuel moisture)	16,491	kJ/kg	EHV	CO		ppm	CO <sub>b</sub>
Char calorific value	29,500	kJ/kg		PM		ug/m <sup>3</sup>	PM <sub>b</sub>



## Programa Paisajes de Conservación

TEST #1 4	Units	COLD START HIGH POWER				HOT START HIGH POWER (OPTIONAL)				SIMMER TEST			
		Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: 45 min	
		data	label	data	label	data	label	data	label	data	label	data	label
Time (in 24 hour form)	hr:min	12:19	t <sub>ci</sub>	13:51	t <sub>cd</sub>	14:55	t <sub>hi</sub>	15:50	t <sub>hd</sub>		t <sub>si</sub>		t <sub>sd</sub>
Weight of fuel	g	2489	f <sub>ci</sub>	61	f <sub>cd</sub>	1681	f <sub>hi</sub>		f <sub>hd</sub>		f <sub>si</sub>		f <sub>sd</sub>
Water temperature, Pot # 1	°C	29.0	T1 <sub>ci</sub>	99.0	T1 <sub>cd</sub>	32.0	T1 <sub>hi</sub>	95.0	T1 <sub>hd</sub>		T1 <sub>si</sub>		T1 <sub>sd</sub>
Water temperature, Pot # 2	°C	33.0	T2 <sub>ci</sub>	99.0	T2 <sub>cd</sub>	32.0	T2 <sub>hi</sub>	70.0	T2 <sub>hd</sub>		T2 <sub>si</sub>		T2 <sub>sd</sub>
Water temperature, Pot # 3	°C		T3 <sub>ci</sub>		T3 <sub>cd</sub>		T3 <sub>hi</sub>		T3 <sub>hd</sub>		T3 <sub>si</sub>		T3 <sub>sd</sub>
Water temperature, Pot # 4	°C		T4 <sub>ci</sub>		T4 <sub>cd</sub>		T4 <sub>hi</sub>		T4 <sub>hd</sub>		T4 <sub>si</sub>		T4 <sub>sd</sub>
Weight of Pot # 1 with water	g	5556	P1 <sub>ci</sub>	4889	P1 <sub>cd</sub>	5549	P1 <sub>hi</sub>	5189	P1 <sub>hd</sub>		P1 <sub>si</sub>		P1 <sub>sd</sub>
Weight of Pot # 2 with water	g	1780	P2 <sub>ci</sub>	1524	P2 <sub>cd</sub>	1679	P2 <sub>hi</sub>	1607	P2 <sub>hd</sub>		P2 <sub>si</sub>		P2 <sub>sd</sub>
Weight of Pot # 3 with water	g		P3 <sub>ci</sub>		P3 <sub>cd</sub>		P3 <sub>hi</sub>		P3 <sub>hd</sub>		P3 <sub>si</sub>		P3 <sub>sd</sub>
Weight of Pot # 4 with water	g		P4 <sub>ci</sub>		P4 <sub>cd</sub>		P4 <sub>hi</sub>		P4 <sub>hd</sub>		P4 <sub>si</sub>		P4 <sub>sd</sub>
Fire-starting materials (if any)	--												
Weight of charcoal+container	g			107	c <sub>c</sub>			78	c <sub>h</sub>				c <sub>s</sub>
Average CO2	ppm				CO2 <sub>c</sub>				CO2 <sub>h</sub>				CO2 <sub>s</sub>
Average CO	ppm				CO <sub>c</sub>				CO <sub>h</sub>				CO <sub>s</sub>
Average PM	ug/m3				PM <sub>c</sub>				PM <sub>h</sub>				PM <sub>s</sub>
Average Duct Temperature	°C				T <sub>cd</sub>				T <sub>hd</sub>				T <sub>sd</sub>
Total CO2 (if available)	g				m <sub>CO2,c</sub>				m <sub>CO2,h</sub>				m <sub>CO2,s</sub>
Total CO (if available)	g				m <sub>CO,c</sub>				m <sub>CO,h</sub>				m <sub>CO,s</sub>
Total PM (if available)	g				m <sub>PM,c</sub>				m <sub>PM,h</sub>				m <sub>PM,s</sub>

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START		SIMMER TEST (CALCULATIONS DIFFER FROM HIGH POWER TEST)			
		data	label	data	label	Units	data	label	
Fuel consumed (moist)	g	2,428	f <sub>cm</sub>	1,681	f <sub>hm</sub>	Fuel consumed during the simmer phase (n	g	-	f <sub>sm</sub>
Net change in char during test	g	86	ΔC <sub>c</sub>	57	ΔC <sub>h</sub>	Net change in char during test phase	g	(107)	ΔC <sub>s</sub>
Equivalent dry fuel consumed	g	1,991	f <sub>cd</sub>	1,382.201	f <sub>hd</sub>	Equivalent dry fuel consumed	g	168	f <sub>sd</sub>
Water vaporized from all pots	g	923	w <sub>cv</sub>	432	w <sub>hv</sub>	Water vaporized	g	-	w <sub>sv</sub>
Effective mass of water boiled	g	5,687	w <sub>cr</sub>	5,175	w <sub>hr</sub>	Water remaining at end - All Pots	g	(487)	w <sub>sr</sub>
Time to boil Pot # 1	min	92	Δt <sub>c</sub>	55	Δt <sub>h</sub>	Time of simmer (should be ~45 minutes)	min	-	Δt <sub>s</sub>
Temp-corr time to boil Pot # 1	min	99	Δt <sub>c</sub> <sup>T</sup>	62	Δt <sub>h</sub> <sup>T</sup>	Thermal efficiency	%		h <sub>s</sub>
Thermal efficiency	%	11%	h <sub>c</sub>	10%	h <sub>h</sub>	Burning rate	g/min		r <sub>sb</sub>
Burning rate	g/min	21.6	r <sub>cb</sub>	25.1	r <sub>hb</sub>	Specific fuel consumption	g/liter remaining	-344.4	SC <sub>s</sub>
Specific fuel consumption	g/liter boiled	350	SC <sub>c</sub>	267.1035	SC <sub>h</sub>	Firepower	watts		FP <sub>s</sub>
Temp-corr sp consumption	g/liter	375.0421642	SC <sub>c</sub> <sup>T</sup>	298.9965	SC <sub>h</sub> <sup>T</sup>	Turn down ratio	--		TDR
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter	7,066	SE <sub>c</sub> <sup>T</sup>	5,633	SE <sub>h</sub> <sup>T</sup>	Specific Energy Consumption	kJ/liter	(6,488)	SE <sub>s</sub>
Firepower	watts	6794	FP <sub>c</sub>	7891	FP <sub>h</sub>	Fuel Benchmark to Complete 5L WBT	g	(37)	BF
						Energy Benchmark to Complete 5L WBT	kJ	(692)	BE

Emissions Calculation Method: Carbon Balance

IWA PERFORMANCE METRICS	Data	Tier
High Power Thermal Efficiency	0.10	0
Low Power Specific Fuel Consumption	MJ/(min-L)	
High Power CO	g/MJ	
Low Power CO	g/(min-L)	
High Power PM	mg/MJ	
Low Power PM	mg/(min-L)	
Indoor CO Emissions	g/min	
Indoor PM Emissions	mg/min	



## Programa Paisajes de Conservación

### 7.3. Consumo de madera de todas las pruebas

En esta sección se reporta el consumo de madera de las cuatro pruebas realizadas.

#### 7.3.1. Estufa de un fogón sin chimenea

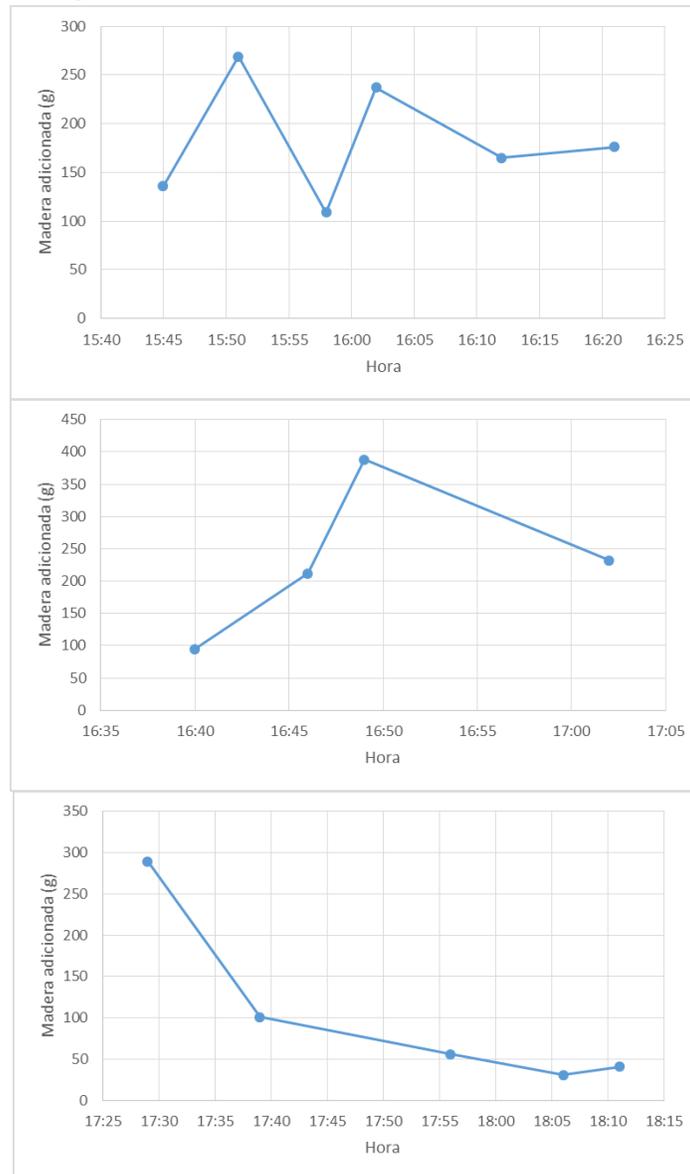


Figura 28. Consumo de madera en la prueba No. 1 en clima frío (*Eucalyptus Globulus*). De arriba hacia abajo: etapa de alta potencia y arranque en frío, etapa de alta potencia y arranque en caliente, y etapa de baja potencia.



## Programa Paisajes de Conservación

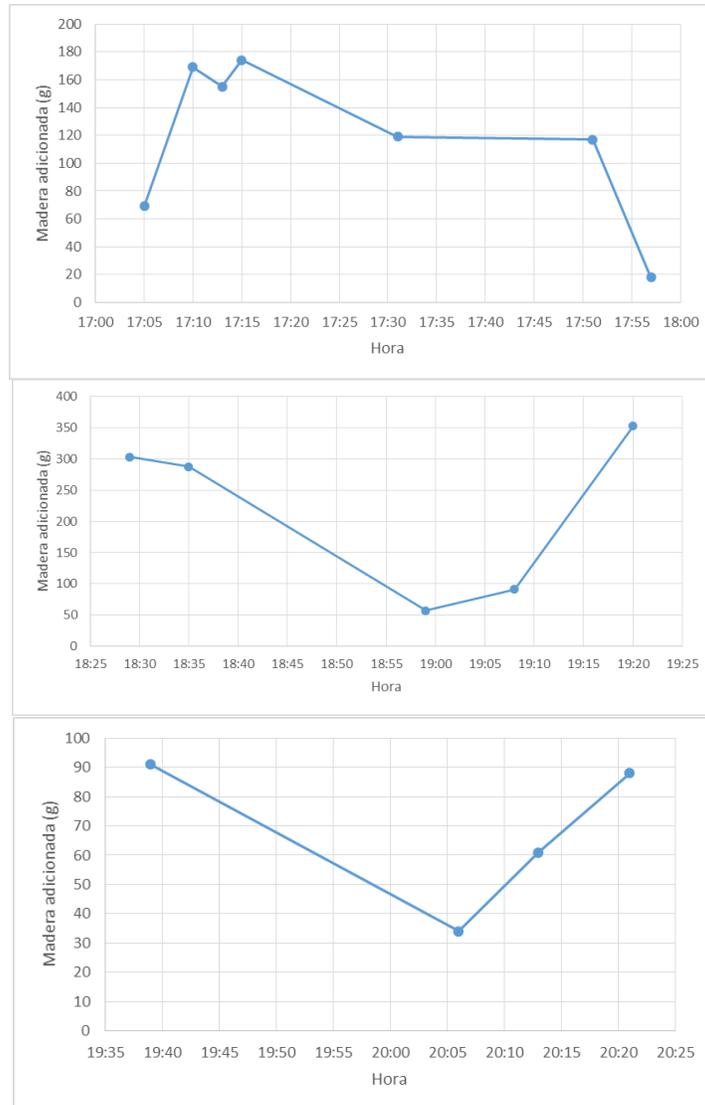


Figura 29. Consumo de madera en la prueba No. 3 en clima cálido (*Gliricidia Sepium*). De arriba hacia abajo: etapa de alta potencia y arranque en frío, etapa de alta potencia y arranque en caliente, y etapa de baja potencia.

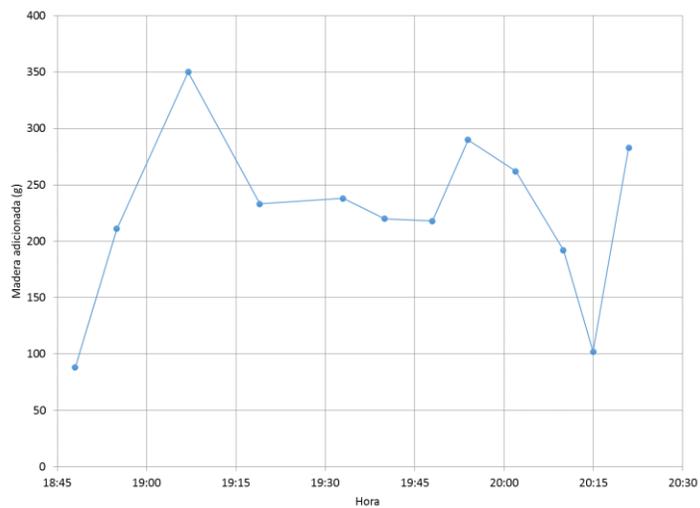
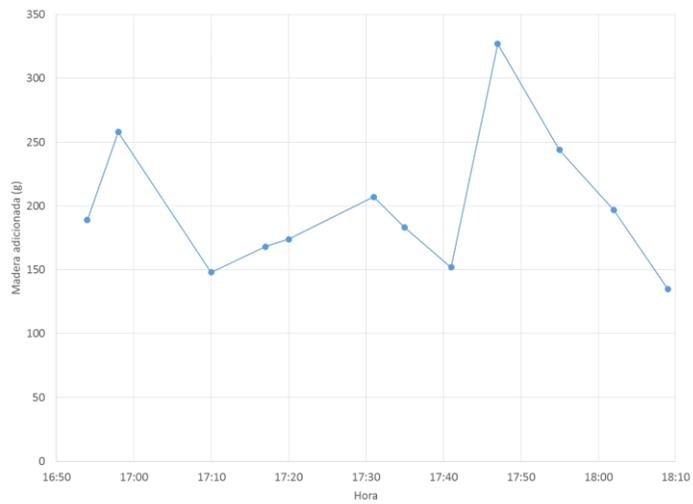


**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



## Programa Paisajes de Conservación

### 7.3.2. Estufa de un fogón y plancha con chimenea





## Programa Paisajes de Conservación

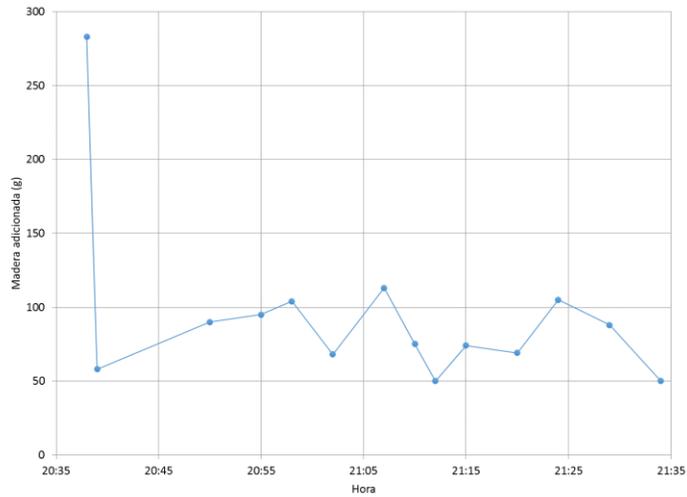


Figura 30. Consumo de madera en la prueba No. 2 en clima frío (*Eucalyptus Globulus*). De arriba hacia abajo: etapa de alta potencia y arranque en frío, etapa de alta potencia y arranque en caliente, y etapa de baja potencia.

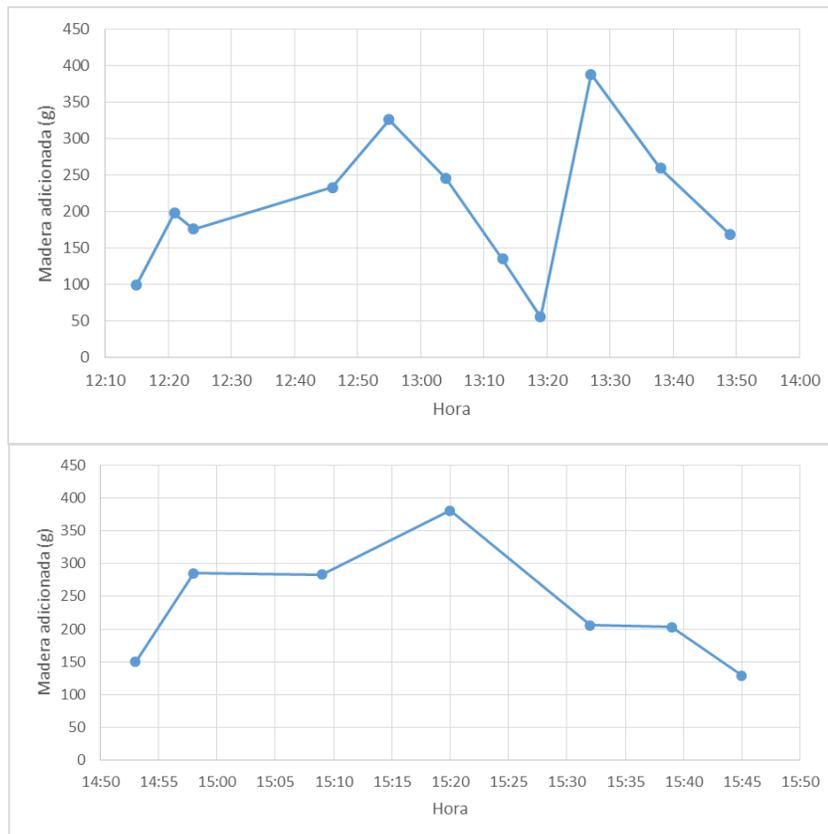


Figura 31. Consumo de madera en la prueba No. 4 en clima cálido (*Eucalyptus Globulus*). Arriba: etapa de alta potencia y arranque en frío; abajo: etapa de alta potencia y arranque en caliente. No se hizo la etapa de baja potencia en esta prueba.



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



**patrimonio natural**  
Fondo para la Biodiversidad y Áreas Protegidas

## Programa Paisajes de Conservación

### 7.4. Temperaturas y humedad relativa durante todas las pruebas

#### 7.4.1. Estufa de un fogón sin chimenea

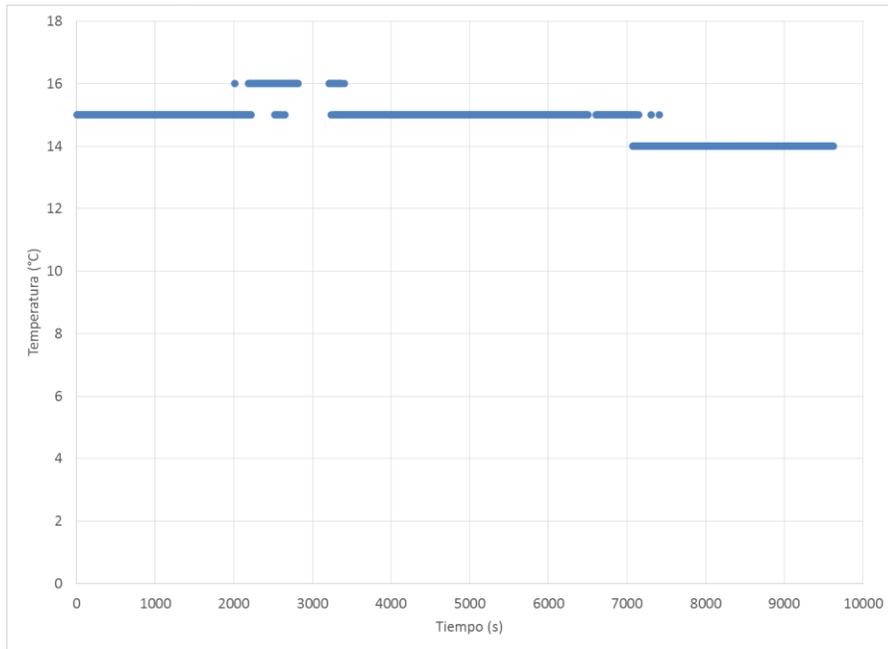


Figura 32. Temperatura ambiental durante la prueba No.1 en clima frío.

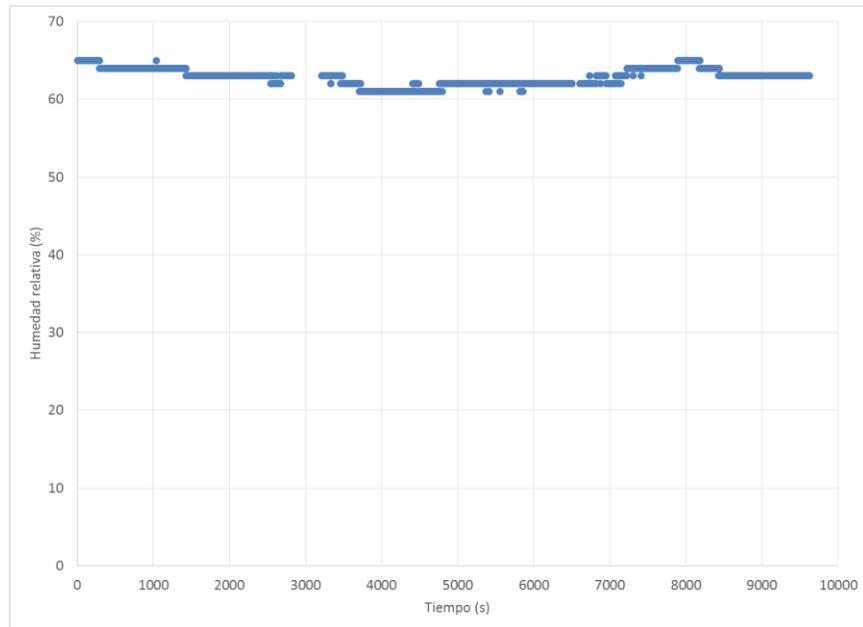


Figura 33. Humedad relativa ambiental durante la prueba No.1 en clima frío.



## Programa Paisajes de Conservación

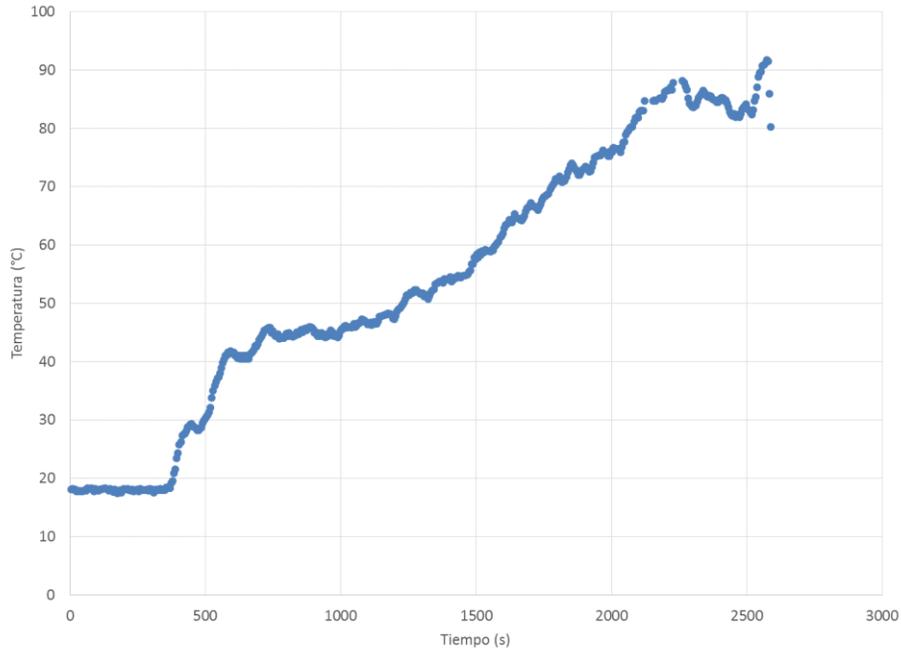


Figura 34. Temperatura del agua en la olla durante la etapa de alta potencia con arranque en frío para la prueba No. 1 en clima frío.

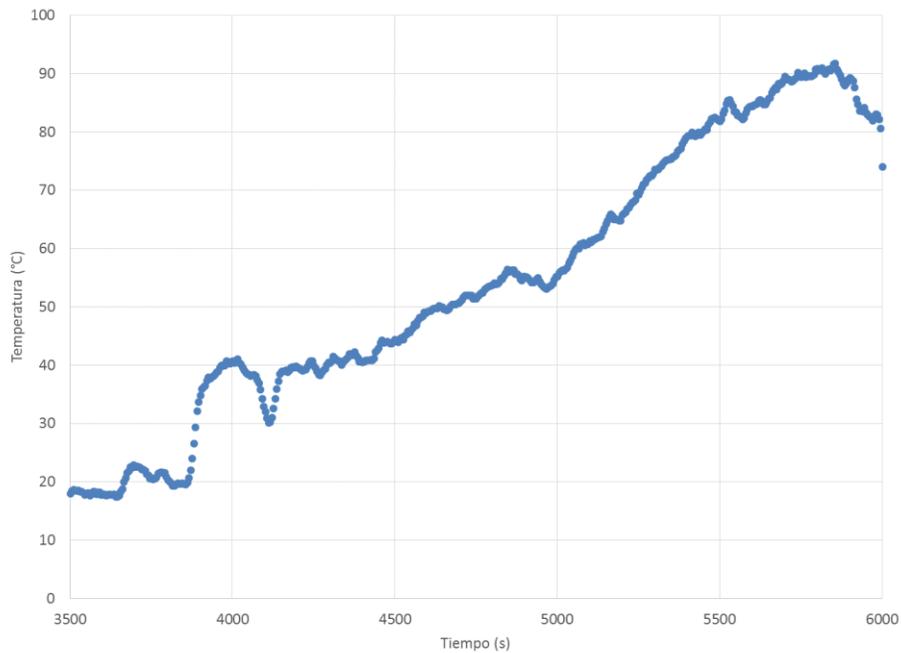


Figura 35. Temperatura del agua en la olla durante la etapa de alta potencia con arranque en caliente para la prueba No. 1 en clima frío.



## Programa Paisajes de Conservación

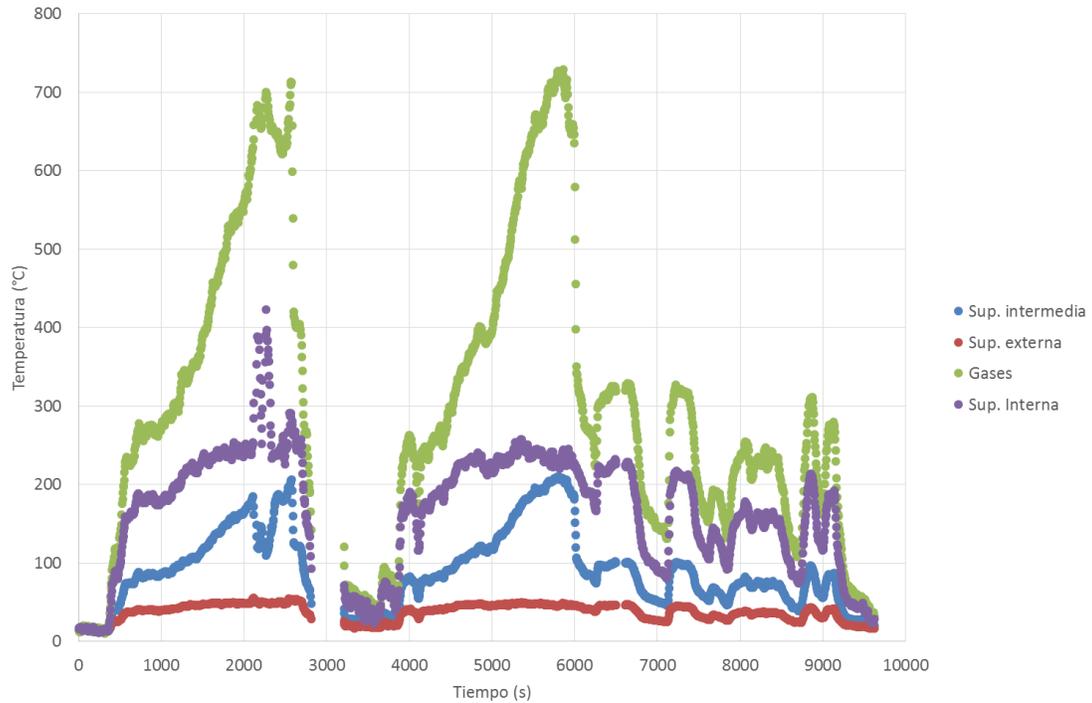


Figura 36. Evolución de las temperaturas de los gases de combustión y las superficies de la estufa para la prueba No. 1 en clima frío.

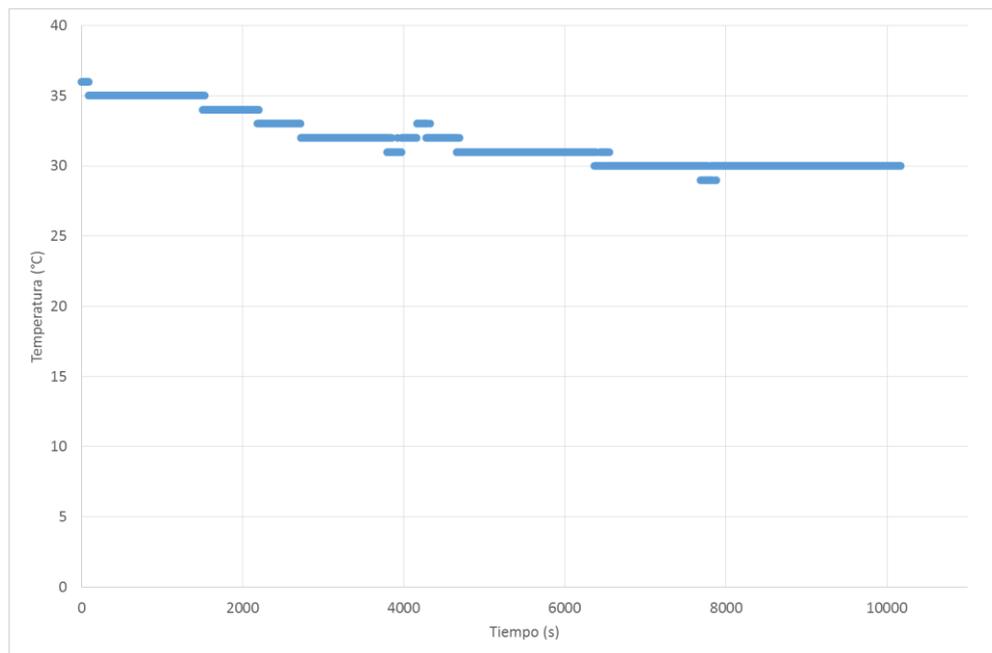


Figura 37. Temperatura ambiental durante la prueba No.3 en clima cálido.



## Programa Paisajes de Conservación

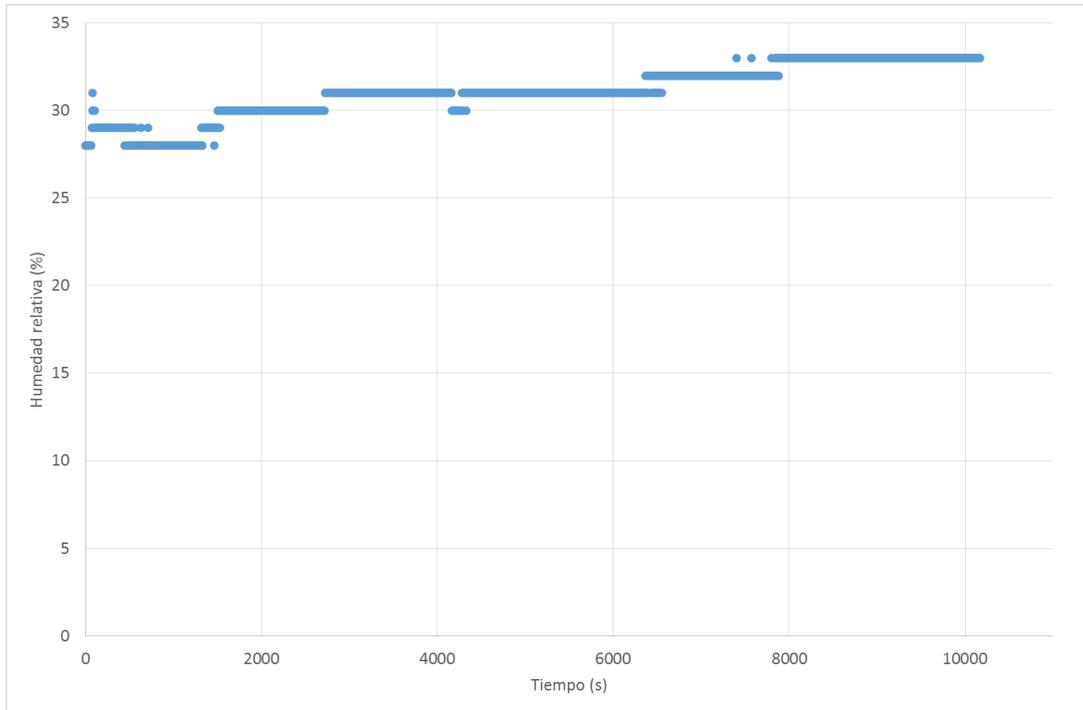


Figura 38. Humedad relativa ambiental durante la prueba No.3 en clima cálido.

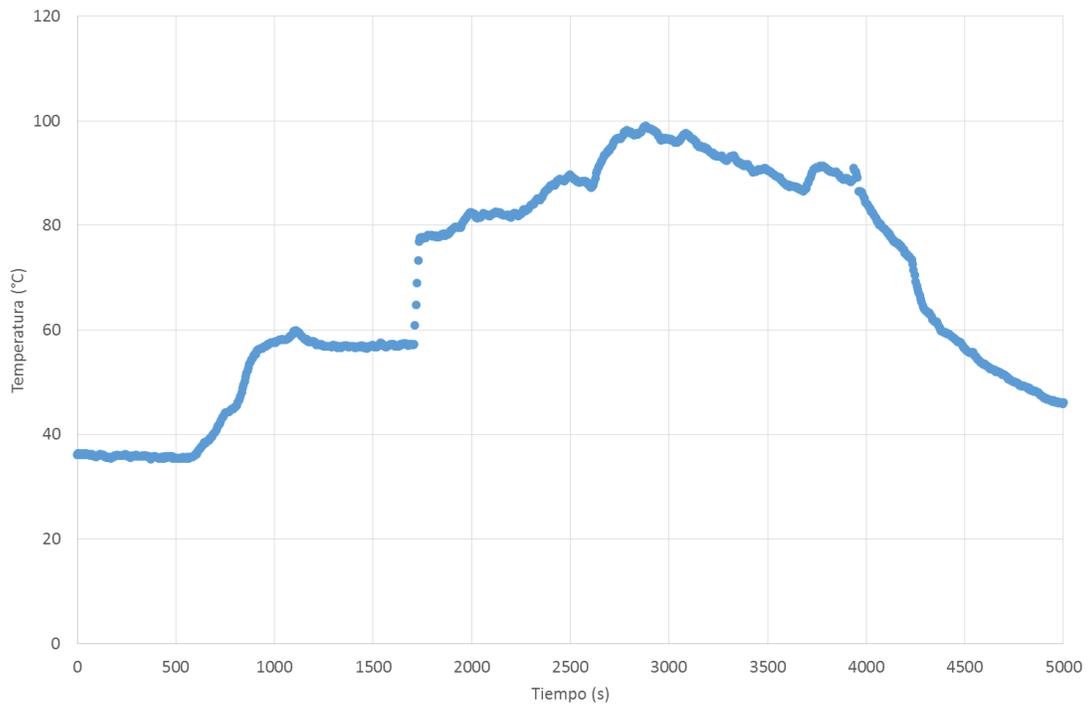


Figura 39. Temperatura del agua en la olla durante la etapa de alta potencia con arranque en frío para la prueba No. 3 en clima cálido.



## Programa Paisajes de Conservación

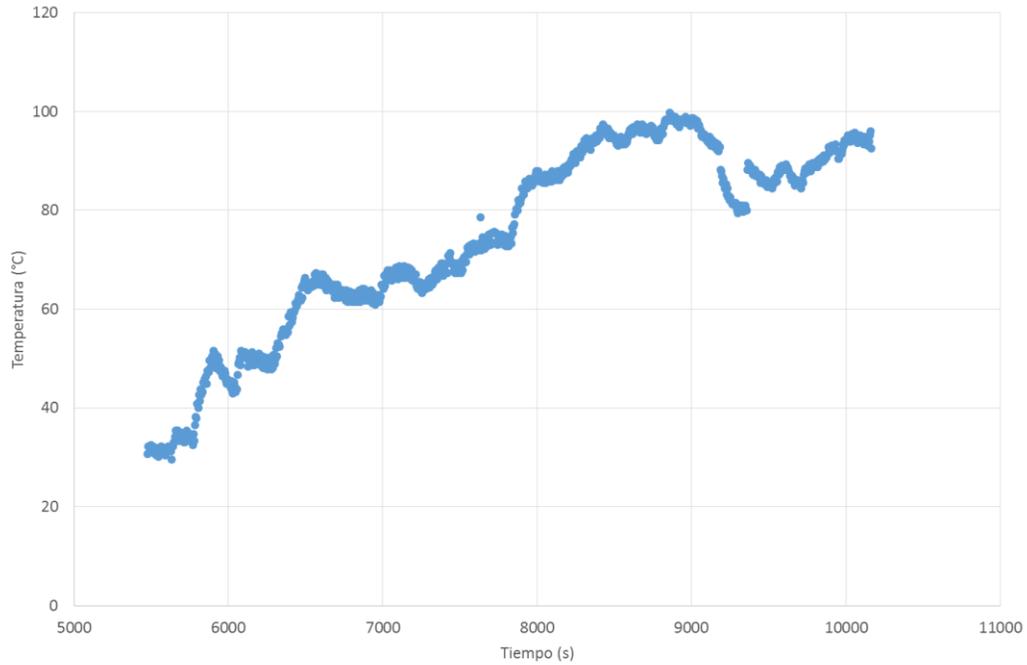


Figura 40. Temperatura del agua en la olla durante la etapa de alta potencia con arranque en caliente para la prueba No. 3 en clima cálido.

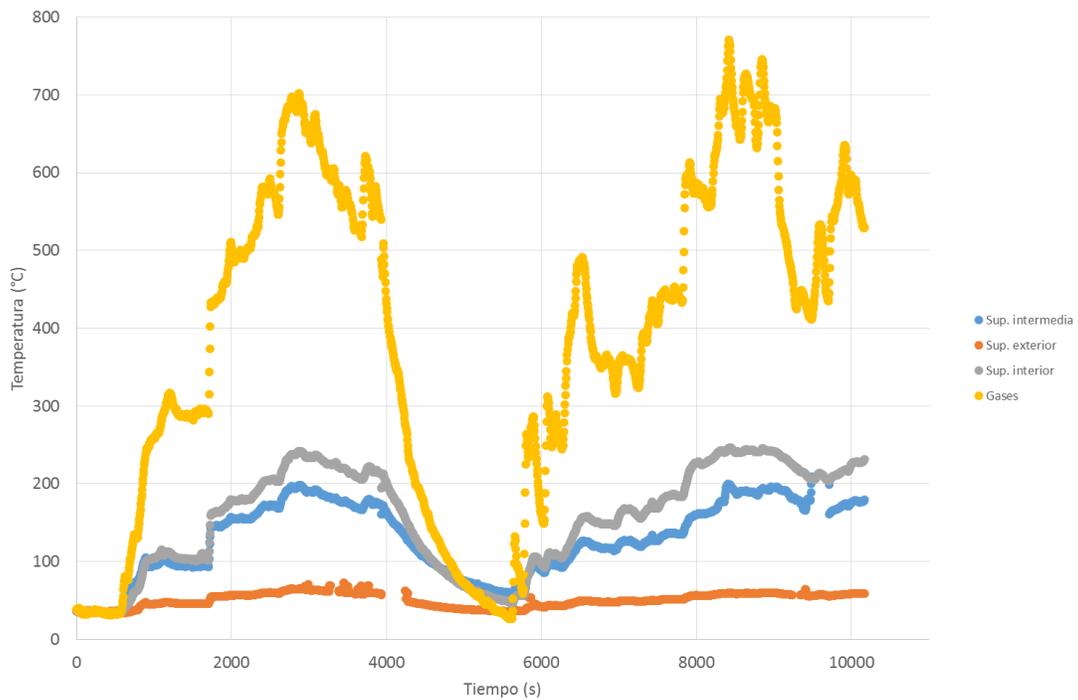


Figura 41. Evolución de las temperaturas de los gases de combustión y las superficies de la estufa para la prueba No. 3 en clima cálido.



## Programa Paisajes de Conservación

### 7.4.2. Estufa de un fogón y plancha con chimenea

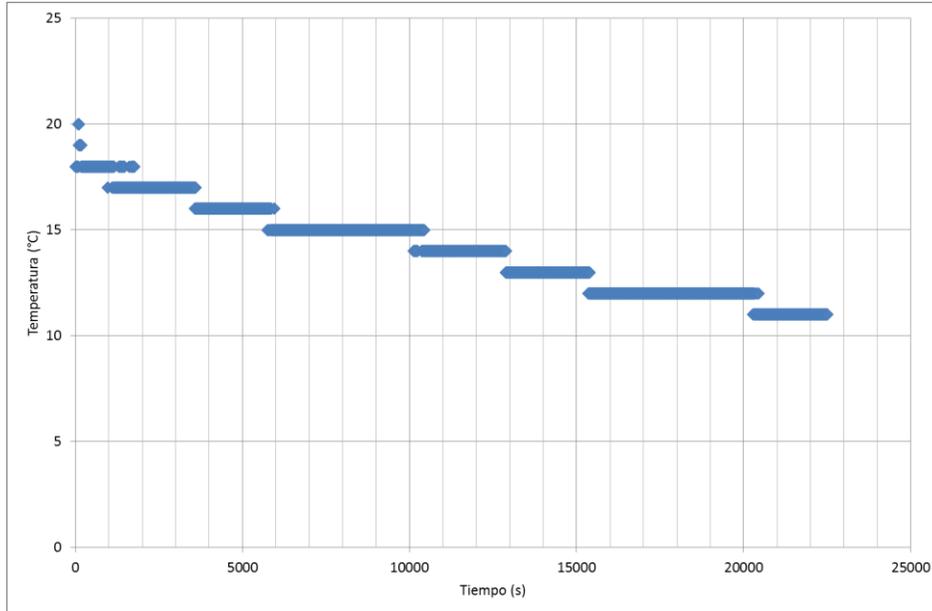


Figura 42. Temperatura ambiental durante la prueba No. 2 realizada en clima frío.

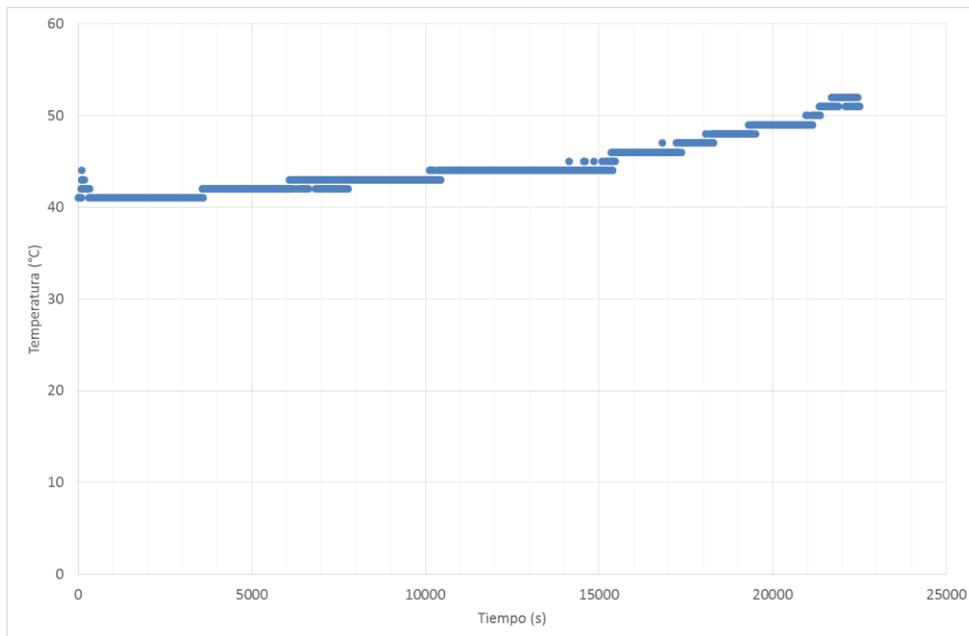


Figura 43. Humedad relativa ambiental durante la prueba No. 2 realizada en clima frío.



## Programa Paisajes de Conservación

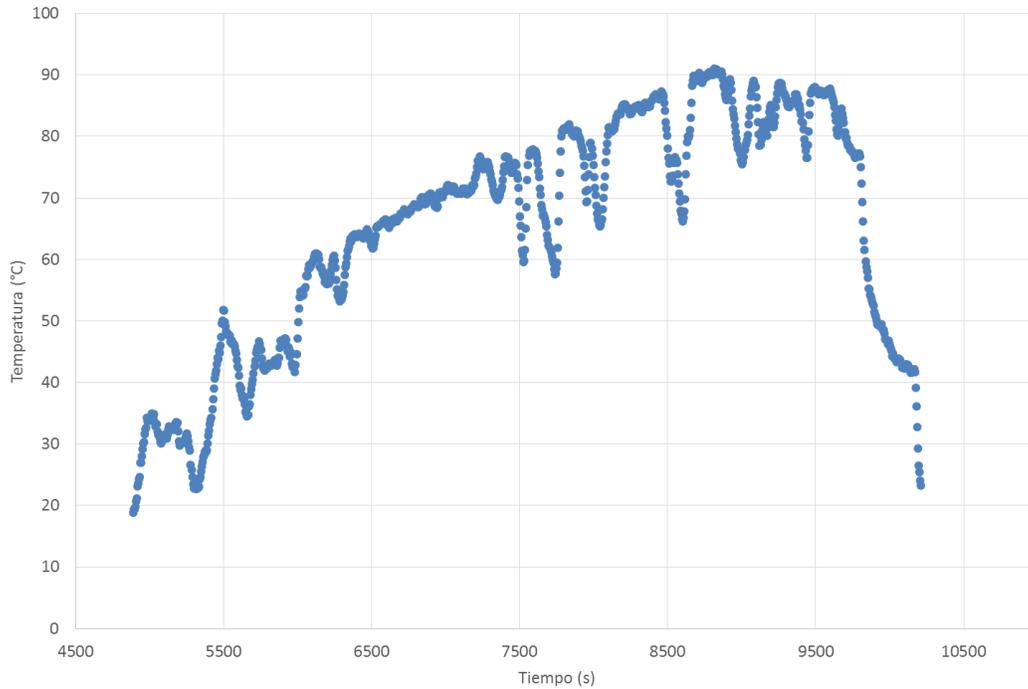


Figura 44. Temperatura del agua en la olla principal durante la etapa de alta potencia con arranque en frío para la prueba No. 2 en clima frío.

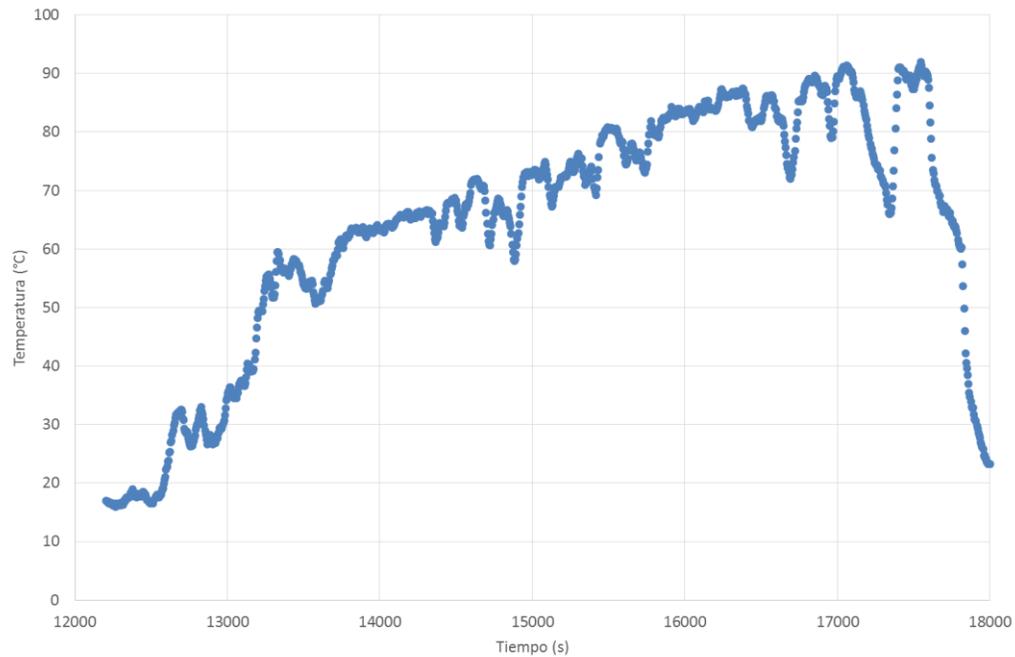


Figura 45. Temperatura del agua en la olla principal durante la etapa de alta potencia con arranque en caliente para la prueba No. 2 en clima frío.



## Programa Paisajes de Conservación

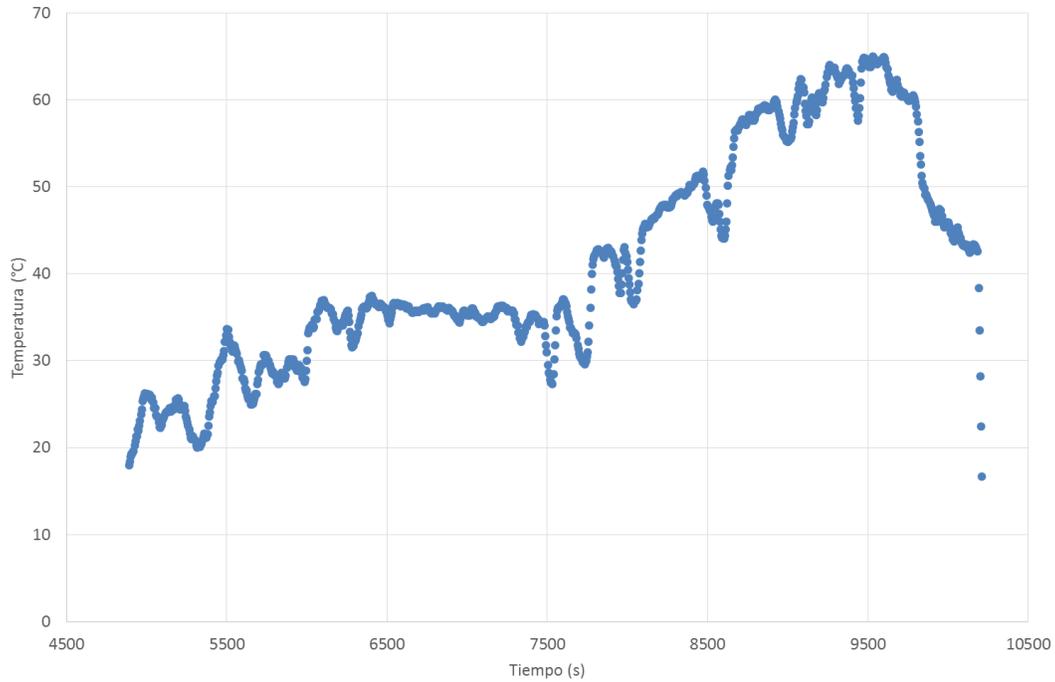


Figura 46. Temperatura del agua en la olla secundaria durante la etapa de alta potencia con arranque en frío para la prueba No. 2 en clima frío.

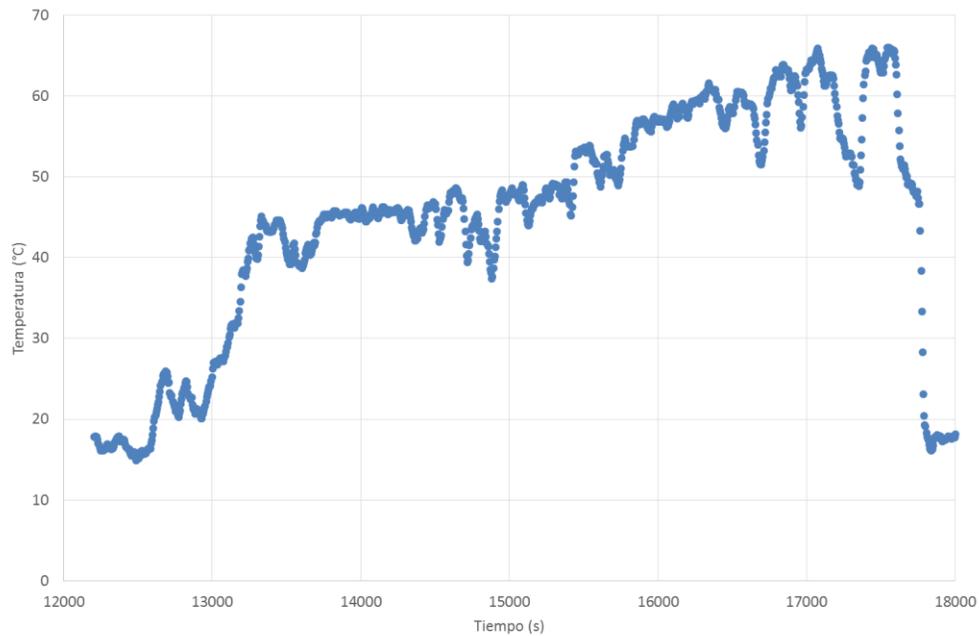


Figura 47. Temperatura del agua en la olla secundaria durante la etapa de alta potencia con arranque en caliente para la prueba No. 2 en clima frío.



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



## Programa Paisajes de Conservación



Figura 48. Evolución de las temperaturas de los gases de combustión y de las superficies de la estufa durante la prueba No. 2 en clima frío.

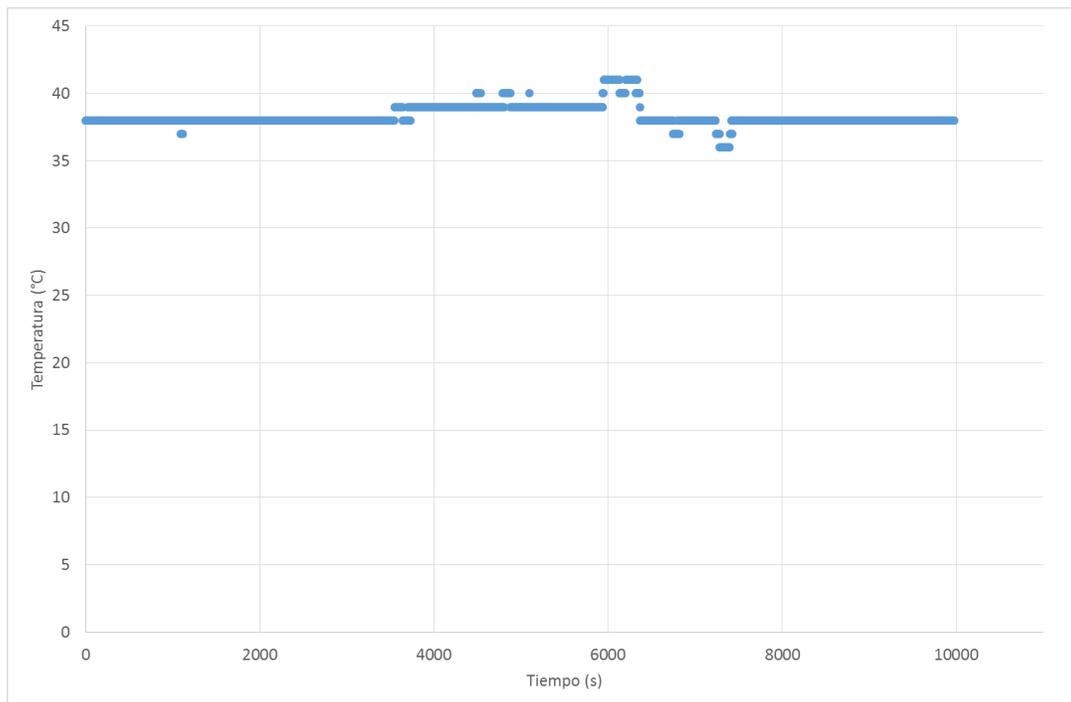


Figura 49. Temperatura ambiental durante la prueba No. 4 realizada en clima cálido.



## Programa Paisajes de Conservación

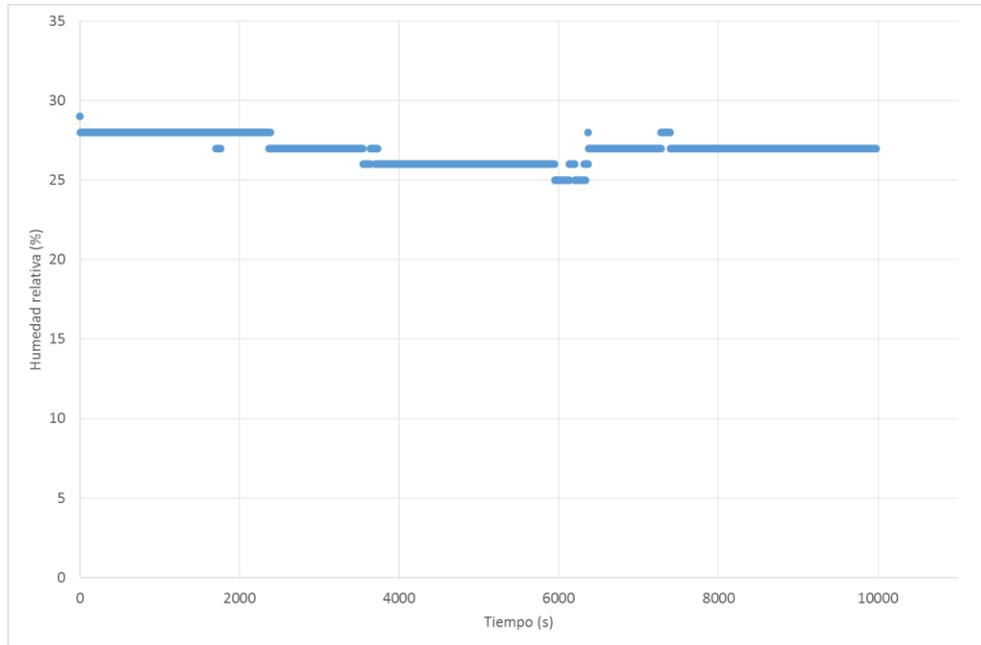


Figura 50. Humedad relativa ambiental durante la prueba No. 4 realizada en clima cálido.

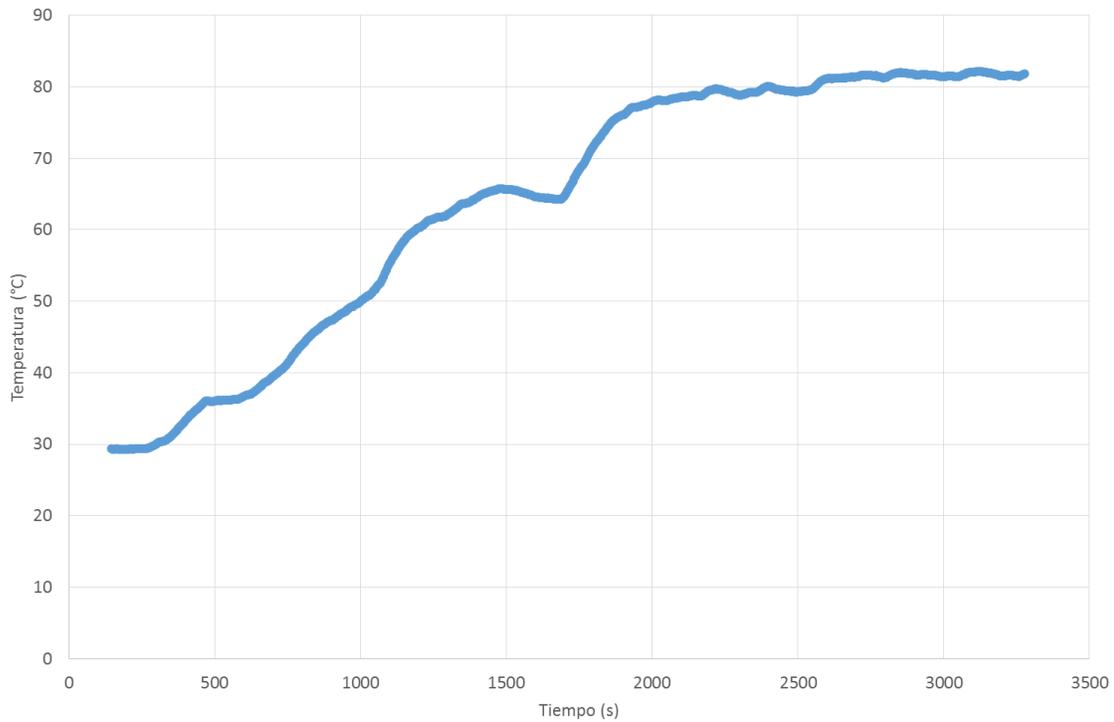


Figura 51. Temperatura del agua en la olla principal durante la etapa de alta potencia con arranque en frío para la prueba No. 4 en clima cálido.



## Programa Paisajes de Conservación

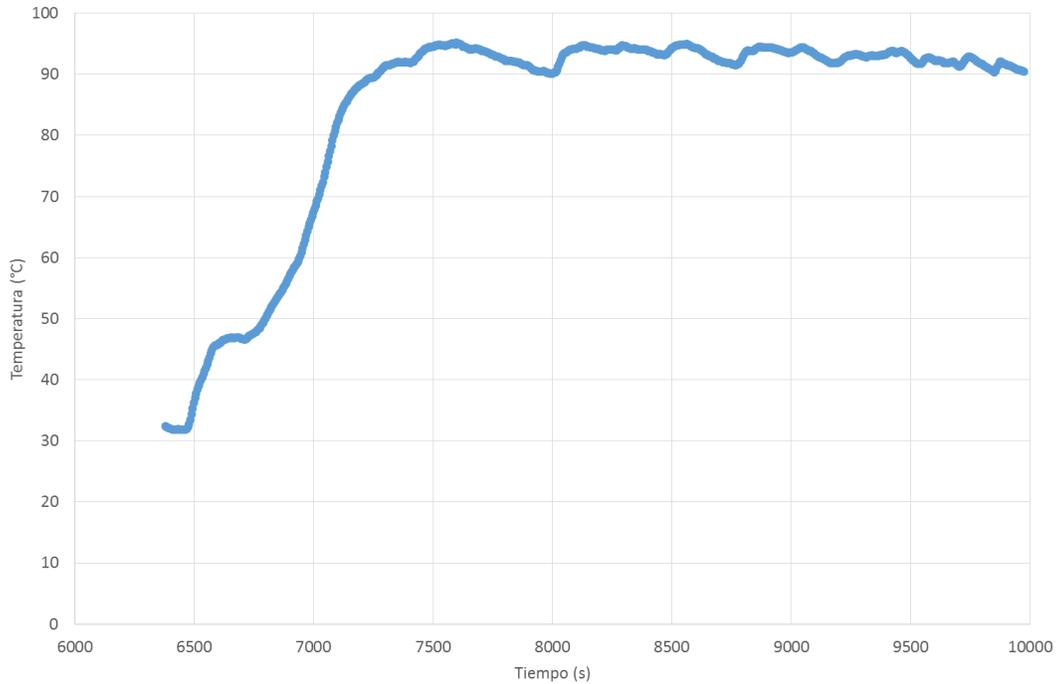


Figura 52. Temperatura del agua en la olla principal durante la etapa de alta potencia con arranque en caliente para la prueba No. 4 en clima cálido.

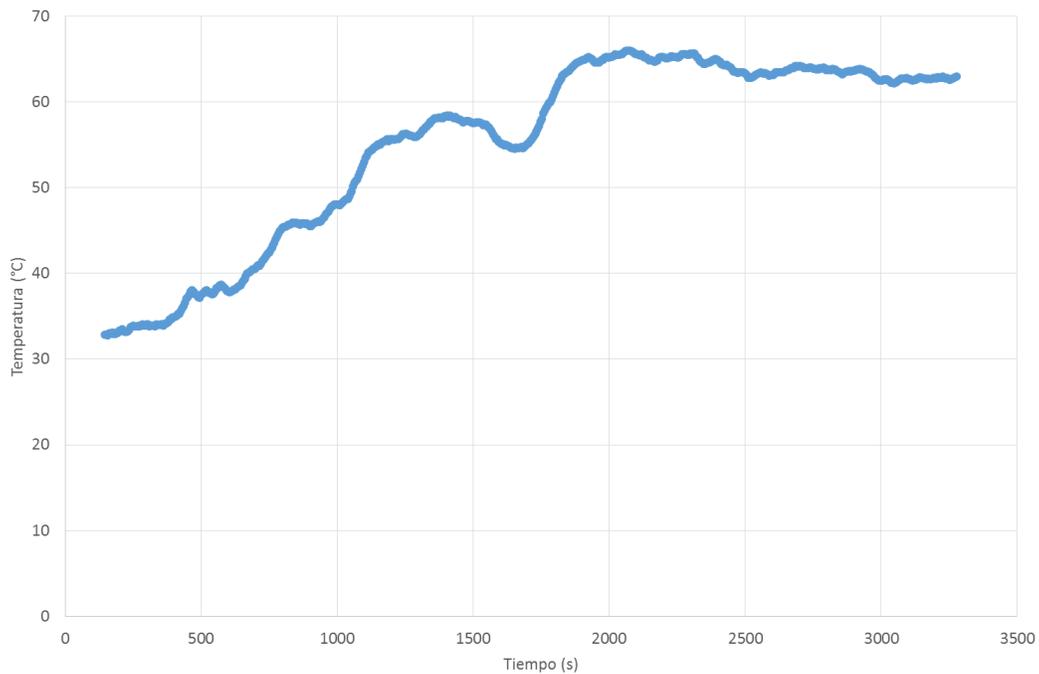


Figura 53. Temperatura del agua en la olla secundaria durante la etapa de alta potencia con arranque en frío para la prueba No. 4 en clima cálido.



## Programa Paisajes de Conservación

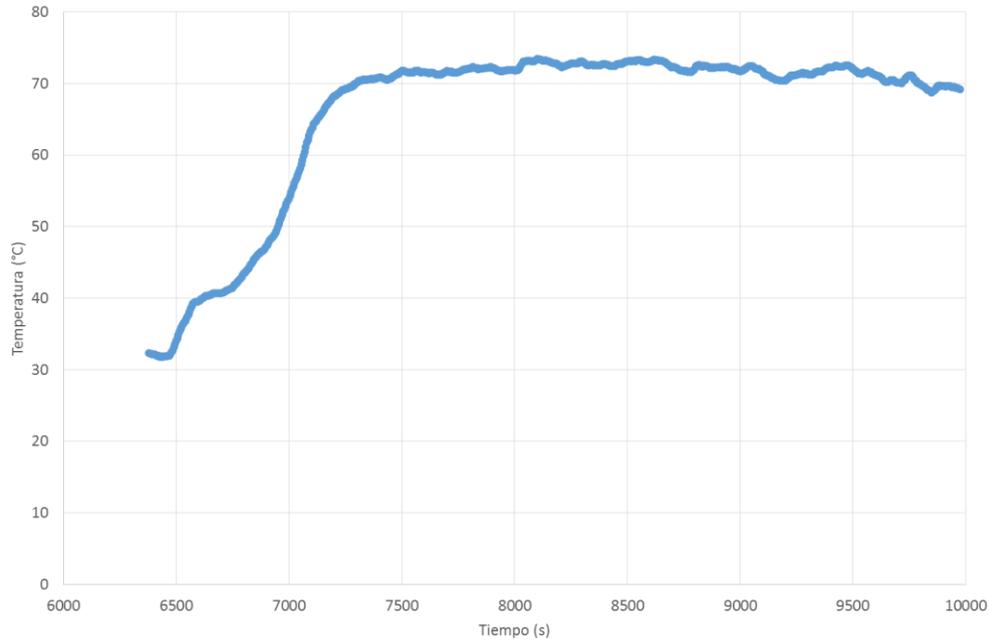


Figura 54. Temperatura del agua en la olla secundaria durante la etapa de alta potencia con arranque en caliente para la prueba No. 4 en clima cálido.

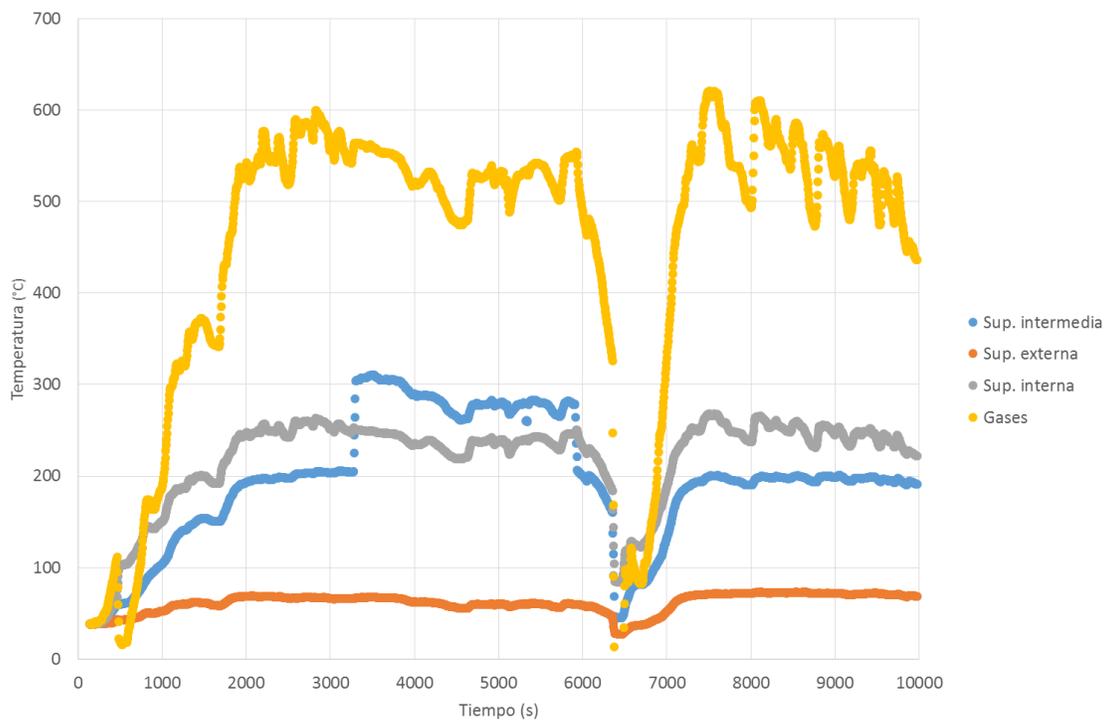


Figura 55. Evolución de las temperaturas de los gases de combustión y de las superficies de la estufa durante la prueba No. 4 en clima cálido.

## Programa Paisajes de Conservación

### 7.5. Modelo analítico detallado

#### 7.5.1. Flujo de los gases<sup>10</sup>

Supóngase que se quiere desarrollar un modelo analítico para determinar el flujo de gases que se produce por efecto de la reducción de su densidad cuando se calientan dentro del hogar al pasar por la chimenea. La Figura 56 ilustra la situación esquemáticamente.

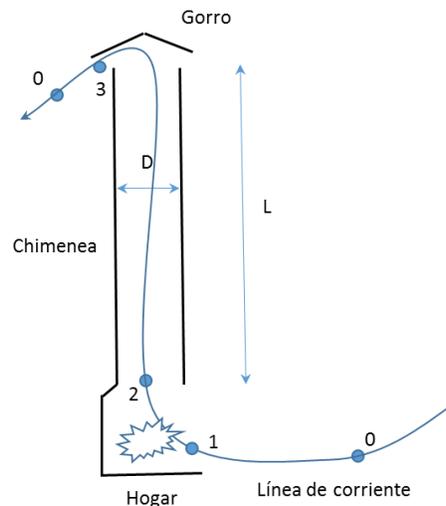


Figura 56. Esquema de la chimenea para desarrollar el modelo de flujo.

En el punto 0 el aire se encuentra a las condiciones atmosféricas normales. El aire externo es calentado en el hogar de la estufa entre los puntos 1 y 2. La presión en 1 debe ser subatmosférica para que el aire se mueva desde el punto 0 hacia el punto 1. El aire caliente llena la chimenea que se puede considerar aproximadamente isotérmica; su densidad es menor que la del aire atmosférico y, por lo tanto, sufre una fuerza de flotación  $F$  que lo hace ascender. Después de iniciada la combustión se establece un flujo estacionario o permanente en el cual la fuerza de flotación es contrarrestada por la fricción de las paredes contra el aire en movimiento.

La fuerza de flotación  $F$  que se ejerce sobre el volumen de aire contenido en la chimenea de diámetro  $D$  se calcula mediante:

$$F = (\rho_0 - \rho_2)L \frac{\pi D^2}{4} g$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $\rho$  la densidad en los puntos 0 y 2. Esta fuerza corresponde a una presión de ascenso (o energía por unidad de volumen) equivalente a:

<sup>10</sup> Este modelo fue adaptado de la solución a una tarea del curso Mecánica de Fluidos del profesor Jaime Loboguerrero. Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Los Andes en Bogotá, Colombia.



## Programa Paisajes de Conservación

$$p_F = \frac{F}{A_c} = (\rho_0 - \rho_2)Lg.$$

Por otro lado, aplicando el principio de la conservación de la energía sobre una línea de corriente del flujo en los tramos 0-1, 1-2 y 2-3 respectivamente, se obtienen las siguientes relaciones:

$$p_0 + 0 = p_1 + \frac{1}{2}\rho_1 V_1^2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho_0 V_1^2 \quad (a)$$

$$p_1 \approx p_2$$

$$p_2 + \frac{1}{2}\rho_2 V_2^2 + p_F = p_3 + \frac{1}{2}\rho_3 V_3^2 \left(1 + f \frac{L}{D} + \Sigma k\right) \quad (b),$$

Siendo  $f$  el factor de fricción del ducto que conforma la chimenea y  $\Sigma k$  la sumatoria de todos los coeficientes de pérdidas incluidos en este trayecto. Por otro lado se sabe que  $p_0 = p_3 \approx p_2$ , que  $V_2 = V_3 \approx V_1$ . Combinando las ecuaciones (a) y (b) se llega a:

$$\frac{1}{2}\rho_0 V_1^2 = (\rho_0 - \rho_2)Lg - \frac{1}{2}\rho_3 V_1^2 \left(f \frac{L}{D} + \Sigma k\right).$$

El término de la izquierda es la energía cinética, el primer término de la derecha es la energía potencial y el segundo término de la derecha son las pérdidas de energía. Esta ecuación se puede reescribir como:

$$1 = \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_0}\right) \frac{2Lg}{V_1^2} - \frac{\rho_2}{\rho_0} \left(f \frac{L}{D} + \Sigma k\right)$$

Por otra parte, la ecuación del gas ideal permite establecer una relación para el cociente de densidades en términos del cociente de temperaturas absolutas  $\theta$ :

$$\frac{\rho_2}{\rho_0} = \frac{\frac{p_2}{RT_2}}{\frac{p_0}{RT_0}} = \frac{T_0}{T_2} = \theta,$$

para llegar finalmente a una expresión donde se puede despejar la velocidad  $V$ :

$$1 = (1 - \theta) \frac{2Lg}{V^2} - \theta \left(f \frac{L}{D} + \Sigma k\right).$$

El factor de fricción  $f$  es función del número de Reynolds y de la rugosidad relativa de la superficie interna del ducto.

### 7.5.2. Transferencia de calor<sup>11</sup>

<sup>11</sup> Los principios de esta sección se encuentran en cualquier texto universitario de transferencia de calor. Aquí se usó el libro Transferencia de Calor, Yunus Cengel, segunda edición, McGraw-Hill Interamericana, 2004.



## Programa Paisajes de Conservación

La transferencia de calor a través del cuerpo de las estufas estudiadas en este proyecto se puede asimilar, como primera aproximación, a un sistema unidimensional estacionario. La estufa está constituida de varias capas de materiales, uno encerrando al precedente de la siguiente manera:

- Conducto de los gases de combustión
- Aislamiento de piedra volcánica
- Encerramiento de aire
- Medio ambiente

### 7.5.2.1. Conducto de los gases de combustión

La combustión de la madera con aire atmosférico genera gases calientes transfiriendo energía en forma de calor hacia las paredes del ducto vertical que los contiene. El mecanismo es una convección forzada que puede modelarse mediante la ecuación de enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q}_{conv,tubo} = h_{tub} A_s \Delta T_{LM}$$

donde  $\dot{Q}_{conv,tubo}$  es la rata de transferencia de calor por convección,  $h_{tub}$  es el coeficiente de convección entre los gases y el tubo,  $A_s$  es el área la pared del tubo que está en contacto con los gases y  $\Delta T_{LM}$  es la diferencia de temperatura media logarítmica entre los gases y la superficie del tubo. El coeficiente de convección se determina a partir de una correlación empírica para el número de Nusselt  $Nu$ , la forma adimensional del coeficiente de convección:

$$Nu = \frac{h_{tub} d}{k_f}$$

siendo  $d$  el diámetro interno del tubo y  $k_f$  la conductividad térmica de los gases calculada para el valor medio de temperatura de los gases y la temperatura de la superficie interna del ducto. Con el coeficiente de convección de determina la resistencia térmica correspondiente  $R_{conv,tubo}$  mediante la relación:

$$R_{conv,tubo} = \frac{1}{h_{tub} A_s}$$

### 7.5.2.2. Capa de aislante térmico

La capa de aislante térmico conduce el calor mediante el mecanismo de la conducción gobernado por la ley de Fourier:

$$\dot{Q}_{cond,ais} = k_{ais} A_c \frac{\Delta T}{\Delta L} = k_{ais} S_{ais} \Delta T$$

donde  $k_{ais}$  es la conductividad térmica efectiva del material aislante<sup>12</sup>,  $A_c$  es el área transversal al flujo de calor,  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura a través del medio aislante y  $\Delta L$  su espesor. Alternativamente se

<sup>12</sup> La conductividad térmica efectiva del aislante se determina mediante la ponderación volumétrica de la conductividad térmica intrínseca de la piedra volcánica y del aire que ocupa los espacios que quedan entre las partículas de la piedra volcánica granulada.



## Programa Paisajes de Conservación

puede usar el factor de forma  $S_{ais}$  que se encuentra tabulado para una pared curva en ciertas fuentes bibliográficas especializadas, como es el caso aquí. La resistencia térmica correspondiente es:

$$R_{cond,ais} = \frac{\Delta L}{k_{ais} A_c}$$

### 7.5.2.3. Espacio de aire

A través del espacio de aire confinado entre la superficie que contiene el material aislante y la superficie externa de la estufa se transfiere calor mediante dos mecanismos: convección natural y radiación. La convección natural a través de este encerramiento se modela mediante la ley de enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q}_{conv,enc} = h_{enc} A_s \Delta T,$$

mientras que la radiación se modela mediante la ley de Stefan-Boltzmann:

$$\dot{Q}_{rad,enc} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \epsilon_1}{A_1 \epsilon_1} + \frac{1}{A_1 F_{1-2}} + \frac{1 - \epsilon_2}{A_2 \epsilon_2}},$$

donde  $\epsilon$  es la emisividad de cada superficie,  $\sigma$  es la constante universal de Stefan-Boltzmann,  $F_{1-2}$  es el factor de vista desde la superficie 1 hacia la 2, y  $A$  es el área de cada superficie.

Las resistencias térmicas correspondientes son:

$$R_{conv,enc} = \frac{1}{h_{enc} A_s}$$

$$R_{rad,enc} = \frac{\frac{1 - \epsilon_1}{A_1 \epsilon_1} + \frac{1}{A_1 F_{1-2}} + \frac{1 - \epsilon_2}{A_2 \epsilon_2}}{\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}.$$

En esta última expresión las temperaturas deben estar en escala absoluta.

### 7.5.2.4. Medio ambiente

La superficie externa de la estufa entrega calor al medio ambiente mediante dos mecanismos: convección natural y radiación. La convección natural sigue la ley de enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q}_{conv,amb} = h_{amb} A_s (T_s - T_\infty)$$

Por otro lado, la radiación se modela mediante la forma apropiada de la ley de Stefan-Boltzmann:

$$Q_{rad,amb} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_\infty^4),$$

donde  $T_\infty$  es la temperatura ambiental, y  $T_s$ ,  $A_s$  y  $\epsilon$  son la temperatura, el área y la emisividad de la superficie externa respectivamente.

Las resistencias térmicas correspondientes son:



## Programa Paisajes de Conservación

$$R_{conv,ext} = \frac{1}{h_{amb} A_s}$$

$$R_{rad,ext} = \frac{1}{\epsilon \sigma A_s (T_s^2 + T_\infty^2)(T_s + T_\infty)}$$

En esta última expresión las temperaturas deben estar en escala absoluta.

### 7.5.2.5. Resistencia total del sistema y flujo de calor

La resistencia térmica global del sistema es una composición de resistencias en serie y en paralelo en el caso que se superpongan los mecanismos de convección y radiación de tal forma que se llega a:

$$R_{tot} = R_{conv,tubo} + R_{cond,ais} + \frac{1}{\frac{1}{R_{conv,enc}} + \frac{1}{R_{rad,enc}}} + \frac{1}{\frac{1}{R_{conv,ext}} + \frac{1}{R_{rad,ext}}}$$

Finalmente, el calor transferido en estado estacionario desde los gases de combustión hasta el medio ambiente, a través de la estructura de la estufa, se puede determinar mediante:

$$\dot{Q} = \frac{T_{gas} - T_\infty}{R_{tot}}$$



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



## Programa Paisajes de Conservación

### 8. Glosario de términos

A continuación se presente una descripción de algunos términos técnicos usados en el documento.

**Conducción:** mecanismo de transferencia de calor que consiste en el paso de la energía a través de un medio estático. La velocidad de esta transferencia depende de la diferencia de temperatura a través del medio, del espesor del medio, del área transversal, y de la conductividad térmica, una propiedad del medio. Este mecanismo obedece la denominada *ley de Fourier*.

**Convección:** mecanismo de transferencia de calor que consiste en el paso de la energía desde un fluido, líquido o gaseoso, hacia una superficie sólida. La velocidad de esta transferencia depende de la diferencia de temperatura entre el fluido y la superficie, del área de contacto con el fluido, y del patrón de movimiento del fluido que se caracteriza mediante un coeficiente de convección. Este mecanismo obedece la denominada *ley de enfriamiento de Newton*. Cuando el fluido se mueve por el principio de Arquímedes dado que hay cambio de la densidad como resultado de su interacción con la superficie sólida, se precisa que se trata de una *convección natural o libre*. Si el fluido se mueve debido a otros mecanismos como bombas, ventiladores, o el viento, se trata de una *convección forzada*. La convección forzada es normalmente más intensa que la convección natural.

**Eficiencia térmica:** es una medida del desempeño de la estufa que consiste en el cociente entre la energía efectivamente aportada al agua contenida en las ollas y la energía contenida en la madera usada como combustible en un periodo determinado. La energía aportada al agua en las ollas se determina mediante el incremento de temperatura y la cantidad de agua evaporada. La energía contenida en la olla se mide mediante su poder calorífico inferior.

**Inercia térmica:** capacidad de una pieza de almacenar calor en forma de energía contenida en su estructura que se evidencia por el aumento de temperatura. La inercia térmica del material es el producto de la densidad y el calor específico. Sus unidades en el *Sistema Internacional de Unidades* son  $J/m^3 \cdot ^\circ C$ . La piezas de alta inercia térmica toman tiempo en ser calentadas y de igual forma para ser enfriadas. Por supuesto, entre más voluminosas sean las piezas, mayor inercia térmica tendrán.

**Material particulado:** pequeñas partículas sólidas que se forman durante la combustión de un combustible debido a defectos en el proceso de combustión. En términos generales estas partículas son indeseadas pues cuando son respiradas permanentemente por las personas y tienen tamaños muy pequeños (inferiores a 10 micrómetros) pueden producir enfermedades respiratorias graves.

**Microcontrolador:** pequeño dispositivo electrónico, análogo a un computador, que puede recibir señales electrónicas de entrada, procesarlas en su CPU a través de programas previamente instalados, y enviar señales electrónicas de salida. Tiene memoria incorporada y está diseñado para ser embebido en dispositivos y controlarlos (vg. electrodomésticos, robots, etc.). Normalmente se alimenta de una pequeña fuente de energía como una batería y puede comunicarse con un computador cuando se requiera programarlo o extraer la información de su memoria mediante protocolos estandarizados.



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



## Programa Paisajes de Conservación

**Poder calorífico inferior:** cantidad de energía liberada por cada unidad de masa de un combustible cuando en los gases de combustión el vapor de agua no se condensa. Cuando en la medición del poder calorífico se logra la condensación del vapor de agua de los gases de combustión, entonces se habla de poder calorífico superior pues su valor es mayor al poder calorífico inferior ya que la condensación del agua entrega una cantidad adicional de energía. En el *SI* el poder calorífico se mide en kJ/kg.

**Poder calorífico neto:** es el resultado de restar la energía necesaria para evaporar la humedad contenida en el combustible al poder calorífico inferior del combustible. Esta humedad no es producto de la combustión sino que está contenida en el combustible originalmente dada su naturaleza higroscópica, en este caso la madera húmeda.

**Potencia térmica:** cantidad de energía por unidad de tiempo que es entregada en un proceso de generación (como la combustión) o de transferencia (como el calentamiento del agua). En el *Sistema Internacional de Unidades (SI)* la potencia térmica se especifica en vatios (W).

**Prueba de alta potencia:** ensayo de la estufa donde se procura quemar la mayor cantidad de madera en el menor tiempo con el propósito de hacer hervir el agua de las ollas lo más rápidamente posible. Cuando la prueba empieza con la estufa a la temperatura ambiente se denomina *prueba de alta potencia con arranque en frío*. Si la prueba se realiza unos minutos después de haber terminado una prueba de alta potencia con arranque en frío, se denomina *prueba de alta potencia con arranque en caliente*.

**Prueba de baja potencia:** ensayo que consiste en mantener el agua de la olla cerca al punto de ebullición equivalente a una cocción lenta. La temperatura no debe estar a más de 6°C por debajo de la temperatura de ebullición del agua correspondiente al lugar de las pruebas. Durante estas pruebas la alimentación de madera es lenta comparada con el caso de la prueba de alta potencia.

**Radiación:** mecanismo de transferencia de calor entre dos superficies que se realiza a través de la radiación electromagnética térmica que emite cualquier superficie a una temperatura superior al cero absoluto (0 K) en el espectro que va desde el infrarrojo hasta el ultravioleta pasando por la banda visible. Depende del tamaño de las superficies y su disposición geométrica relativa, de sus temperaturas y de la emisividad. Este mecanismo obedece la denominada *ley de Stefan-Boltzmann*.

**Prueba de ebullición de agua (WBT):** es una prueba estandarizada por acuerdo entre varios grupos de interés internacionales afiliados a la *Global Alliance of Clean Cookstoves*. Permite medir bajo condiciones de laboratorio la eficiencia térmica de las estufas así como la cantidad de emisiones producidas mientras se cocina. En inglés la prueba se denomina *Water Boiling Test*, de donde viene su sigla.

**Temperatura de ebullición:** temperatura a la cual el agua empieza a evaporarse rápidamente pasado de su condición líquida a vapor. Esta temperatura depende de la presión barométrica que, a su vez, es función de la altura sobre el nivel del mar del sitio de las pruebas. Al nivel del mar la temperatura de ebullición del agua pura es de 100°C. Este valor desciende aproximadamente 1°C por cada 300 metros de altura. La temperatura de ebullición del agua cambia si cuando tiene sustancias disueltas (vg azúcar o sal).



**USAID**  
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS  
UNIDOS DE AMÉRICA



---

## Programa Paisajes de Conservación

**Termopar:** dispositivo de bajo costo que sirve para medir la temperatura. Está compuesto de dos alambres hechos de aleaciones diferentes que están unidos en un extremo, el sensor. Cuando este extremo se somete a una temperatura, entre los alambres se genera un voltaje muy pequeño, del orden de microvoltios, que es directamente proporcional y lineal con la temperatura. Dada la debilidad de la señal, es necesario usar un amplificador operacional para multiplicar la señal cerca de mil veces de tal forma que pueda ser adquirida electrónicamente para luego ser procesada en un computador. Al termopar se le conoce coloquialmente como *termocupla*, traducción incorrecta de la palabra inglesa *thermocouple*. El termopar tipo K (cromo-niquel y aluminio-niquel) es uno de los más populares y puede medir temperaturas entre -200°C y 1350°C de acuerdo con su recubrimiento (polimérico, metálico, cerámico) y su configuración geométrica.