



Construcción de un Horno Artesanal para la Cocción de Biofiltros de Arcilla

Yesenia Sandra Cahuana Condori

Proyecto de Graduación
para obtener el título de
Ingeniera Agrónoma
con el grado académico de
Licenciatura en Ciencias Agrícolas

Guácimo, Limón, Costa Rica

2019

La Universidad EARTH certifica que el Proyecto de Graduación titulado

Construcción de un Horno Artesanal para la Cocción de Biofiltros de Arcilla

Presentado por

Yesenia Sandra Cahuana Condori

**Reúne las condiciones para obtener el título de Ingeniera Agrónoma
con el grado académico de Licenciatura**

Asesora

Mildred Linkimer Abarca, Ph.D.

Asesora

Alex Gilman, Ph.D.

Diciembre 2019

Dedicatoria

El presente proyecto de graduación se lo dedico a Dios y a mi familia. Cada paso que di pensaba en una persona muy especial para mí, quien es mi inspiración, quien me motiva hacer las cosas bien, quien sigue mis pasos, esa personita especial es mi pequeño hermano, Aryan Omar, por ello le dedico todo el trabajo realizado durante mi proyecto.

Agradecimiento

Para que este proyecto se pueda realizar, se requirió el apoyo de diferentes personas a las cuales les estoy muy agradecida, porque cada uno apoyó de una manera incondicional e hicieron realidad mi PG. En primer lugar, quiero agradecer a mis asesoras Alex Gilman y Mildred Linkimer, quienes me brindaron su ayuda técnica durante el desarrollo del proyecto. A Nelson Jiménez, quien me apoyo en la parte práctica, sin duda alguna es un excelente compañero de trabajo. El proyecto contó con la colaboración del área sostenibilidad, por ello quiero agradecer a la profesora Irene Alvarado, Ericka Barrantes y a todos los que conforman dicha área, porque confiaron en mi idea y me brindaron los recursos necesarios para llevar a cabo mi proyecto. También quiero agradecer a todos los que trabajan en IGA empezando con el profesor Warner Rodríguez y los que colaboran en el área como José, Guillermo, Jean Carlos y Checo. Mi siguiente agradecimiento es para Olga, la secretaria de mantenimiento, quien me ayudo consiguiendo los materiales que me hacían falta, está persona me brindó su apoyo sin condiciones. Las personas que me colaboraron de manera indirecta, pero su ayuda fue importante, son: Amanda Wendt, Ashly Salazar, Marianela Castro, Roxana Araya, Víctor Rodríguez, Arnoldo Ávila y Carlos Sandí. También quisiera agradecer a todos mis amigos y compañeros que llegaron ayudar a construir el horno y por darme su apoyo moral e incondicional. Gracias a la ayuda de todos se logró concluir exitosamente el proyecto de graduación. Por último, quisiera dar un agradecimiento especial a mis donantes por darme la oportunidad de estudiar en EARTH.

Resumen

Países como Perú y Costa Rica fabrican biofiltros para la filtración de agua, los cuales tienen alto contenido de arcilla. La arcilla se somete a cocción, siendo la temperatura ideal de 950 °C. Para que este proceso se lleve a cabo es importante el uso de un horno artesanal. Para que los biofiltros se horneen adecuadamente, el horno debe almacenar el calor internamente y de manera homogénea hasta alcanzar los 950 °C. Para que se pueda cumplir este objetivo es necesario que el horno este construido con materiales aislantes, pero también resistentes a altas temperaturas. Este trabajo de investigación desarrolló un horno artesanal para la cocción de biofiltros de arcilla. Mediante el diseño y construcción del horno se puede evaluar la eficiencia y el costo del horno. Se usó la madera de *Hieronyma alchorneoides*, como combustible. Los diferentes resultados nos permiten concluir que se puede diseñar y construir un horno de doble cámara a un costo de USD 3908.21. Al concluir con las pruebas de eficiencia se demostró que el horno almacena la temperatura suficiente para la cocción de los biofiltros. Además, los diferentes materiales están disponibles en los países de Costa Rica y Perú y tiene un costo accesible en las comunidades rurales con el apoyo de ONG's o instituciones que les interese apoyar con la fabricación de biofiltros y obtener un agua de mejor calidad.

Palabras clave: Arcilla, artesanal, biofiltros, construcción, horno

Abstract

Countries such as Peru and Costa Rica produce biofilters for water filtration, made with a high content of clay. The clay-based biofilters require firing, ideally at a consistent temperature, and the stove must maintain the heat internally, in a homogeneous way up, in order to reach 950 °C. In order to reach 950 °C it is necessary to construct the stove using insulating materials that are also resistant to high temperatures. This research designed and constructed a handmade stove for the cooking of clay biofilters. After establishing a design and successful construction of the stove, it was possible to evaluate the efficiency of the stove and the cost of construction. Fuel wood of *Hieronyma alchorneoides* was utilized for efficiency testing. The results demonstrate that it is possible to design and to construct a stove of double cabin at a cost of USD 3908.21. The efficiency tests demonstrated that the stove could reach and maintain the high temperature required for the cooking of the clay biofilters. In addition, the different materials are available in both Costa Rica and Peru, at an accessible cost for rural communities or individuals with the support of NGO's or government institutions that may be able to support the production of clay biofilters in order to obtain improved water quality.

Key words: Biofilters, clay, construction, handmade, oven

Lista de Contenido

	Página
Dedicatoria	v
Agradecimiento	v
Resumen	vii
Abstract	viii
1 Introducción	1
2 Objetivos	4
2.1 Objetivos Específicos	4
3 Metodología	5
3.1 Localización del Proyecto en la Universidad EARTH.....	5
3.2 Etapas del Proyecto	5
3.2.1 Diseño del horno.....	5
3.2.2 Construcción del horno	6
3.2.3 Evaluación de la eficiencia del horno	7
3.2.4 Determinación de la humedad por prueba gravimétrica	8
3.2.5 Análisis estadístico para la evaluación	9
3.2.6 Costo de la construcción del horno, materiales para la construcción y mano de obra estimada	9
4 Resultados	10
4.1 Resultado del Diseño del Horno	10
4.2 Resultado de la Construcción del Horno.....	12
4.2.1 Base del horno.....	12
4.2.2 Cenicero y el hogar.....	13
4.2.3 Bóveda	13
4.2.4 Chimenea	14
4.2.5 Instalación de la puerta, las placas refractarias y la parrilla	15
4.2.6 Recubrimiento del horno	16
4.3 Eficiencia del Horno.....	17
4.3.1 Temperatura interior del horno.....	17
4.3.2 Temperatura exterior del horno.....	17
4.3.3 Cantidad de leña usada en el proceso	18
4.3.4 Desarrollo de la humedad de la leña durante el proceso.....	19
4.3.5 Costos de la construcción del horno, materiales para la construcción y mano de obra estimada	20
5 Discusión	22
6 Conclusiones	24
7 Referencias bibliográficas	25

8	Anexos	28
8.1	Anexo 1 Resultados de la Eficiencia del Horno.....	28
8.2	Anexo 2 Desglose de los costos de las partes del horno	30

1 Introducción

Muchas zonas rurales y urbanas del mundo consumen un agua con baja calidad, la cual no cumple con los estándares de agua potable. El consumo de estas aguas inapropiadas para el ser humano, puede causar enfermedades e incluso la muerte, por ejemplo, la muerte de niños menores de cinco años a causa de las enfermedades diarreicas agudas (UNICEF, 2004). Actualmente existen métodos sencillos para obtener un agua salubre. Un método es filtrar el agua mediante los biofiltros de arcilla. El biofiltro cumple la función de remover los contaminantes del agua y brindar un agua óptima para el consumo humano (Solano, 2013).

El biofiltro, es una cerámica, compuesto por arcillas, huesos, fibra vegetal, óxido de hierro y carbón activado. Todos los materiales se mezclan para homogenizar y que la pasta contenga las mismas características, luego se moldea en forma de vaso. Se deja secar por unos días en condiciones ambientales, finalmente se introducen las piezas al horno para la cocción. Para la cocción de la pieza se tiene que tomar en cuenta el intervalo de cocción, la temperatura máxima (950 °C), el tiempo de permanencia en los rangos de temperatura, uniformidad de calor en el horno (Solano, 2013). Los biofiltros se obtienen del proceso de cocción de la arcilla. La cocción es el proceso fisicoquímico en el cual sucede el transporte de los átomos, lo cual permite que las partículas de arcilla se adhieran una de la otra (Guerrero *et al*, 2017).

Existen diferentes tipos de hornos que se encargan de la cocción. Se clasifican según el tipo de proceso, la forma de calor y la llama del horno. Industrialmente se usa una mufla eléctrica de funcionamiento intermitente. El horno de doble cámara es amigable con el ambiente, fácil de manejar y la fuente de energía es la electricidad o el gas. A pesar de que el horno industrial, es ideal para la cocción de la cerámica, las comunidades rurales tienen dificultades para acceder a este tipo de horno, porque tienen un costo elevado, pero como alternativa si pueden construir su propio horno de leña (Huerta, 2007). El horno de leña se ha construido desde las antiguas culturas donde se usó para la cocción de la arcilla. Históricamente la producción de cerámica mediante el horno de leña, genera ingresos económicos a nivel doméstico e industrial, debido a que los productos generados por la cocción de la arcilla se usan como decoración o para un uso doméstico. El diseño del horno ha pasado de generación en generación de manera etnográfica y se han ido agregando materiales para mejorar la eficiencia del mismo (Ots *et al.*, 2013).

Existen diferentes diseños de hornos de leña, los cuales cumplen el mismo objetivo, retener la energía producida por la combustión de la biomasa. Los hornos artesanales para carbón, son rústicos y sencillos de elaborar. Dicho horno consiste en enterrar los biofiltros hechos de arcilla, cubrir con arena, trozos de leña joven, luego se agrega madera gruesa, finalmente se agrega arena húmeda con hierba seca. Para que la combustión sea rápida se agregan 4 litros de gasolina y con un serillo se prende el fogón (Coronell y Araujo, 2015). También se usa viruta de la madera y papel, estos materiales son usados como materia de ignición, con el objetivo de encender el fuego de la madera (González, 2018). Este horno es menos eficiente porque sólo se puede aprovechar el 5 % de la dendroenergía de la madera (Heinrich y Hernández, 2003).

Los tradicionales hornos de barro están compuestos por una sola cámara donde se mezcla la leña con las piezas de cerámica. El horno de Estepa está compuesto por dos cámaras; una ubicada en la parte inferior, la cual recibe el nombre de hogar, en la cual sucede la combustión de la madera; y la cámara superior, conocida como bóveda, donde se almacena el calor de la leña para la cocción de la cerámica. El diseño del horno permite que la energía y el humo producido en el hogar ingresen a la bóveda y recorren todos los espacios hasta llegar a la chimenea frontal, donde se expulsa el humo (Birabén *et al.*, 2014). La transferencia de calor del hogar a la bóveda hace que el comportamiento térmico del horno varíe. Es decir, el perfil de temperatura durante el proceso se debe al movimiento de los gases que provienen desde el hogar hasta la bóveda. Esto genera que las partes más cercanas al hogar, como el muro reflector, presentan una mayor temperatura que la parte superior del horno (Ramírez *et al.*, 2004).

El diseño del horno de dos cámaras es el más efectivo en retener la energía producida por la combustión de la leña. Las dos cámaras hacen referencia a la bóveda y al hogar. La bóveda es la cámara donde sucede la combustión, es importante que se construya herméticamente para que pueda soportar elevadas temperaturas, y que se realice en forma de domo, de esta manera se disminuye la pérdida de temperatura (Trujillo, 2005). Para que la bóveda obtenga una temperatura de 950 °C, se debe construir con material refractario que soporte los choques térmicos. Los ladrillos de construcción no soportan las gradientes de temperatura, por ello cuando se desarrollan las tensiones térmicas en la bóveda se generan grietas o fisuras irreparables. Es importante cubrir el domo de la bóveda con un material de baja conductividad térmica (Rendtorff *et al.*, 2007).

Según Hernández (2010) la construcción del horno se debe basar en diez principios: la cámara debe de ser construida con materiales livianos y resistentes a las elevadas temperaturas; de manera que aisle el calor de la bóveda con el medio externo. Se debe construir una chimenea que retire los gases generados por la combustión del combustible; la cual se debe quemar en presencia de oxígeno. La cantidad de oxígeno que entre al hogar debe ser el adecuado, para que se minimice la combustión incompleta. Se debe agregar la leña conforme se dé la combustión, debido a que la generación de calor depende de la cantidad de leña que combustione. Cabe resaltar que la madera debe de estar encima de una parrilla, para maximizar la transferencia de calor entre el hogar y la bóveda. Se debe colocar una separación resistente a los 950 °C. La construcción de un muro reflector permite que el flujo de gases viaje por la parte superior de la bóveda hasta la chimenea.

Para cumplir con los principios de Hernández (2010) se debe considerar que los materiales, según sean las partes del horno, deben ser resistentes a los cambios de temperatura. La base del horno se debe construir con materiales resistentes al peso y de baja conductividad térmica. Mientras que la parte superior del horno está construido con ladrillos refractarios. Los ladrillos están compuestos por diferentes tipos de arcillas como la caolinita, que da a los ladrillos resistencia mecánica, alta plasticidad y coloración clara; mientras que la montmorillonita e illita confieren alta plasticidad (Amado *et al.*, 2011). Para preservar la construcción del horno es importante que se realice el curado, el cual consiste en extraer la humedad del horno,

introduciendo leña durante las primeras horas para elevar la temperatura de manera paulatina (ICAITI 1984).

La biomasa principal para los hornos, es la madera porque es fácil de adquirir. En los primeros asentamientos humanos se extraía la leña de los bosques nativos, los cuales fueron deforestados. Actualmente hay bosques artificiales donde se puede extraer la madera. Durante una fogata se aprovecha el 5% de su energía, mientras que una estufa mejorada tiene una eficiencia del 40% (Heinrich y Hernández 2003).

La humedad de la madera juega un papel importante, debido a que, a mayor humedad, se requiere mayor cantidad de calor para evaporar el agua de la madera. Es decir, la relación entre la humedad y el poder calorífico es inversamente proporcional, porque entre mayor humedad menor será el poder calorífico. La humedad puede retrasar el comienzo de la combustión de la leña y aumenta las emisiones de contaminantes a la atmósfera (García y Pañi, 2013).

En la combustión de la madera se identifican tres etapas: el secado, la gasificación y la oxidación. El secado se realiza porque la madera contiene una fracción de agua que debe ser eliminada mediante la evaporación. Una vez que la temperatura supere el punto de ebullición del agua inicia la gasificación en la cual, mediante la pirólisis de la madera, se liberan gases e hidrocarburos, como el alquitrán. La temperatura aumenta provocando la combustión superficial de la madera, que se caracteriza por su resplandor rojo que puede generar una temperatura de 600 °C a 1000 °C. Estas tres fases ocurren en un mismo tiempo, es decir mientras la madera elimina la humedad de la madera se genera una llama que quema la superficie de la leña, generando el resplandor rojo (García y Pañi, 2013).

El calor neto del horno se determina mediante el balance térmico, que establece que el calor generado en el horno es producto del calor producido por el combustible y el aire. En el balance se debe estimar las pérdidas de calor. El calor perdido corresponde, al calor cedido a las paredes del horno y al calor arrastrado por los gases hacia la chimenea (García y Pañi, 2013).

La construcción de un horno está también relacionada con el costo y con las emisiones al medio ambiente (Ramírez *et al.*, 2004). El presente proyecto pretende diseñar y construir un horno artesanal de doble cámara modificado para la cocción de los biofiltros de cerámica, usados para el filtrado de agua doméstica en las comunidades rurales de Perú y Costa Rica. También se establece el costo de construcción del horno. El desafío de producción de los biofiltros es la accesibilidad de un horno que alcance altas temperaturas, con un gasto eficiente de la leña y la reducción de Gases de efecto invernaderos

2 Objetivos

Desarrollar un horno artesanal para la cocción de biofiltros de arcilla.

2.1 Objetivos Específicos

- Diseñar un horno artesanal
- Construir un horno artesanal.
- Evaluar la eficiencia del horno para la preparación de los biofiltros.
- Evaluar el costo del horno.

3 Metodología

3.1 Localización del Proyecto en la Universidad EARTH

El proyecto de investigación se realizó en el CIDER (Centro de Investigación Desarrollo de Energías Renovables), ubicada en la Universidad EARTH, Las Mercedes, Guácimo, Limón, Costa Rica. La localización geográfica del experimento en el CIDER se encuentra entre las coordenadas 10°12'59" N y 83°35'41" O a una elevación de 36 msnm. La localización geográfica del experimento en la Finca Académica se encuentra entre las coordenadas 10°12'40" N y 83°35'57" O a una elevación de 39 msnm (Google Earth, 2019). La temperatura promedio anual de la Universidad EARTH es de 25 °C, con una humedad relativa anual de 83.5 % y una precipitación promedio anual de 3592 mm (Universidad EARTH, 2018).

3.2 Etapas del Proyecto

El proyecto consta de las siguientes etapas: la etapa de diseño, en la cual se muestran las medidas correspondientes del horno; la etapa de construcción del horno de doble cámara; la etapa de evaluación de eficiencia del horno, en la que se realizan las pruebas de emisiones durante la cocción de biofiltros en el horno; y finalmente se obtiene el costo del horno.

3.2.1 Diseño del horno

El diseño del horno se realizó mediante el programa de en Autodesk Tinkercad 3D. Se tomaron en consideración los materiales de construcción y las dimensiones de la base, cenicero, hogar, bóveda y la chimenea. Para el diseño del horno se tomaron referencias de la patente de Selva (1997), en dicha patente se establece las diferentes partes del horno. Se seleccionó una bóveda estandarizada con las siguientes medidas: ancho y largo 1,10 m, mientras que la altura máxima fue de 1,50 m. Se puede observar el esquema de las partes del horno artesanal con los materiales requeridos para su construcción (Figura 1).

La base del horno debe ser de forma rectangular, además debe de tener paredes en forma horizontal y vertical. Los materiales que se usen en esta parte deben ser de forma cúbica rectangular como ladrillos o bloques cúbicos, el uso de estos materiales facilita la construcción (Pillajo y Romero 2016).

El cenicero tiene una forma rectangular y está conformado por las paredes verticales y una parrilla. El cenicero del horno cumple la función de acumular las cenizas que se producen durante la combustión de la leña. En la parte superior debe contener una parrilla la cual tiene la función de soportar la leña que se va a introducir al hogar (Garcia y Pañi, 2013).

El hogar del horno debe estar conformado por paredes laterales y por una abertura. Debe tener la misma forma de la base. El hogar está ubicado en la parte inferior de la bóveda. En esta parte se da la combustión de la madera, donde se liberan los gases y el calor se traslada a la bóveda. El movimiento de los gases, se debe hacer mediante una abertura que conecte el hogar con la bóveda. La posición de esta abertura debe estar en el lado opuesto a la abertura por donde ingresa el aire externo (Mendoza 2002).

La bóveda debe estar construida con ladrillos refractarios y su espesor depende del ladrillo y el recubrimiento que se le aplique. La forma de la bóveda es de un domo en arco. La bóveda debe tener una puerta que debe estar ubicada en la parte delantera, para permitir el ingreso de los materiales en su interior (Peñañiel, 2015). La puerta debe ser de hierro y sus dimensiones deben ser según las dimensiones de la bóveda (Urgilés, 2019).

La chimenea debe estar ubicada en la parte lateral de la bóveda para expulsar los gases de la bóveda al ambiente (Sotalin, 2018).

El recubrimiento del horno se realiza en la parte superficial de la bóveda y de la chimenea cuando se ha terminado la construcción de todas las partes del horno, con el fin de aislar la temperatura interna con el medio ambiente (ICAITI, 1984).



Figura 1. Esquema para la construcción del horno.

3.2.2 Construcción del horno

La base, el cenicero y el hogar del horno son construidos con bloques de construcción; estos fueron unidos con concreto. La chimenea está compuesta por un tubo metálico recubierto con ladrillos. La bóveda fue construida con ladrillos refractarios, que poseen características aislantes y soporta cambios de temperatura hasta los 1260 °C. Los ladrillos refractarios se usan para la fabricación de laboratorios, tratamientos térmicos y hornos de cerámica. Estas piezas se pegan con el cemento o mortero refractario y soportan una temperatura de 1649 °C (Uruca, 2019). La

bóveda contiene una puerta de metal reforzada con ladrillos y cemento refractario. Para el control de temperatura se usa un termómetro digital.

En el cenicero se ubicaron 8 agujeros de 0,003 m de diámetro. Los agujeros permiten el paso del aire. El hogar necesita de grandes cantidades de oxígeno para que se pueda dar la combustión completa, además el aire permite el desplazamiento del humo en el interior del horno. El humo junto con el calor se desplaza desde el hogar a la bóveda y sale al exterior por la chimenea del horno (Uche y Marín 2001).

3.2.3 Evaluación de la eficiencia del horno

Para la evaluación de la eficiencia del horno se evaluaron la entrada del producto, precalentamiento, cocción de los biofiltros, enfriamiento interno del horno y extracción de biofiltros (Martinez, 2014). Para el diseño del horno se probaron los diferentes materiales para la combustión como fuente de energía para alcanzar la temperatura a 950 °C. Para evaluar la eficiencia del horno se usó la madera de nombre común, Pilon, perteneciente a la especie maderable: *Hieronyma alchorneoides*

Para determinar los rangos de temperatura que se producen en el interior de la bóveda se utilizó un Sensor HI766 de termopar tipo K. El material es de acero inoxidable, su longitud es de 1,7 m, la temperatura máxima es de 1100 °C. El sensor se conecta a la Termocupla Dual-imput tipo K. Este instrumento nos permite medir la temperatura interior del horno. Este sensor digital permite hacer un seguimiento de la temperatura en tiempo real. Para la temperatura exterior se utilizó un termómetro por infrarrojos Testo 830-T2, el cual tiene un rango de -30 °C hasta los 400 °C. El termómetro puede medir en una distancia de 0,016 m hasta 5,0 m.

La cantidad de leña que se agregó en el hogar del horno se evaluó durante varias horas, debido a que los biofiltros debieron calcinarse durante 5 horas hasta llegar a los 950 °C. Durante las primeras cuatro horas se debe incrementar 200 °C/h hasta llegar los 800 °C, y en la quinta hora debe subir 150 °C. Es decir, en la primera hora se debe obtener una temperatura de 200 °C, se debe seguir introduciendo leña para aumentar la temperatura a 400 °C, de igual manera a los 600 °C, 800 °C y finalmente a los 950 °C (Frías, 2016). Este proceso es ideal para un horno eléctrico donde se controla la temperatura, pero para un horno artesanal es necesario agregar una hora. Se colocó el termómetro en tres diferentes alturas para evaluar el comportamiento térmico del horno durante la cocción de los Biofiltros (Ramírez *et al.*, 2004). La parte inferior de la bóveda se le consideró a los 0,0 m, mientras que la parte céntrica del horno estuvo ubicada a 0,58 m de altura. Finalmente, la parte superior tuvo una altura de 0,53 m desde la parte céntrica, es decir su altura total fue de 1,11 m (Figura 2).

La temperatura que se genera en el centro y la parte superior del horno se usa de referencia para determinar la temperatura interna del hogar. La temperatura que alcance al transcurrir una hora va a depender de la cantidad y del tipo de combustible (madera) que se suministra (Gómez, 2007). Las condiciones apropiadas para el calentamiento permiten un proceso óptimo, es decir un calentamiento lento demora más horas, sin embargo, es un beneficio para el horno, ya que, si se realiza un calentamiento rápido, puede ocasionar rupturas del horno. La transferencia de

energía permite obtener los perfiles de temperatura del horno, de esta manera se conoce si en el interior del horno hay un calentamiento homogéneo (Gómez *et al.*, 2015).

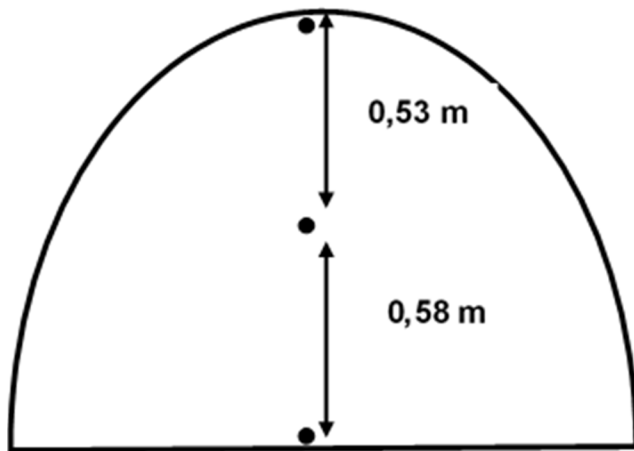


Figura 2. Dimensiones de la ubicación de las tomas de temperatura

Para evaluar la eficiencia del horno durante la cocción de los biofiltros, se divide la superficie de la base de la bóveda en cuatro puntos y en cada uno de ellos se coloca un biofiltro. Se repite el proceso tres veces y se colocan los biofiltros en los mismos puntos (Figura 3)



Figura 3. División de la base de la bóveda y posicionamiento de los cuatro biofiltros durante la prueba de eficiencia

3.2.4 Determinación de la humedad por prueba gravimétrica

Es importante medir la humedad de la madera, porque permite conocer la facilidad de encendido y la caracterización de la intensidad y severidad del fuego. El contenido de humedad del combustible depende de la cantidad de horas expuestas al sol. El alto contenido del calor específico del agua retarda la combustión (Kunst *et al.*, 2014).

Según Foglia (2005) de la leña que se va a introducir a quemar, se extrae una muestra y de manera inmediata se pesa, este primer peso se considera como el peso inicial (P_i). Seguidamente se coloca en una cápsula y se introduce al horno, el cual debe tener una temperatura máxima de 105 °C. Se debe pesar hasta que se obtenga un peso constante, el peso final (P_o) es el último peso de la madera. Una vez obtenido el peso final, se procede a calcular el contenido de humedad (CH). A continuación, se describe la fórmula: $CH = ((P_i - P_o) / P_o) * 100$

3.2.5 Análisis estadístico para la evaluación

Para los análisis estadísticos de los resultados se usó el programa estadístico Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2018) con un análisis de varianza (ANOVA) con pruebas de comparación múltiples DCG Tukey con un intervalo de diferencia de $p < 0,05$, lo cual nos muestra si hay una diferencia significativa entre las diferentes variables evaluadas. Se realizaron tres repeticiones, en cada repetición se midió la temperatura interna y externa del horno, la humedad de la madera y la cantidad de leña usada durante el proceso.

3.2.6 Costo de la construcción del horno, materiales para la construcción y mano de obra estimada

Para estimar el costo de construcción se deben considerar los elementos de materia prima o materiales, herramientas, instrumentos, equipos, maquinaria, instalaciones y mano de obra. Para el costo de mano de obra se considera el total de trabajadores, el salario que reciben por hora y la cantidad de horas trabajadas (Noguera y Parra, 2008). En el caso del horno se estimaron los costos de los diferentes materiales, tales como las varillas de metal, los bloques de cemento, la arena, la piedra molida, el cemento, los ladrillos refractarios, el cemento refractario, la lámina de metal, vidrio molido, arcilla y la cal. También se consideraron los costos de los instrumentos para medir la temperatura y los análisis para medir la eficiencia del horno.

4 Resultados

4.1 Resultado del Diseño del Horno

La base del horno es un rectángulo de 1,0 m de ancho por 1,6 m de largo y una altura de 0,1 m. Cabe resaltar que tiene un grosor de 0,3 m para que se puedan insertar los bloques (Figura 4a). De la base del horno se procede a colocar los cubos, los cuales representan a los bloques de cemento. Los óvalos que se encuentran en los cubos azules, representan las varillas de hierro que se colocan en la base del horno. Luego se realiza el cimiento del horno el cual tiene las mismas medidas que la base, pero con un espesor de 0,1 m (Figura 4b)

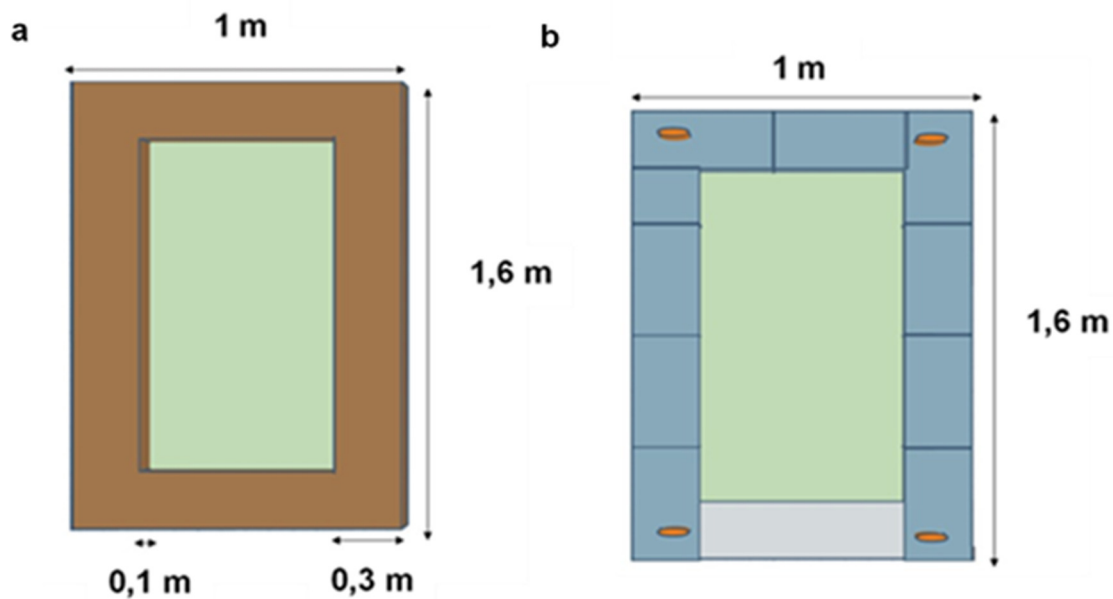


Figura 4. Diseño del área marcada (a) y de la base del horno (b)

Continuando con el diseño se procede a dibujar el cenicero, el cual está representado por un cubo de color plomo, los cuales hacen referencia a los bloques de construcción. Se agregan los cubos alrededor de la línea marcada. Se realizan dos filas de bloques con un espesor de 0,10 m. Para el cenicero se agrega un cubo que representa a la pared aislante con un espesor de 0,15 m; en total da un espesor de 0,25 m. En el cenicero se perforaron ocho agujeros con un diámetro de 0,03 m por 0,25 m de profundidad. Para el hogar se agrega una pared más delgada que la del cenicero, la cual tiene un espesor de 0,008 m; obteniendo 0,18 m de espesor (Figura 5a).

Para la parte superior del hogar se realizó un diseño de un techo con 5 agujeros. Los primeros cuatro tienen las mismas medidas, con un ancho de 0,30 m por 0,35 m de largo. El quinto espacio tiene un ancho de 0,64 m por 0,10 m de largo (Figura 5b).

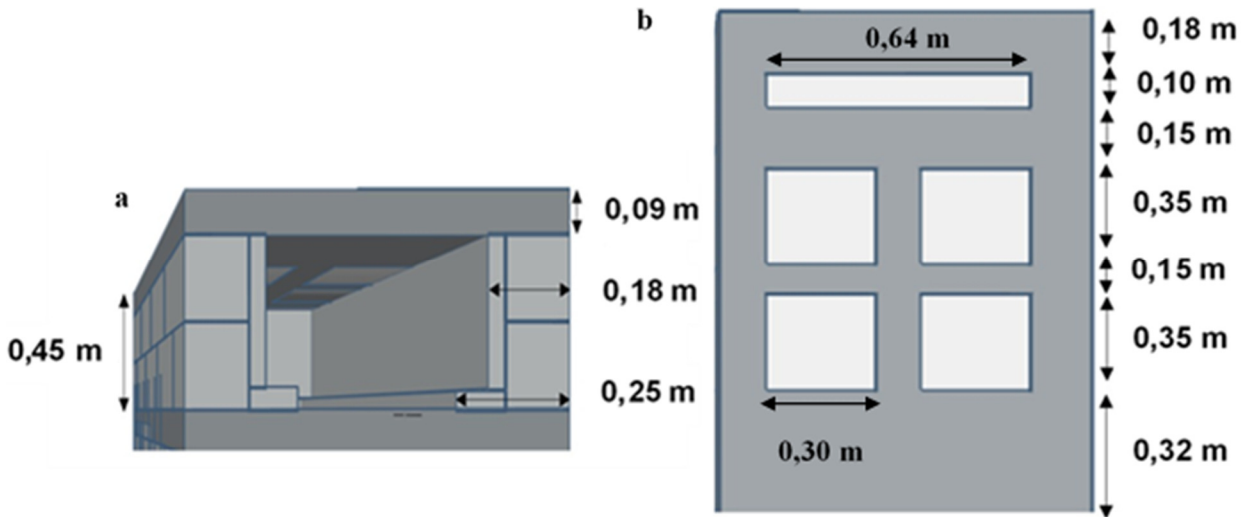


Figura 5. Diseño del cenicero y del hogar del horno (a) y de la parte superior del hogar (b).

Se procedió a dibujar el domo del horno y la chimenea del horno. El domo tiene una forma ovalada, es importante que el domo sea ovalado para que el recorrido del humo sea más eficiente. Para el domo se consideró una altura de 1,15 m x 1,45 m de ancho (Figura 6a). La chimenea se diseñó con una altura de 2,0 m por 1,0 m de ancho (en la base). La inclinación de la pared de la chimenea es de 30 % (Figura 6b)

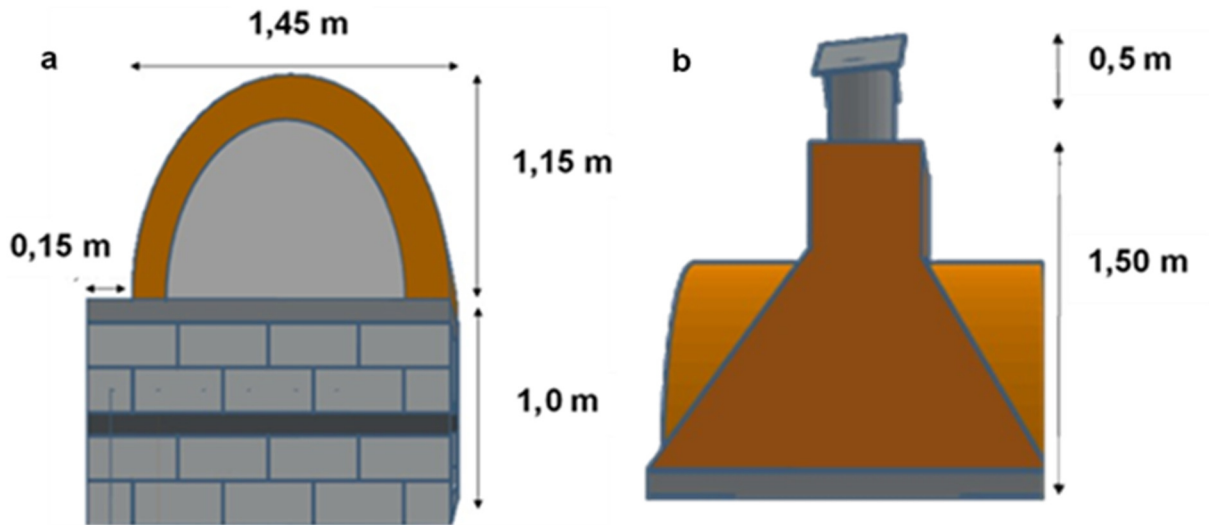


Figura 6. Diseño de la bóveda (a) y de la chimenea del horno (b).

Finalmente se realizó el diseño completo del horno. El diseño del horno tiene cuatro vistas, dos laterales y dos frontales. El lado lateral izquierdo del horno tiene una altura de 3,0 m x 1,0 m de ancho (Figura 7a). En lado lateral derecho las medidas son de 2,15 m de altura x 1,0 m de ancho (Figura 7b). La altura del lado izquierdo es mayor que la altura del lado derecho, debido a que en ese lado se encuentra la chimenea. La vista frontal el horno tiene una altura de 2,15 m x 1,60 m de ancho (Figura 7c y 7d).

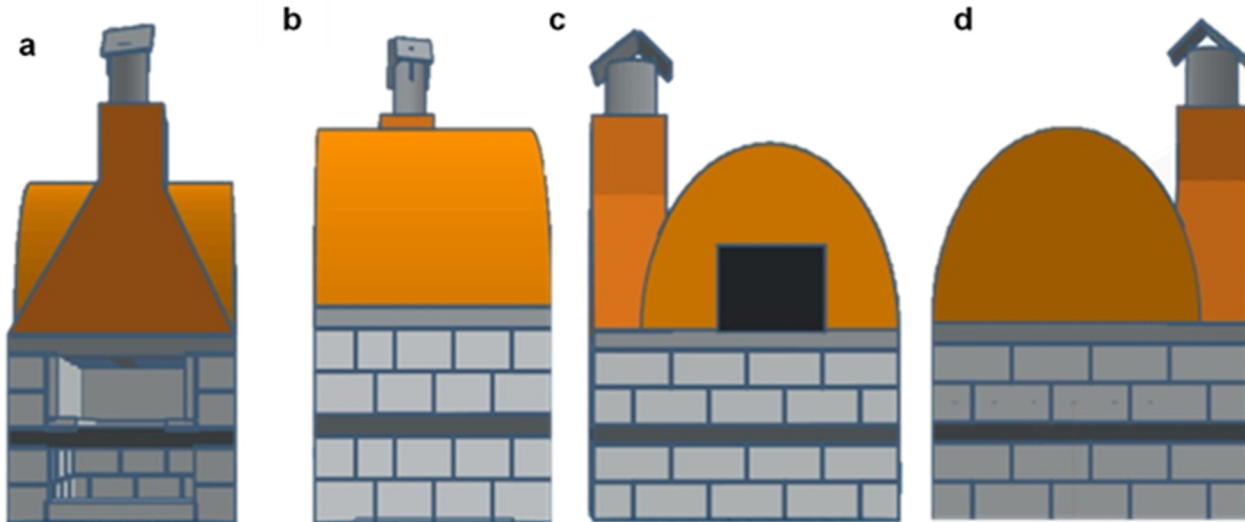


Figura 7. Lateral izquierdo (a), lateral derecho (b), vista frontal (c) y vista posterior (d)

4.2 Resultado de la Construcción del Horno

4.2.1 Base del horno

El horno se construyó en el CIDER de la Universidad EARTH. El terreno era plano y contaba con suficiente espacio para la construcción del horno. Se limpió el área y se trazó un rectángulo en el piso de 1,0 m de ancho por 1,6 m de largo. Después del trazado se colocaron cuerdas de nivel, las cuales permiten una guía para construir de manera recta. A partir del trazo se excavó 0,20 m de profundidad. Seguidamente se agregó una mezcla de concreto con un espesor de 0,09 m (Figura 8a).

Se colocaron 9,5 bloques alrededor del rectángulo y se rellenaron con concreto. Luego se colocaron cuatro varillas de 0,45 m de altura. Se agregaron dos filas de bloques en forma de U, en el lado izquierdo no se colocaron bloques, mientras que en los otros lados se colocaron 19 bloques de manera intercalada. En cada agujero del bloque se colocaron varillas de metal de 0,03 m de altura, seguidamente se rellenó de concreto. En la parte del centro se limpió y se agregó concreto. Se dejó secar durante dos semanas y en las tardes se roció con agua para evitar que la estructura se agrietara (Figura 8b).

El cimientado del horno se construyó con concreto, varillas de metal y vidrio. Se colocó un molde rectangular de madera en el centro de la pared y se colocaron reglas de madera en el exterior de la pared de los bloques. Luego se colocaron siete varillas en forma horizontal y entrelazaron con las varillas verticales. En la parte superior se agregó concreto con un espesor de 0,005 m luego se agregó 18 kg vidrio molido con 9 kg de arena. El espesor fue de 0,002 m y se agregó otra capa de concreto. Las medidas del cimientado son las mismas que la base del horno, con un espesor de 0,11 m. Se dejó secar durante tres semanas y se roció con agua, finalmente se retiró el molde de madera (Figura 8c).

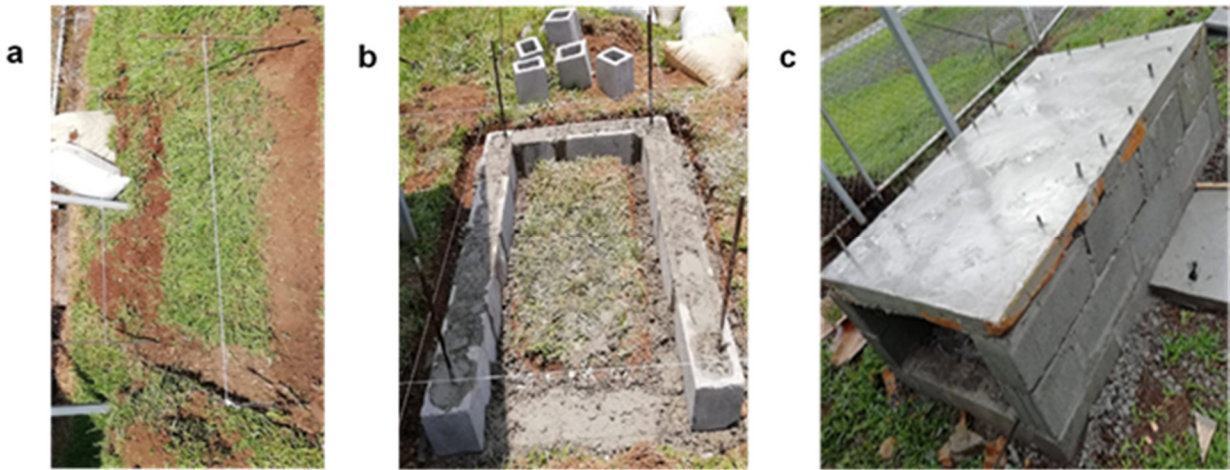


Figura 8. Selección del área (a), construcción de la base (b) y construcción del cimiento del horno (c)

4.2.2 Cenicero y el hogar

Una vez construido el cimiento del horno se empezó a construir las paredes del cenicero y del hogar, para ello se ocuparon 19 bloques de construcción y se rellenó con una mezcla de concreto (Figura 9a). En el interior se colocó un molde de madera, la cual tiene cinco agujeros con las medidas mencionadas en el diseño. Se realizó una pared con una mezcla de concreto y vidrio molido. Una vez agregada la mezcla se dejó secar por dos semanas, durante ese periodo se le roció con agua y finalmente se retiró el molde de madera (Figura 9b).

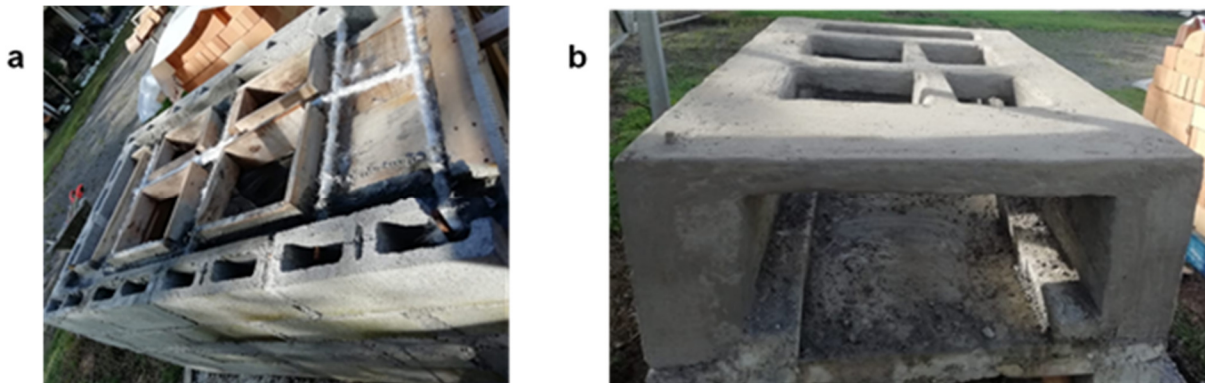


Figura 9. Construcción del cenicero (a) y del hogar (b).

4.2.3 Bóveda

Antes de empezar con la construcción de la bóveda se realizó un molde de madera con la forma del domo. Las medidas del molde fueron 1,0 m de altura por 1,1 m de ancho. Se usaron 28 reglas de madera de 0,9 m de alto por 0,05 m de ancho (Figura 10a).

Luego se empezó con la construcción de la bóveda, la cual está construida con 300 ladrillos refractarios y 6 bolsas de cemento refractario. En el lado izquierdo del domo se dejaron dos espacios con una altura de 0,2 m de ancho por 0,16 m de largo. Para darle forma al domo es importante realizar una base de madera. A los ladrillos refractarios se le hicieron modificaciones para que pudieran encajar. Estas modificaciones son cortes en la parte lateral del ladrillo y en las

alturas. Una vez terminada la construcción del domo se dejó secar durante dos semanas. Después el molde se retiró cuando el cemento estuvo completamente seco y los ladrillos estuvieron adheridos entre sí. Una vez retirado el molde se procedió a construir el muro reflector con 0,45 m de alto por 0,75 m de ancho (Figura 10b).

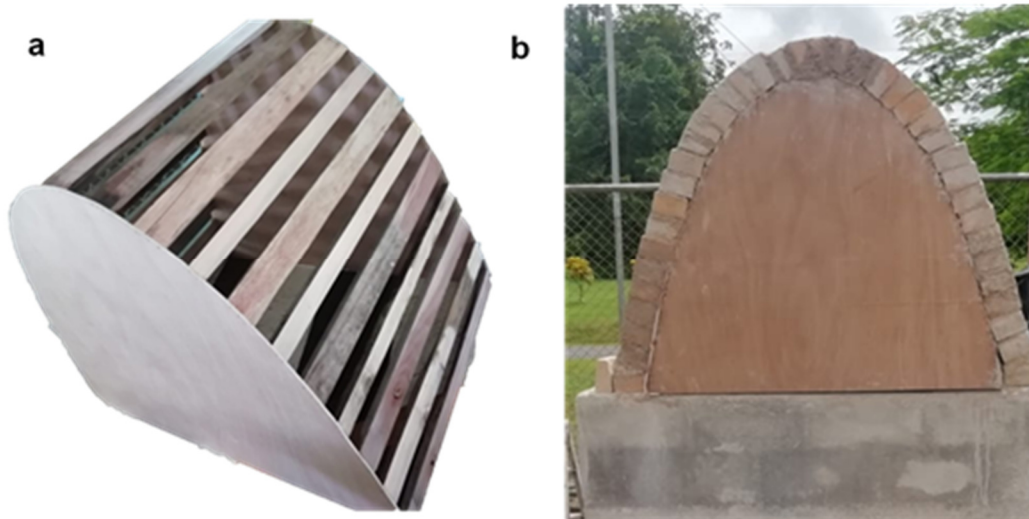


Figura 10. Molde de madera (a) y construcción de la bóveda (b).

4.2.4 Chimenea

La chimenea se construyó en el lado izquierdo del horno. Fue construida con 58 ladrillos refractarios y media bolsa de cemento refractario. Cabe resaltar que se dejó un espacio de 0,1 m de espacio entre los ladrillos de la bóveda y de la chimenea. Este espacio es para que el humo pueda salir por la parte superior de la chimenea (Figura 11a). En el medio del agujero se introduce la chimenea de metal, la cual tiene una circunferencia de 0,5 m. La chimenea de metal cumple la función de evitar que el agua proveniente de la lluvia se introduzca en el interior del horno (Figura 11b). La chimenea está compuesta de dos partes; la primera está hecha con los ladrillos y el cemento refractario (Figura 11c).

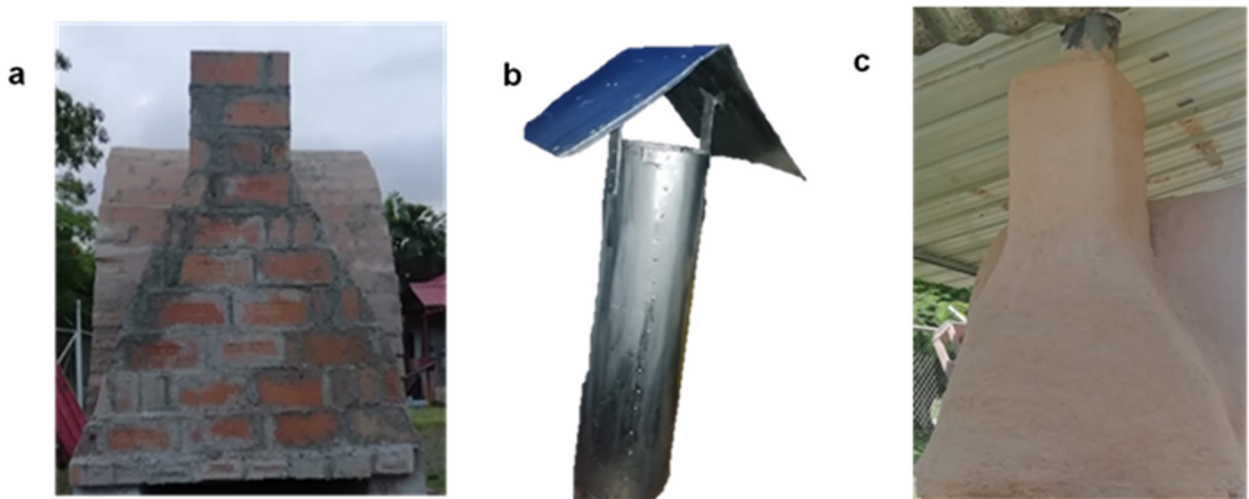


Figura 11. Construcción de la chimenea de ladrillos (a) chimenea de metal (b) chimenea terminada (c)

4.2.5 Instalación de la puerta, las placas refractarias y la parrilla

La puerta está confeccionada por un angular de metal de acero dulce. Las medidas de la puerta son 0,55 m de largo por 0,45 m de ancho y 0,05 m de espesor. Se colocaron piezas de metal de manera paralela a la posición de la puerta. Dichas piezas permitieron la facilidad de construcción de la parte frontal de la bóveda del horno. Para aislar el metal del calor interior del horno, internamente se recubrió la puerta con ladrillo triturado y cemento. Finalmente se pintó la puerta de un color negro (Figura 12a).

Las placas refractarias están hechas con trozos de ladrillo refractario y cemento refractario. Se utilizaron cuatro placas refractarias, las cuales tienen una medida de 0,45 m de largo por 0,30 m de ancho y su espesor es de 0,05 m. Las placas refractarias se colocaron en los espacios de la base la bóveda. Cumplen la función de sostén, en otras palabras, las placas son el piso de la bóveda, es donde se pueden colocar los biofiltros (Figura 12b).

La parrilla está hecha con varillas de metal, se usaron ocho varillas de 0,6 m de largo y se soldaron en forma de una reja. Sus medidas son: 0,60 m de ancho por 1,0 m de largo. Luego se recubrió con el cemento refractario. La parrilla se coloca en la parte superior del cenicero y al inicio del hogar. La función de la parrilla es sostener la madera en el proceso de combustión (Figura 12c).

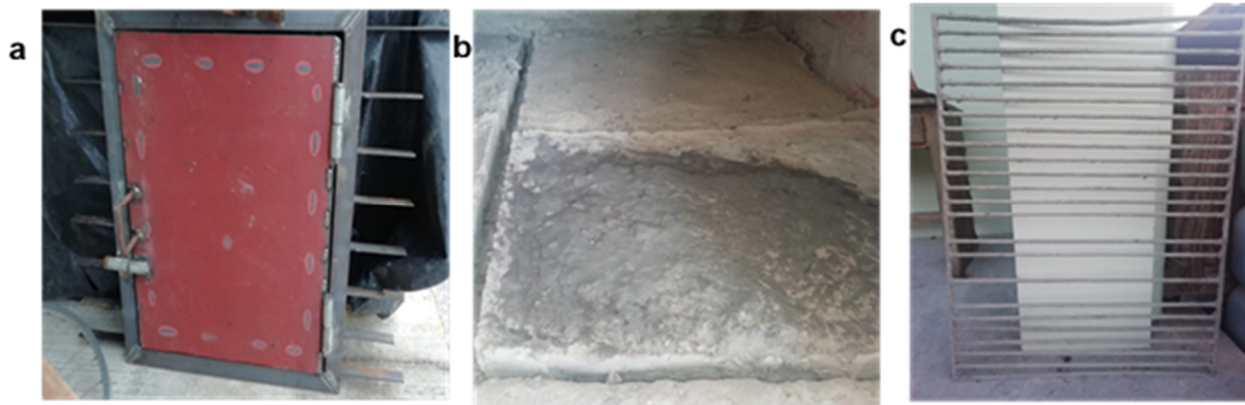


Figura 12. La puerta (a), las placas refractarias (b) y la parrilla (c) del horno.

4.2.6 Recubrimiento del horno

Cuando se terminó la construcción se recubrió los ladrillos de la bóveda y de la chimenea con la mezcla de arcilla, ladrillo molido, vidrio molido, cemento refractario, cal, cemento hidráulico y agua. Las proporciones fueron 3:1:1: 2:1:2:3. Con el nivel se le dio forma al horno. Se aplicó hasta obtener 0,08 m de espesor. El recubrimiento permite que el horno aumente su efectividad durante la calcinación de los biofiltros. Se deja secar durante tres semanas. No se agregó recubrimiento en la parte inferior del horno, debido a que esas zonas no almacenan temperatura. El recubrimiento queda un color marrón claro, por el contenido de arcilla en la mezcla. Finalmente, el horno tuvo una altura de 2,1 m. La altura se considera desde la base hasta la superficie del domo del horno. El ancho es de 1,6 m (Figura 13).



Figura 13. Lateral izquierdo (a), lateral derecho (b) vista frontal (c) y vista posterior (d)

Antes de usar el horno para la cocción de los biofiltros, se realizó el curado agregando leña lentamente, para no provocar una elevación drástica de la temperatura, y para evitar que se provocaran fisuras en el mismo. Se hizo un precalentamiento de dos horas, donde la temperatura no superó los 150 °C.

4.3 Eficiencia del Horno

4.3.1 Temperatura interior del horno

La temperatura inicial al interior del horno, tuvo un promedio de 31,07 °C por la parte inferior, 30,43 °C por la parte céntrica y 29,93 °C por la parte superior. Un análisis de ANOVA con pruebas de Tukey demostró que no hay una diferencia significativa ($p=0,98$) entre las diferentes partes del horno en ninguno de los tiempos evaluados. Conforme pasaron las horas el horno subió la temperatura gradualmente desde la primera hora hasta la sexta hora con 238,55 °C, 390, 54 °C, 586,97 °C, 732,96 °C, 882,02 °C y 956,01 °C en el último tiempo de evaluación (Figura 14).

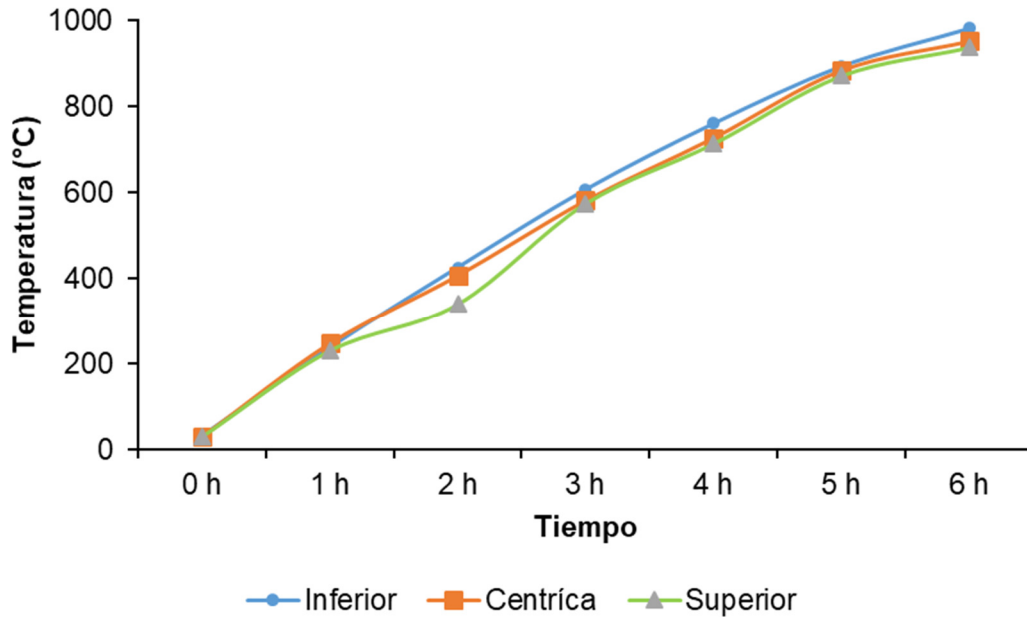


Figura 14. Gráfica del desarrollo de la temperatura en el interior del horno en tres diferentes estratos de altura.

4.3.2 Temperatura exterior del horno

En la evaluación de la temperatura exterior del horno, la temperatura inicial tuvo un promedio de 31,17 °C, 30,57 °C y 29,60 °C en la parte inferior, céntrica superior respectivamente. Se demostró que no existe una diferencia significativa entre las tres partes ($p=0,956$). Conforme pasaron los minutos la temperatura exterior en la primera hora presentó un promedio de 32,93 °C, 34,77 °C y 50,60 °C en la parte superior, inferior y en el centro respectivamente. Se demostró que hay una diferencia significativa ($p=0,031$) entre la parte céntrica y la parte superior, mientras que el interior es significativamente igual con la parte céntrica y superior. En la segunda, tercera, cuarta, quinta y sexta hora se presentó una diferencia significativa ($p=0,012$) entre la parte superior y céntrica, mientras que no hubo una diferencia significativa ($p=0,35$) entre la parte inferior y superior (Figura 15).

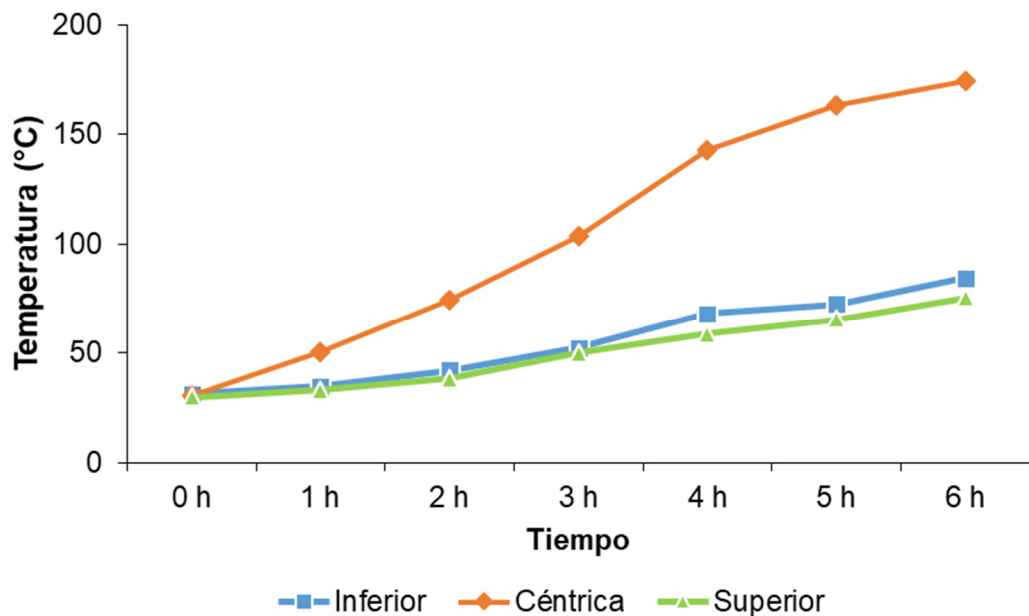


Figura 15. Gráfico del desarrollo de la temperatura en el exterior del horno

4.3.3 Cantidad de leña usada en el proceso

Se midió la cantidad de leña usada durante todas las pruebas para evaluar la eficiencia del horno. Se usó un total de 193,10 kg de madera de *Hieronyma alchorneoides*. Hay una diferencia significativa ($p=0,0001$) entre la cantidad de leña aplicada en la primera hora con la segunda hora. Esta diferencia se debe a que inicialmente el horno está a temperatura ambiente y no contiene energía almacenada. Mientras que, en la segunda, tercera, cuarta y quinta hora no existen diferencias significativas en cuanto a la cantidad de leña utilizada. En la sexta hora si se presenta una diferencia significativa ($p=0,0001$) con las otras horas, esto se debe a que en la quinta hora llegó a los 882 °C y se necesitaba mayor cantidad de leña para subir los 68 °C faltantes, y de esta manera llegar a la temperatura deseada. Durante la primera prueba se gastó 0,38 kg de hojas de papel, 0,75 kg de viruta de madera y 60,10 kg de madera. Inicialmente se usó 14,7 kg de madera, con lo cual se logró que el horno alcanzara una temperatura promedio de 263,6°C. El horno internamente empieza a aumentar la temperatura, por ende, la cantidad de madera disminuyó en la segunda, tercera, cuarta y quinta hora, para cada hora se usó 10,4 Kg, 10,5 Kg y 9,5 kg de madera respectivamente. Los resultados de la cantidad de leña usados en cada hora no se relacionan de manera directa con la temperatura del horno, debido a que en la primera hora se usará más leña, porque la transferencia de calor es lenta, ya que el horno se encuentra a temperatura ambiente. Una vez que el horno transfiera la energía producida por la leña, la cantidad de leña que se use en las siguientes horas tendrán un peso similar (Figura 16).

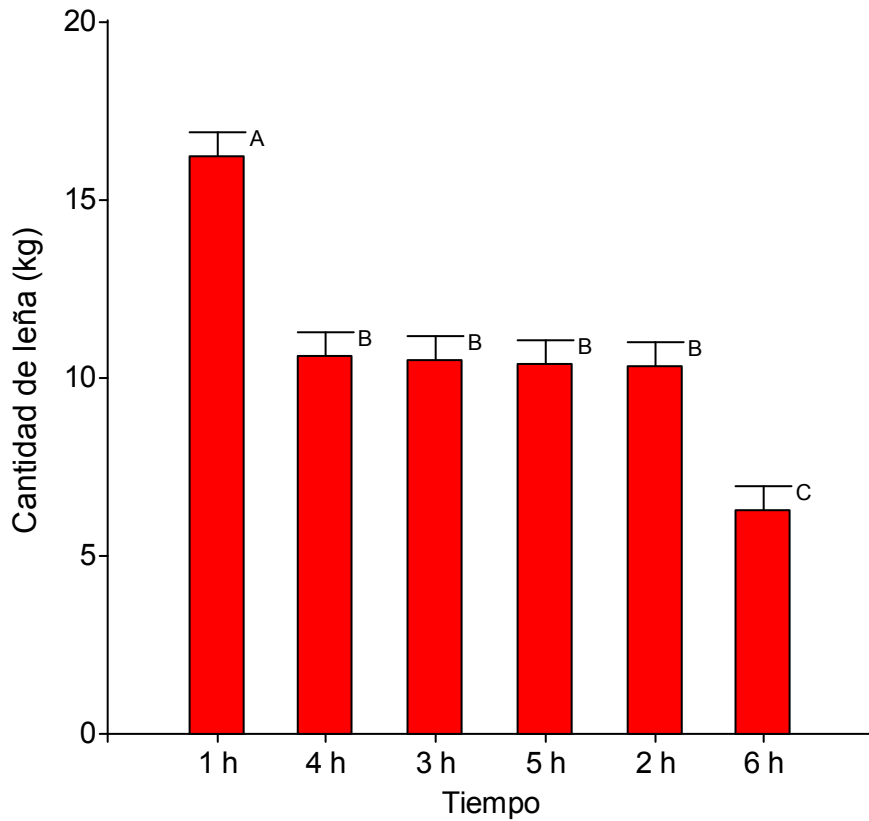


Figura 16. Gráfico de la cantidad de leña usada durante la cocción de los biofiltros.

4.3.4 Desarrollo de la humedad de la leña durante el proceso

Para el primer día de evaluación el contenido de humedad de la leña tuvo un promedio de 4,47 %, el segundo día tuvo un promedio de 25,48 % y en el tercer día se obtuvo un 18,96%. El contenido de humedad en el primer día es significativamente igual que la humedad del tercer día, pero con una diferencia significativa ($p < 0,05$) con respecto al día dos. El contenido de humedad afectó la eficiencia del horno al momento de encender la leña. En el primer día se demoró 0,083 h para que los trozos de leña estuvieran encendidos, mientras que en el segundo día demoró 0,5 h para encender el horno. En el caso del tercer día tardó 0,17 horas. Cabe resaltar que el contenido de humedad también afectó el peso de la leña, debido a que en el segundo día de evaluación se usó adicionalmente 9,3 kg de madera y para el tercer día se gastó 3,5 kg adicionales. Con estos resultados podemos apreciar que el contenido de humedad juega un papel importante en la eficiencia de la bóveda, debido a que si el porcentaje supera el 20 % se necesitará de media hora a más para empezar con el proceso de cocción de los biofiltros (Cuadro 1).

Cuadro1. Humedad de la leña

Muestras	Humedad		
	Día 1	Día 2	Día 3
	----- % -----		
Muestra 1	4,92	26,95	13,61
Muestra 2	4,01	17,31	16,96
Muestra 3	4,49	32,17	26,33
Promedio	4,47	25,48	18,96

4.3.5 Costos de la construcción del horno, materiales para la construcción y mano de obra estimada

El horno de doble cámara está valorizado en USD 3908,21, incluyendo la mano de obra, los materiales, los análisis, los equipos y los gastos extras. En el cuadro 1 se puede observar el costo de las diferentes partes del horno, también se agregó el costo de los análisis y los equipos con los que se hicieron las respectivas mediciones. La construcción de un horno tradicional de una sola cámara sólo incluye el costo de la base, la bóveda, la puerta, la chimenea de ladrillos, el recubrimiento, el techo, los análisis, los equipos y los costos extras. El costo de la construcción de un horno de una cámara sería de USD 3285.58 (Cuadro 2).

Los costos de la base engloban el cemento, la arena, la piedra cuartilla, varillas de metal los bloques de metal y la mano de obra. En el caso del cenicero y del hogar se incluyen los mismos materiales que la base, además se le agregaron el costo del vidrio molido, el molde de madera. Los materiales de la bóveda son diferentes a la base y al hogar. Para la bóveda y la chimenea se incluyó el costo del cemento refractario, cemento, ladrillos refractarios, molde de madera y la mano de obra.

La puerta y la parrilla del horno se elaboraron en la Unidad de Ingeniería Agrícola, por tal motivo se agregó el costo de la mano de obra especializada, siendo los materiales el angular, plancha de metal, las varillas de metal. No se consideró el costo de la soldadura, debido a que se incluyó en la mano de obra especializada. Una vez instalada la puerta en el horno, se recubrió con ladrillos y cemento refractario. El costo de las placas refractarias incluye los ladrillos refractarios, el sairset, molde de madera y la mano de obra.

Para mejorar la eficiencia del horno es importante recubrir el horno con un material aislante, para evitar la pérdida de calor. Hay diferentes aislantes, como la fibra de vidrio, fibra de piedra o un cemento especial. El costo de estos materiales incrementaría el valor monetario del horno. Ante esta situación se decidió usar materiales que estén al alcance y que tengan un menor precio. El costo del recubrimiento está compuesto por la arcilla, vidrio molido (botellas de vidrio), cemento

refractario, aserrín, cemento hidráulico y ladrillo refractario triturado (ladrillo que sobro de la construcción del horno), cal, piedra cuartilla y la mano de obra.

La construcción del techo genera un gasto adicional, pero necesario porque protege al horno de las lluvias y ayuda a prolongar la vida útil del horno. Para el costo de dicha infraestructura se incluyó los tubos de hierro, la platina de metal, cemento, la arena, piedra molida, piedra y la mano de obra. Los materiales fueron donados por el área de mantenimiento de la Universidad, sin embargo, se consideraron el costo del material para saber el costo real del techo.

Para hacer las mediciones de eficiencia del horno es necesario comprar equipos como el termómetro y la termocupla, los cuales cumplen la función de medir la temperatura interna del horno. Para la temperatura externa se usó un termómetro de luz infrarroja, también se incluyó el precio de la balanza que nos dio los pesos de la leña que se agregó durante las 6 horas de cocción de los biofiltros. En los gastos extras se incluyó el costo de la leña y el costo del transporte que se usó para trasladar los materiales refractarios desde la empresa LA URUCA, ubicada en San José, hasta el CIDER de la Universidad EARTH

Cuadro 2. Costos de las diferentes partes del horno de doble cámara y del horno de una cámara tradicional (USD).

Descripción	Horno de doble cámara	Horno de una cámara
	----- USD -----	
Base	213.86	213.86
Cenicero y hogar	444.46	
Bóveda	1173.70	1173.70
Chimenea	139.00	139.00
Puerta	127.94	127.94
Placas refractarias	126.55	
Parrilla	51.62	
Recubrimiento	280.30	280.30
Techo	317.70	317.70
Equipos	690.20	690.20
Análisis	83.10	83.10
Costos extras	259.78	259.78
Total	3908.21	3285.58

5 Discusión

Este proyecto ha logrado diseñar un horno de doble cámara, el diseño permite tener un control del proceso, en comparación del horno de barro de una sola cámara. El diseño del horno construido, está compuesto de una bóveda con su puerta frontal y una chimenea en la parte superior. El modelo de una sola cámara mantiene junta la leña, carbón, las cenizas, los gases y los materiales que se someten a cocción. Se recomienda construir hornos de una sola cámara si se va a trabajar con comida debido a que el rango de temperatura es de 190 °C a 270 °C (Malla, 2015). Sin embargo, si la aplicación necesita altas temperaturas, como los 900 °C de este estudio, es necesario diseñar un horno que se adapte a las características deseadas. Otro modelo de horno son los fijos de fuego directo, de tiro ascendente y sin techo, este modelo de horno tiene poca capacidad de almacenar la energía térmica, debido a que sus paredes son delgadas y su área horizontal es mayor. Estas características hacen que el horno sea menos eficiente, por lo que se tendría que usar más leña y el tiempo de cocción aumenta (García, 2013).

El horno se construyó con materiales como arcilla, cemento y ladrillos refractarios, en comparación con los hornos construidos con arcilla, adobe, fierro, ladrillos cemento; estos últimos materiales generan bajo aislamiento y genera la fuga de energía y calor. La construcción de un horno con estos materiales afecta la eficiencia de cocción de los biofiltros (García, 2013). Mientras que los hornos que son construidos con materiales refractarios, que retienen temperaturas de hasta 1260 °C, están constituidos por diferentes materiales que le dan estabilidad al ladrillo y permite la transferencia de calor (Muñoz *et al.*, 2011).

Se obtuvo que en la parte superior del horno se presentó una menor temperatura en comparación de la parte inferior y céntrica. Este resultado es similar a los resultados reportados por Ramírez (2004) donde explica que la menor temperatura se ubica en la parte superior de la bóveda. Esto sucede porque el calor del horno se transfiere de la parte inferior del horno hasta la parte superior por diferencias de densidad. Medir la temperatura interna y externa del hogar nos permite conocer la relación del calentamiento del hogar y las condiciones ambientales que intervienen en el proceso.

La temperatura exterior del horno representa el calor perdido en las paredes de la bóveda. Según Auces y Rodríguez 2003 siempre se va a detectar una temperatura en el exterior de la bóveda, debido al balance de calor que se produce en el horno, es decir que el total de calor producido en el hogar es igual al calor perdido en la chimenea, en las aberturas y en las paredes. La pérdida de calor por las paredes se da por la transferencia y conducción de gases generados en la combustión (Mazón, 2010). Esto se refleja en los resultados de la temperatura exterior del horno, al ser poca la pérdida de energía, el horno aumenta su eficiencia.

La cantidad de leña que se suministra para la cocción de los biofiltros va a depender de la cantidad del proceso de combustión, la capacidad de la leña en transformar la energía química en térmica (Sánchez, 2007), y del tipo y cantidad de arcilla. Por ejemplo, si se adiciona carbonato de calcio, se requiere de una temperatura de 900 °C, por ende, el tiempo de cocción disminuye, y al disminuir el tiempo de cocción, se usa menos leña (Betancour *et al.*, 2007).

La humedad de la madera generó desviaciones en la cantidad de leña en el calor útil que se genera en la combustión (Zárate, 2016). El contenido de agua en la leña va a depender de la composición química de la madera. La celulosa cumple la función de absorber y retener la humedad, mientras que la lignina le da la dureza a la madera (Mir, 2011).

La construcción del horno artesanal construido en el CIDER tiene un costo de USD 3908.21, este costo es inferior al costo del horno eléctrico Nobertherm HF1626QNA de Fisher Scientific. El costo de este equipo es de USD 63 173 y tiene la capacidad de 160 L, con medidas de largo de 1,25 m x 1,40 m de ancho y 2,10 m de alto. La temperatura máxima del horno es de 1600 °C. El horno está hecho por ladrillos refractarios y por un aislamiento especial. También cuenta con un medidor de temperatura, el cual está incorporado en el sistema y cuenta con un software que permite programar la cantidad de horas y la temperatura deseada. Con el costo de un horno eléctrico se puede construir 16 hornos artesanales de doble cámara. Para personas que viven en Costa Rica o Perú, van a necesitar de un préstamo adicional, sin embargo, el costo es accesible para un grupo de personas de una comunidad, MYPE y ONGs. Un factor importante que sube el costo de producción es el costo de mano de obra, la cual incluye 127 horas de dos personas sin experiencia en construcción de hornos, este valor disminuye si lo realiza una persona con experiencia y con el conocimiento en construcción de hornos.

6 Conclusiones

Durante el diseño del horno, las dimensiones de las diferentes partes del horno: base, cenicero, hogar, bóveda, chimenea, la puerta, las placas refractarias y el recubrimiento; son importantes para la transferencia de energía térmica y para el movimiento de los gases en el horno. Se concluye que el diseño del horno de doble cámara modificado, es factible y permite aumentar la eficiencia del horno.

Durante el proceso de construcción se usó los materiales apropiados como los bloques de cemento, cemento hidráulico, las varillas de metal, concreto, ladrillos y cemento refractario, arcilla, vidrio molido, que permitieron que haya la suficiente transferencia de calor entre el hogar y la bóveda. La eficiencia del horno se relaciona con el tipo de materiales usados con la construcción y con la evaluación de la temperatura durante el proceso de cocción de los biofiltros.

El ascenso de la temperatura interior de la bóveda nos demuestra que el horno cumple con la función de cocción de los biofiltros. Con esto se concluye que existe una transferencia de energía entre el hogar y la bóveda del horno. Además, el flujo de los gases producidos en el hogar por la combustión de la madera, se traslada a la bóveda y se desplaza por la chimenea hacia al ambiente. Este movimiento de gases es el que permite que la temperatura interna del horno aumente durante el proceso.

Los resultados de la temperatura exterior, nos permite concluir que hay una baja transferencia de energía entre el interior y el exterior del horno. Con esto se infiere que hay una menor pérdida de calor en la parte superior e inferior de la bóveda, mientras que en la parte céntrica hay una mayor pérdida debido a que la puerta metálica se transfiere fácilmente la energía interna de la bóveda al exterior del horno.

Con la evaluación de la cantidad de leña, se concluye que un horno artesanal de doble cámara permite aprovechar al máximo el calor producido durante la combustión de la madera hasta convertirse en ceniza. La cantidad de leña usada durante el proceso de cocción cumple con la función de transferir la energía suficiente para que el horno llegue a la temperatura ideal de los 950 °C.

Durante las pruebas de eficiencia, la humedad de la madera altera la eficiencia del horno, debido a que los resultados nos mostraron que si la madera tiene un 20 % de humedad se requiere de media hora de precalentamiento. Mientras que una madera que contiene menos del 10 % de humedad el encendido del horno se realiza de manera inmediata.

En países como Perú y Costa Rica el costo de un horno de doble cámara no es accesible para las personas de las zonas rurales, sin embargo, el costo es accesible para PYMES y ONGs que apoyen a estas comunidades para la fabricación de biofiltros de arcilla, y de esta manera puedan obtener un agua de mejor calidad.

7 Referencias bibliográficas

- Amado, J.; Villafrades, M. y Tuta, C. 2011. Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de Barichara, Santander. *Dyna*, vol. 78, no. 167, p. 50-58.
- Auces, E. y Rodríguez, J. 2003. Cálculo de las necesidades de energía en un horno de relevo de esfuerzos. *Ciencia e Ingeniería*, vol. 24, no 3, p. 3-6.
- Betancourt, D.; Martirena, F.; Day, R. y Diaz, Y. 2007. Influencia de la adición de carbonato de calcio en la eficiencia energética de la producción de ladrillos de cerámica roja. *Revista ingeniería de construcción*, vol. 22, no 3, p. 187-196.
- Birabén, B.; Fernández, M. y Gómez, M. 2014. El horno de ESTEPA: Calor sin leña. In *Construcción con tierra, patrimonio y vivienda: Congreso de Arquitectura de Tierra en Cuenca de Campos*. 1a ed. Valladolid (ES): Grupo Terra. 377p. ISBN 978-84-617-0473-6.
- Coronell, G. y Araujo, A. 2015. Superficies esféricas en los hornos artesanales de carbón y educación geométrica. *RECME-Revista Colombiana de Matemática Educativa*, vol. 1, no. 1, p. 147-153.
- Di Rienzo, JA.; Casanoves, F.; Balzarini, MG.; González, L.; Tablada, M. y Robledo, CW. 2018. *InfoStat: software estadístico* [programa de cómputo]. Versión 2018. Córdoba (AR): Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Grupo InfoStat. Disponible para descarga en el *World Wide Web*: <<http://www.infostat.com.ar>>.
- Frías, B. 2016. *Membranas cerámicas a base de arcilla-perlita-hierro para la remoción de As (III) del agua*. [Tesis Msc. Ciencias en Sistemas Ambientales]. Monterrey Nuevo León (MX): Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias. 69p.
- Foglia, RC. 2005. Conceptos básicos sobre el secado de la madera. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 2, no. 5, p. 88-92.
- García, C. 2013. *Evaluación de la calidad de ladrillos artesanales king Kong según prácticas de fabricación en el sector fila alta de la ciudad de Jaén*. [Tesis Ing. Civil]. Cajamarca (PER): Universidad Nacional de Cajamarca, Facultad de Ingeniería. 115p.
- García, G. y Pañi, L. 2013. *Optimización de la eficiencia energética de la leña (Eucalyptus Globulus) como combustible en un modelo de horno de ladrillo artesanal, a través del análisis y modificación de las características del combustible* [Tesis Ing. Civil]. Cuenca (EC): Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca. 171p.
- Gómez, R. 2007. *Determinación del perfil de temperatura de un horno muffle, mediante comsol* [Tesis Lic. Sistemas Computacionales]. Hidalgo (MX): Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingenierías. 91p.
- Gómez, G.; Carreazo, M. y Camperosc, J. 2015. Desarrollo de instrumento virtual enfocado en la adquisición de datos para generar perfiles de temperatura en hornos. *Revista Ingenio Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña*, vol. 8, no. 1, p. 47-58.
- González, W. 2018. *Construcción y caracterización de estufa con sistema de microgasificación*. [Tesis Maestro en ciencias de la medición en energías renovables y eficiencia energética]. Lima (PER): Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ciencias. 175p.
- Google Earth [programa de información geográfica]. 2019. *Universidad EARTH* [consultado 1 febrero 2019]. 31 marzo 2018. 10°11'07" N y 83°34'05" O a 10°14'05" N y 83°36'40" O. 31 m a 83 m.

- Guerrero, G.; Espinel, E.; Acevedo, S. y Guillermo, H. 2017. Análisis de temperaturas durante la cocción de ladrillos macizos y sus propiedades finales. *Tecnura*, vol. 21, no. 51, p. 118-131.
- Heinrich, A. y Hernandez, M. 2003. *Leña: una fuente energética renovable para Chile*. 1a ed. Santiago (CL): Editorial Universitari. 171p. ISBN 9789561116887
- Hernández, JDA. 2010. Estufas mejoradas y bancos de leña: una alternativa de autoabastecimiento energético a nivel de finca para comunidades dependientes de los bosques de roble de la cordillera Oriental. *Colombia forestal*, vol. 13, no. 2, p. 245-256.
- Huerta, Á. 2007. *Cerámica: origen, evolución y técnicas* [pdf]. 48 p. [consultado el 27 febrero 2018]. Disponible en el *World Wide Web*: <<https://www.yumpu.com/es/document/read/28246813/ceramica-origen-evolucion-y-tecnicas-universitat-per-a-majors>>
- ICAITI (Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial), 1984. *Manual para la construcción y operación, horno para carbón vegetal*. 1a ed. Guatemala (GT): 47 p.
- Kunst, C.; Ledesma, R.; Bravo, S.; Defossé, G.; Godoy, J. y Navarrete, V. 2014. Dinámica de la humedad de los combustibles y su relación con la ecología y manejo de fuego, region chaqueña occidental (Argentina) II: follaje y residuos de árboles y arbustos. *RIA, Revista de Investigaciones Agropecuarias*, vol. 40, no. 2, p. 165-181.
- Malla, P. 2015. *Proyecto de factibilidad para la implementación de una empresa productora y comercializadora de pan tradicional en horno de barro para el cantón Celica, provincia de Loja*. [Tesis Ing. Comercial]. Loja (EC): Universidad Nacional de Loja, Área Jurídica, social y administrativa. 149p.
- Martinez, R. 2014. *Modelado, simulación y desarrollo de un análisis de eficiencia energética en un horno ladrillero tipo bóveda en condiciones de estado estacionario* [Tesis Ing. Mecánico]. Pereira (CO): Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Mecánica. 80 p.
- Mazón, G. 2010. *Rehabilitación de un horno a gas para cerámica*. [Tesis Ing. Mecánico]. Riobamba (EC): Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica. 120p.
- Mendoza, M. 2002. Modelación del proceso de postcombustión en un horno de reducción de níquel. *Revista de metalurgia*, vol. 38, no 2, p. 150-157.
- Mir, D. 2011. *Diseño, fabricación y evaluación de la eficiencia de una estufa ahorradora de leña Arreguy, Haití* [en línea]. [Proyecto de Graduación Msc. en Liderazgo y Gerencia Ambiental]. Costa Rica: UCI (Universidad para la Cooperación Internacional).55p. [consultado 07 noviembre 2019]. Disponible para descargar en el *World Wide Web*:<<http://www.uci.ac.cr/Biblioteca/Tesis/PFGMLGA21.pdf>>
- Muñoz, V.; Rohr, G.; Tomba, A. y Cavalieri, A. 2011. Aspectos experimentales de la determinación de las curvas esfuerzo deformación a alta temperatura y en atmosfera controlada: Refractarios Al₂O₃-MgO-C. *Sociedad Española de Cerámica*, vol. 50, no 3, p. 125-134.
- Noguera, MY. y de Parra, HR. 2008. ¿Cómo determinar costos en la industria de la construcción? Estudio de un caso. Parte II: Líneas maestras para la acumulación y determinación de los costos de producción. *Visión Gerencial*, no. 1, p. 126-144.
- Ots, MJ.; Carosio, S. y Bárcena, RJ. 2013. Caracterización arqueométrica y tecnología de producción de ceramica vidriada de mendoza/archaeometric and technological characterization of glazed pottery from mendoza province. *Revista de Arqueología Histórica Argentina y Latinoamericana*, vol. 7, p. 131-158.
- Peñafiel, P. 2015. *El horno tradicional del pan en la memoria de la sociedad cuencana: desde sus orígenes hasta la actualidad*. [Tesis Lic. Ciencias de la Educación] Cuenca (EC): Universidad de Cuenca, Facultad de Filosofía, Letras y Ciencias de la Educación. 129p.

- Pillajo, B. y Romero, I. 2016. *Diseño y construcción de un horno calentado por resistencias eléctricas que trabaje en un rango de temperaturas entre 1000 a 1350 grados centígrados y controlado por un sistema computarizado*. [Tesis Ing. Mecánico] Quito (EC): Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Mecánica. 220p.
- Ramírez, R.; Nava, D.; Alvarez, M.; Lagunas, M. y Lescas, A. 2004. Perfiles de temperatura en un horno ladrillero. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 3, no. 2, p. 209-217.
- Rendtorff, N.; Garrido, LB. y Aglietti, EF. 2007. Choque térmico de materiales refractarios: comportamiento, evaluación y ensayos. *Cerámica y Cristal*, vol. 139, p. 177-181.
- Sánchez, C., 2007. Teoría de la Combustión. [en línea]. Madrid (ES): UNED.472p. [consultado 07 noviembre 2019]. Disponible en el *World Wide Web*: <https://books.google.co.cr/books?id=tq45oq-Ui0QC&pg=PA28&dq=la+combustion&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj77cqawN_dAhVL21MK#v=onepage&q=la%20combustion&f=false>
- Selva, G. 1997. *Bread oven*. Estados Unidos. U.S. Patent No. 4,095,586. 20 junio 1978. Washington, DC (US): Patent and Trademark Office.
- Solano Coghi, G. 2013. *La purificación del agua a través de un filtro cerámico: rescate de una costumbre olvidada* [en línea] [Proyecto de Graduación Lic. BB. AA.] San José (CR): Universidad de Costa Rica, Escuela de Artes Plásticas. 56 p. [consultado 12 septiembre 2019]. Disponible en el *World Wide Web*: <<http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/2038/1/35215.pdf>>.
- Sotalin, D. 2018. *Estudio de la influencia de los parámetros operativos sobre las emisiones de un horno para materiales cerámicos*. [Tesis Ing. Químico] Quito (EC): Escuela Politécnica, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria. 125p.
- Trujillo, SA. 2005. *Diseño y construcción de un horno de crisol para fundición utilizando gas natural* [Tesis Bach. Ing. Mec.]. Quito (EC): Universidad San Francisco de Quito, Colegio Politécnico. 68 p.
- Uche, J. y Marin, J. 2001. Simulación y optimización de un horno cerámico monocapa. *Sociedad Española De Ceramica Y Vidrio*, vol. 40, no 5, p. 377-384.
- UNICEF (United Nations Children's Emergency Fund). *Agua, saneamiento e higiene: enfermedades comunes relacionadas con el agua y el saneamiento* [sitio de Internet] [consultado 12 septiembre 2019]. Disponible en el *World Wide Web*: <https://www.unicef.org/spanish/wash/index_wes_related.html>.
- Universidad EARTH. 2018. *Base de datos climáticos* [documento en Excel]. Guácimo (CR). Actualizado mensualmente.
- Urgilés, R. 2019. *Desarrollo de un manual de manejo de un horno de barro y su uso en preparaciones culinarias*. [Tesis Lic. en Gastronomía y servicios de alimentos y bebidas]. Cuenca (EC): Universidad de Cuenca, Facultad de Ciencias de la Hospitalidad. 120p.
- Zárate, J. 2016. La madera como combustible. *Revista Forestal del Perú*, Vol. 14, no 2.

8 Anexos

8.1 Anexo 1 Resultados de la Eficiencia del Horno

Cuadro 1. Resultados de las temperaturas en el interior de la bóveda

Partes de la bóveda	Temperatura						
	Inicial	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas	5 horas	6 horas
----- °C -----							
Superior (R1)	36,00	253,80	384,60	556,70	664,70	859,10	892,40
Superior (R2)	27,00	236,20	394,60	584,30	731,60	873,10	970,10
Superior (R3)	26,80	201,20	239,40	579,20	740,50	878,50	945,70
Céntrica (R1)	38,00	265,40	395,20	574,20	698,60	872,60	910,00
Céntrica (R2)	27,00	254,30	408,70	609,50	742,10	896,70	974,40
Céntrica (R3)	26,30	223,50	416,50	560,60	738,10	879,40	968,50
Inferior (R1)	40,00	271,60	413,90	609,50	719,20	887,40	963,00
Inferior (R2)	27,10	198,90	429,30	613,80	773,10	909,50	998,90
Inferior (R3)	26,10	242,10	432,70	595,80	787,50	881,90	981,10

R1: Repetición uno R2: Repetición dos R 3: repetición tres

Cuadro 2. Resultado de las temperaturas en el exterior del horno

Partes de la bóveda	Temperatura						
	Inicial	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas	5 horas	6 horas
----- °C -----							
Superior (R1)	36,00	38,90	48,60	58,40	65,30	67,30	72,80
Superior (R2)	27,10	28,70	32,40	46,70	61,20	70,10	83,80
Superior (R3)	25,70	31,20	33,80	44,80	49,60	58,70	69,60
Céntrica (R1)	37,00	47,60	67,90	85,60	106,40	138,20	165,90
Céntrica (R2)	28,90	58,10	75,70	134,20	169,40	174,40	175,20
Céntrica (R3)	25,80	46,10	79,10	91,00	152,10	177,50	181,90
Inferior (R1)	40,00	43,90	59,70	62,50	69,80	66,10	76,70

Construcción de un Horno Artesanal para la Cocción de Biofiltros de Arcila

Partes de la bóveda	Temperatura						
	Inicial	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas	5 horas	6 horas
	----- °C -----						
Inferior (R2)	27,70	29,60	31,60	49,30	79,70	87,30	94,50
Inferior (R3)	25,80	30,80	34,60	45,20	54,50	63,80	81,90

Cuadro 3. Diseño experimental de las biomásas usadas para el horno

Cantidad de leña	Masa (Kg)					
	1 hora	2 horas	3 horas	4 horas	5 horas	6 horas
Repetición 1	14,70	9,80	10,40	10,50	9,50	5,20
Repetición 2	18,60	10,40	11,50	11,10	10,20	7,60
Repetición 3	15,40	10,80	9,60	10,20	11,50	6,10
Promedio	16,23	10,33	10,50	10,60	10,40	6,30

Cuadro 4. Contenido de humedad de la leña

Cantidad de leña	Humedad		
	Día 1	Día 2	Día 3
	----- % -----		
Muestra 1	4,92	26,95	13,61
Muestra 2	4,01	17,31	16,96
Muestra 3	4,49	32,17	26,33
Promedio	4,47	25,48	18,96

8.2 Anexo 2 Desglose de los costos de las partes del horno

Cuadro 5. Costos de la base del horno

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo por unidad	Costo total
			en USD	en USD
Cemento	3	Bolsa	10.00	30.00
Arena	2	m3	27.4	54.80
Piedra cuartilla	2	m3	27.4	54.80
Varillas de metal	2	und.	3.07	6.14
Mano de obra	12	hora	4.30	51.60
Bloques de construcción	28	Unidad	0.59	16.52

Cuadro 6. Costo del cenicero y el hogar del horno

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo por unidad	Costo total
			en USD	en USD
Cemento	6	Bolsa	10.00	60.00
Arena	3	m3	27.40	82.20
Piedra molida	4	m3	27.40	109.60
Bloques de construcción	19	Und.	0.59	11.21
Vidrio molido	25	Kg	3.50	87.50
Varillas de metal	5	unidad	3.07	15.35
Mano de obra	14	hora	4.30	60.20
Molde de madera 0	1	unidad	18.40	18.40

Cuadro 7. Costos de la bóveda

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo por unidad	Costo total
			en USD	en USD
Cemento refractario	5,7	Bolsa (25 kg)	25.00	142.50
Cemento	2	Bolsa (50 kg)	10.00	20.00
Ladrillos refractarios	338	Unidad	2.30	777.40
Molde de madera 1	1	Unidad	61.80	61.80
Mano de obra	40	hora	4.30	172.00

Cuadro 8. Costos de la chimenea

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo por unidad	Costo total
			en USD	en USD
Cemento refractario	0,5	Bolsa (25 kg)	25.00	12.50
Ladrillos refractarios	26	Unidad	2.30	59.80
Mano de obra	11	Hora	4.30	47.30
Chimenea de metal	1	Unidad	19.40	19.40

Cuadro 9. Costo de la puerta del horno

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo por unidad	Costo total
			en USD	en USD
Recta angular	2	Unidad	20.00	40.00
Plancha de metal	0,2	Unidad	129.90	25.98
Ladrillos refractarios	3	Unidad	2.30	6.90
Cemento refractario	0,3	Bolsa (25 kg)	25.00	7.50

Construcción de un Horno Artesanal para la Cocción de Biofiltros de Arcilla

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo por unidad	Costo total
			en USD	en USD
Sairset	0,2	Balde (50kg)	45.30	9.06
Mano de obra extra	4	Hora	6.40	25.60
Mano de obra	3	Hora	4.30	12.90

Cuadro 10. Costo de las placas refractarias

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo por unidad	Costo total
			en USD	en USD
Ladrillo refractario	8	Unidad	2.30	18.40
Saircen	1,5	Balde (50kg)	45.30	67.95
Molde de madera 2	1	Unidad	14.40	14.40
Mano de obra	6	Hora	4.30	25.80

Cuadro 11. Costo de la parrilla

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo por unidad	Costo total
			en USD	en USD
Varillas de metal	7	Unidad	3.07	21.49
Saircen	0,1	Balde (50 kg)	45.30	4.53
Mano de obra	4	Hora	6.40	25.60

Cuadro 12. Costo del recubrimiento

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo por unidad	Costo total
			en USD	en USD
Arcilla	6	saco	5.00	30.00
Vidrio molido	15	kilogramo	3.50	52.50
Cemento	4	saco	10.00	40.00
Aserrín	2	saco	2.00	4.00
Cemento refractario	0,5	saco	25.00	12.50
Cal	1	saco	13.50	13.50
Mano de obra	18	hora	4.30	77.40
Ladrillo refractario	10	Unidad	2.30	23.00
Piedra cuartilla	1	m3	27.40	27.40

Cuadro 13. Costo del techo

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo por unidad	Costo total
			En USD	en USD
Tubo de hierro	5	Unidad	7.50	37.50
Platina de metal	4	Unidad	34.30	137.20
Cemento	1	Saco (50Kg)	10.00	10.00
Arena	1	m3	27.40	27.40
Piedra molida	1	m3	27.40	27.40
Piedra	0,5	m3	27.40	13.70
Mano de obra	15	hora	4.30	64.50

Cuadro 14. Costo de los equipos

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo por unidad	Costo total
			en USD	en USD
Termocupla	1	Unidad	96.90	96.90
Termómetro	1	unidad	296.50	296.50
Balanza	1	Unidad	80.00	80.00
Cronómetro	1	Unidad	30.90	30.90

Cuadro 15. Costo de los análisis

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo por unidad	Costo total
			en USD	en USD
Análisis de humedad	9	Análisis	3.50	31.50
Análisis de CO	3	Análisis	17.20	51.60

Cuadro 16. Costos extras

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo por unidad	Costo total
			en USD	en USD
Transporte	238,9	Km	0.56	133.78
Leña	300	Kg	0.42	126.00