

## DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN EQUIPO TIPO BAÚL PARA DESINFECCIÓN DE SUSTRATOS AGRÍCOLAS CON CALOR\*

### DESIGN, CONSTRUCTION AND EVALUATION OF TRUNK TYPE EQUIPMENT FOR AGRICULTURE SUSTRATE DISINFECTION WITH HEAT

Noel Chávez-Aguilera<sup>1§</sup>, Eugenio Romantchik-Kriuchkova<sup>1</sup>, Carlos Gracia-López<sup>2</sup>, Marcelo Acosta Ramos<sup>3</sup> y Enrique López-Romero<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5. Texcoco, Estado de México. C. P. 56230. Tel. 01 595 9521681. (eugenior@correo.chapingo.mx). <sup>2</sup>Departamento de Mecanización y Tecnología Agraria. Universidad Politécnica de Valencia. Camino a Vera s/n. C. P. 46022. Valencia, España. Tel. +34 96 3877290. Int. 72901. (depmag@mag.upv.es). <sup>3</sup>Departamento de Parasitología Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5. Texcoco, Estado de México. C. P. 56230. Tel. 01 595 9511500. Ext. 6272 (acostam14@gmail.com). <sup>§</sup>Autor para correspondencia: noelcha1@yahoo.com.mx.

#### RESUMEN

El objetivo de este estudio fue diseñar, construir y evaluar un equipo tipo baúl para desinfección en estático de sustratos agrícolas mediante aplicación de calor, a través de aire caliente y con vapor de agua aireado. La investigación se realizó en 2005 en los talleres y laboratorios de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México. El diseño experimental utilizado fue factorial 2\*2\*3, el primer factor fue la fuente y medio de transferencia de calor: 1) resistencia eléctrica y aire caliente; y 2) combustión de diesel y vapor de agua aireado; el segundo, contenido de humedad del sustrato: 75 y 61%; el tercer factor fue tiempo de desinfección: 15, 30 y 45 min. Las variables respuesta fueron: tiempo para alcanzar la temperatura mínima deseada, rango de temperatura durante la desinfección, eficiencia de desinfección de *Fusarium oxisporum culmorum* y costo específico de energía. La desinfección con aire caliente mostró los mayores valores en tiempo para alcanzar la temperatura mínima deseada, rango de temperatura, eficiencia de desinfección y costo específico de energía, en comparación con vapor de agua aireado.

**Palabras clave:** agricultura protegida, métodos físicos, pasteurización de sustratos, tecnología.

#### ABSTRACT

The objective of this study was the design, construction and evaluation of equipment for in static disinfection of agricultural substrates by applying heat from hot air and aerated steam sources. The research was conducted in 2005 at the workshops and laboratories of the Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, State of Mexico, Mexico. A factorial 2\*2\*3 experimental design was utilized, the first factor was the source and means of heat transfer: 1) electrical resistance and hot air and 2) combustion of diesel and aerated steam, the second factor was substrate moisture content: 75 and 61% and disinfection time: 15, 30 and 45 min. The studied variables were: time to reach the desired temperature, temperature range during disinfection, disinfection efficiency of *Fusarium oxisporum culmorum*, specific energy cost. Disinfection with hot air showed higher

\* Recibido: mayo de 2009  
Aceptado: enero de 2010

values of time to reach the desired temperature, temperature range, disinfection efficiency and specific energy cost than with aerated steam.

**Key words:** pasteurization of substrates, physical methods, protected agriculture, technology.

## INTRODUCCIÓN

En cualquier invernadero los patógenos del suelo o sustrato ingresan con el polvo arrastrado por el aire, adheridos a la maquinaria empleada para preparar el sustrato y al calzado del personal que labora dentro. Otra importante fuente de contaminación puede ser el agua de riego. Aunado a lo anterior, las poblaciones de patógenos tienden a incrementarse rápidamente cuando el sustrato no es renovado ni recibe algún tratamiento de desinfección. La esterilización parcial de los sustratos de cultivo es un procedimiento fundamental en la producción de plántulas, cultivos hortícolas y florales en ambiente protegido, ya que un sustrato libre de patógenos, insectos y semillas de maleza es una condición necesaria para que la plántula o cultivo se desarrolle con éxito (Burés, 1997; Alpi y Tognoni, 1999).

Para eliminar las enfermedades del suelo y de los sustratos, frecuentemente se utiliza el término esterilización; sin embargo, el término exacto es esterilización parcial o pasteurización. La esterilización implica que el medio de crecimiento esté completamente estéril; lo cual puede causar problemas de nutrición del cultivo, en cambio en la pasteurización el proceso de calentamiento no elimina todos los microorganismos; es decir, sólo elimina los agentes patógenos del suelo o sustrato sin perjudicar la actividad de los organismos benéficos (Walls, 1992; Boodley, 1998; Nelson, 1998; Zuzqueva, 2000).

Los procedimientos empleados para la desinfección del suelo y de los sustratos en campo abierto y en invernadero son: métodos físicos que utilizan calor y microondas y químicos en los que se emplean productos fumigantes. Entre los métodos físicos utilizados con mayor frecuencia se encuentran el vapor de agua, vapor de agua aireado y solarización, el equipo empleado para cada uno varía de acuerdo a la naturaleza de cada método (Gracia y Martín-Portugués, 1983; Runia, 1983; Ortiz-Cañavate, 1987; Worf, 1990; Walls, 1992; Carrero, 1996; Burés, 1997; Boodley, 1998; Jarvis, 1998; Nelson, 1998; Runia 2000; Pizano, 2001).

Entre los factores que influyen el proceso de desinfección de los suelos y sustratos agrícolas se encuentran el contenido de humedad, temperatura letal para los patógenos y tiempo de exposición. Se ha reportado que el mejor contenido de humedad en el suelo o el sustrato para ser pasteurizado es el nivel de humedad adecuado para el cultivo; es decir, cerca de capacidad de campo (Bartok, 1994; Nelson, 1998). La temperatura para eliminar patógenos del suelo y semilla de maleza depende del punto de muerte térmica, la cual a la vez depende del tiempo de aplicación de calor (Hudson *et al.*, 1990; Langhans, 1990; Bartok, 1994; Burés, 1997; Boodley, 1998; Jarvis 1998). Para erradicar patógenos de sustratos agrícolas se recomienda mantener la temperatura a 70 °C (Runia, 1983; Runia, 2000; EPA, 2002), 71 °C (Nelson, 1998) por 30 min; asimismo, se ha determinado por experiencia empírica que 84 °C (Boodley, 1998), 82 °C (French y Hebert, 1997), 80 °C (Langhans, 1990) es suficiente para eliminar la mayoría de los patógenos y entre 85 y 100 °C para erradicar virus (Runia, 2000), también se pueden obtener buenos resultados entre 71-82 °C (Bartok, 1994). Estos autores recomiendan 30 min de exposición. Para la producción y transferencia de calor, comúnmente se usan las siguientes dos fuentes:

### Resistencia eléctrica y aire caliente

El calor que genera una resistencia eléctrica se basa en la Ley de Ohm. La potencia del sistema de calentamiento, el valor de resistencia necesaria y el gasto del ventilador se calculan con base en la cantidad de calor requerido (Eaton, 1981; Langhans, 1990).

### Combustión y vapor de agua aireado

El vapor de agua se produce en una caldera y se libera de ella bajo ligera presión (33.77 a 101.32 Pa). La tasa de inyección del vapor de agua no debe exceder la tasa de condensación, la cual es 87.963 kg h<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> de superficie del medio expuesta, cuando ocurre esta condición, el vapor no fluye hacia el exterior del sustrato. Al mezclar aire con el vapor de agua, la temperatura de la mezcla se reduce de 100 °C a temperaturas más bajas pero sin condensación del vapor. La temperatura exacta del vapor de agua aireado depende de la temperatura del aire, humedad relativa y temperatura del vapor de agua saturado (Bartok, 1994). La mezcla aire-vapor está en función de la temperatura que se fija para el tratamiento (Alpi y Tognoni, 1999); por ejemplo, para obtener una mezcla de aire y vapor a 70 °C, se deben mezclar 3.5 kg de aire con 1 kg de vapor de agua a 100 °C. Por otro lado, la capacidad

del ventilador se determina de acuerdo con la cantidad de aire que debe moverse para mantener la presión estática de 49.85 a 62.31 mbar (Bartok, 1994, Boodley, 1998).

### Cálculo de la cantidad de calor y de vapor de agua

Bajo la premisa de que el suelo o sustrato se encuentra a temperatura ambiente es necesario incrementar esa temperatura. La cantidad de calor requerido para elevar la temperatura inicial a la deseada se calcula con la ecuación 1.

$$Q_r = (C_p^*) (\Delta T) \quad (1)$$

Donde:  $Q_r$  = cantidad de calor requerida para incrementar la temperatura inicial a la deseada del suelo o sustrato, ( $\text{kJ m}^{-3}$  o  $\text{kJ kg}^{-1}$ );  $C_p^*$  = calor específico, ( $\text{kJ m}^{-3}$  o  $\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) y  $\Delta T$  = incremento de temperatura, ( $^\circ\text{C}$ ).

El calor específico por unidad de volumen o de masa de un suelo o de un sustrato resulta de la suma de los calores específicos de los materiales constituyentes y se puede calcular empleando la ecuación 2 y 3 (Langhans, 1990; Burés, 1997).

$$C_v^* = \sum_{i=1}^n (x_i) (C_{vi}^*) \quad (2)$$

Donde:  $C_v^*$  = calor específico volumétrico del suelo o sustrato, ( $\text{kJ m}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $x_i$  = cantidad relativa de cada material constituyente, (adimensional);  $C_{vi}^*$  = calor específico volumétrico de cada material constituyente, ( $\text{kJ m}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $n$  = número total de materiales constituyentes.

$$C_p^* = \sum_{i=1}^n (x_i) (C_{pi}^*) \left( \frac{1}{\rho_b} \right) (4.1868) \quad (3)$$

Donde:  $C_p^*$  = calor específico por unidad de masa del suelo o sustrato, ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $x_i$  = cantidad relativa de cada material constituyente, (adimensional);  $C_{pi}^*$  = calor específico por unidad de masa de cada material constituyente, ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $\rho_b$  = densidad aparente del suelo o sustrato, ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

La cantidad de vapor de agua requerida por el suelo o el sustrato, para incrementar la temperatura inicial a la temperatura deseada de un metro cúbico de material se calcula con la ecuación 4.

$$Q_{vr} = \frac{Q_r}{Q_{va}} \quad (4)$$

Donde:  $Q_{vr}$  = cantidad de vapor requerido, ( $\text{kg}_{\text{vapor}} \text{ m}^{-3}_{\text{material}}$  o  $\text{kg}_{\text{vapor}} \text{ kg}^{-1}_{\text{material}}$ );  $Q_r$  = cantidad de calor requerido, ( $\text{kJ m}^{-3}_{\text{material}}$  ó  $\text{kJ kg}^{-1}_{\text{material}}$ );  $Q_{va}$  = calor de vaporización del agua, ( $\text{kJ m}^{-3}_{\text{vapor}}$  ó  $\text{kJ kg}^{-1}_{\text{vapor}}$ ).

La cantidad de vapor de agua requerida por cada desinfección se obtiene mediante la ecuación 5.

$$Q_{vrd} = (Q_{vr})(V) \quad (5)$$

Donde:  $Q_{vrd}$  = cantidad de vapor de agua requerida por cada desinfección, ( $\text{kg}_{\text{vapor}}$ );  $Q_{vr}$  = cantidad de vapor requerido, ( $\text{kg}_{\text{vapor}} \text{ m}^{-3}_{\text{material}}$  o  $\text{kg}_{\text{vapor}} \text{ kg}^{-1}_{\text{material}}$ );  $V$  = volumen a desinfectar, ( $\text{m}^3$ ).

El tiempo requerido para cambiar la temperatura inicial del sustrato a la temperatura deseada se obtiene mediante la ecuación 6.

$$t_{i-d} = \frac{Q_{vr}}{Q_{vc}} \quad (6)$$

Donde:  $t_{i-d}$  = tiempo requerido para cambiar la temperatura inicial del sustrato a la temperatura deseada, (h);  $Q_{vc}$  = cantidad de vapor generado por la caldera, ( $\text{kg}_{\text{vapor de agua}} \text{ h}^{-1}$ ). Se recomienda adicionar entre 10 y 20 minutos a los tiempos  $t_{i-d}$  obtenidos (Burés, 1997).

En la actualidad existe una gran diversidad de métodos físicos y químicos para la desinfección del suelo a campo abierto y de los sustratos agrícolas utilizados en invernadero. El equipo empleado para cada uno varía de acuerdo a la naturaleza del método. Cada uno de estos métodos presenta inconvenientes que limitan el uso generalizado; entre otros, los residuos contaminantes que producen, la baja eficiencia, rentabilidad o capacidad de trabajo. La tendencia actual en la desinfección de sustratos es utilizar equipos y métodos eficientes, de bajo costo y que no contaminen el medio ambiente; por ello, los equipos y métodos físicos son los más utilizados.

### Equipos, ventajas y desventajas

Los esterilizadores eléctricos utilizan una resistencia para generar el calor seco, necesario para desinfectar suelos o sustratos agrícolas (Pierce, 1977; USGR, 2004), tienen la desventaja de tratar pequeñas cantidades de material, requieren de periodos largos para la desinfección, no tienen la facilidad para controlar la temperatura y el costo de operación es alto.

Los sistemas de politubos perforados son un ejemplo de aplicación de calor con vapor de agua solamente (Bartok, 1994). Tienen como desventaja que el período de desinfección es de 6 a 8 h, la temperatura de desinfección es alta 85 a 100 °C lo que puede liberar elementos tóxicos para las plantas y el costo de operación es alto.

Entre los equipos utilizados para aplicar calor con vapor de agua aireado, se encuentra el equipo tipo remolque (USGR, 2004). Si se compara éste equipo con el que aplica sólo vapor, tienen como ventaja que el período para desinfección es más corto, la cantidad de vapor de agua que utiliza es menor, se controla mejor la temperatura y el costo es de 40 a 50% más bajo (Langhans, 1990).

#### Cuadro 1. Material y equipo utilizado.

Materiales	Concepto
Material de apoyo	
Taller	Torno, taladro, máquina eléctrica para soldar, herramientas
Laboratorio	Balanza digital, termómetros de mercurio, probetas graduadas, vasos de precipitados, microscopio electrónico, campana de flujo laminar
Sustrato	Mezcla compuesta por 1 parte de growing mix 1VM y 1 de vermiculita
Material de construcción	
Contenedores	Lámina galvanizada
Tubería para la conducción de aire y vapor de agua	Hierro dulce
Tubería para la conducción de vapor de agua	Acero galvanizado cédula 40
Válvula bola	Latón
Malla de alambre	Hierro galvanizado

#### Material biológico

El patógeno utilizado fue el hongo *Fusarium oxisporum culmorum*., proporcionado por el laboratorio de fitopatología del departamento de parasitología de la UACH. La cantidad de inóculo aplicado fue de 10 000 conidios por gramo de sustrato. La concentración de la solución aplicada fue de 1 000 000 de conidios por mL. Previo al tratamiento de desinfección, el sustrato se inoculó y mezcló en forma uniforme. Se consideró como testigo al sustrato inoculado sin tratamiento de desinfección.

#### Métodos y procedimientos utilizados

Los factores considerados en el proceso de diseño fueron: 1) fuente y medio de transferencia de calor: resistencia

Con base en lo expuesto anteriormente, el objetivo de este trabajo fue diseñar, construir y evaluar equipos para desinfección de suelos y sustratos agrícolas con aire caliente y con vapor de agua aireado, sencillos de construir y de bajo costo.

#### MATERIALES Y MÉTODOS

El equipo se construyó en el taller de maquinaria agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), durante 2005, bajo el diseño que se explica en el apartado de resultados. Los materiales y herramientas utilizados para la construcción y evaluación del equipo se clasificaron en dos conceptos básicos: material de apoyo y material de construcción y laboratorio (Cuadro 1).

eléctrica y volumen de aire para el equipo en la modalidad de aplicación de aire caliente y combustión (diesel) y vapor de agua aireado; 2) contenido de humedad (método gravimétrico) del sustrato (NH), 75.48 y 61.26% para aplicación de calor con aire caliente y 75.78 y 61.42% para aplicación de calor con vapor de agua aireado; y 3) tiempo de duración de la desinfección (Tef) 15, 30 y 45 min.

#### Evaluación

Las variables respuesta fueron: a) tiempo en el cual se alcanza la temperatura mínima deseada para la desinfección ( $T_{min}$ ); b) rango de temperatura sostenido durante la desinfección ( $T_{rango}$ ); c) eficiencia para erradicar el hongo *Fusarium oxisporum culmorum* y d) costo específico por consumo de energía.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Equipo tipo baúl con aplicación de calor mediante aire caliente

Las características técnicas del equipo diseñado y construido para la aplicación de calor con aire caliente fueron las siguientes: cavidad superior: ancho 300 mm, largo 500 mm y altura 2 500 mm. Cavidad inferior: ancho 300 mm, largo 500 mm y altura 150 mm. Camisa o chaqueta: ancho

340 mm, largo 540 mm y altura 420 mm. Material aislante: fibra de porcelana con un espesor de 25.4 mm. Tubería: diámetro 101.6 mm, con dos tramos de 500 mm cada uno, dos niples 95.25 con 40 mm de longitud; todos empotrados en el contenedor. Resistencia eléctrica: 1 600 W, 9 Ω, 900 mm de longitud en U y 2 mm de diámetro. Ventilador: 3 500 rpm, 186.42 W, gasto de 6.66 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>. Capacidad del equipo: 22.5 L. Tiempo de desinfección: 41 min. Capacidad de desinfección: 24.14 L h<sup>-1</sup>. Consumo de energía: 1 786.5 W (Figuras 1 y 2).

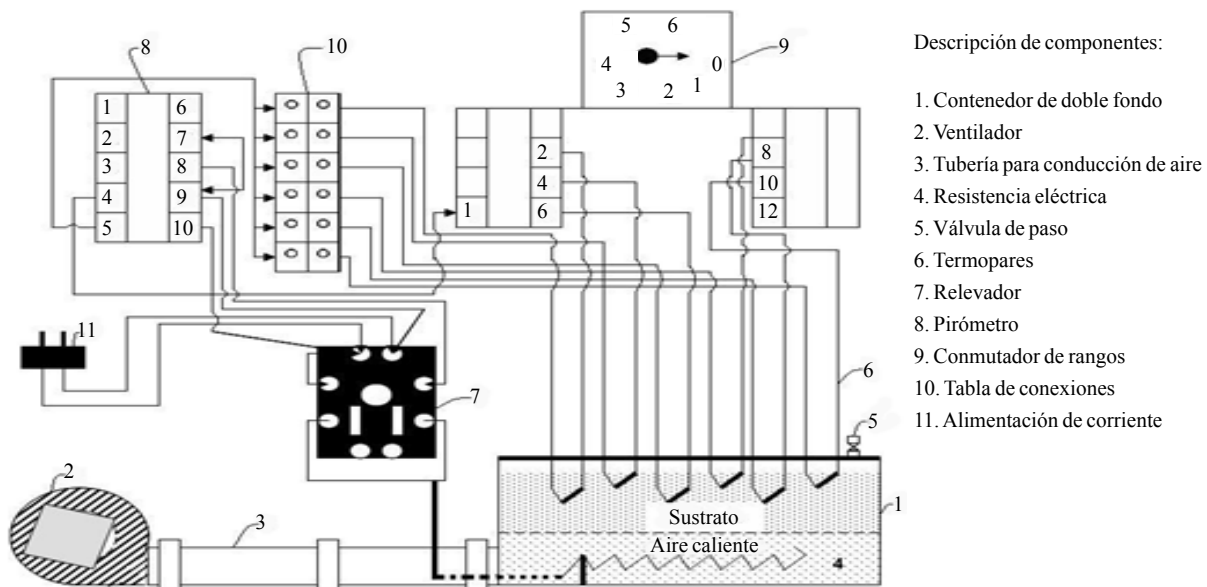
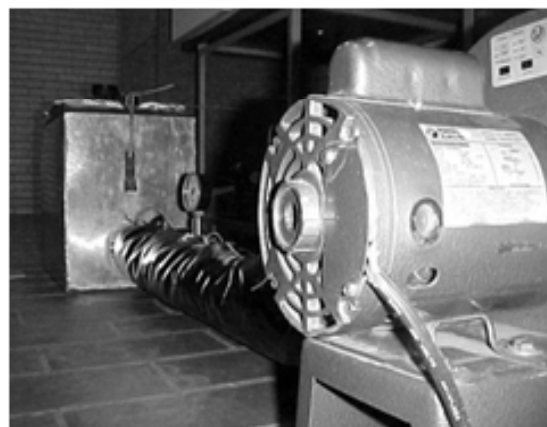


Figura 1. Componentes del equipo de desinfección con aplicación de calor a través de aire caliente.



Vista frontal



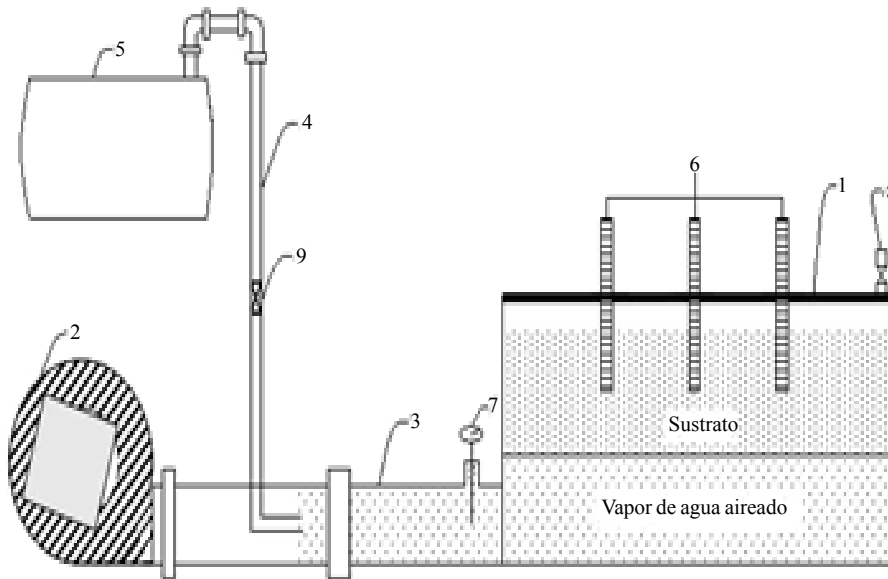
Vista posterior

Figura 2. Equipo tipo baúl con aplicación de calor a través de aire caliente.

**Equipo tipo baúl con aplicación de calor mediante vapor de agua aireado**

El equipo para la aplicación de calor por medio de vapor de agua aireado se construyó con las siguientes características: tubería para conducir el vapor de agua: diámetro 25.4 mm,

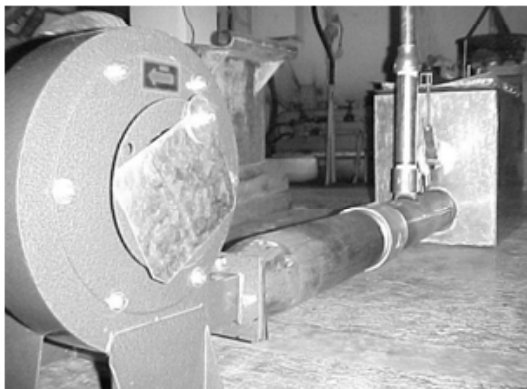
longitud total 5250 mm. Tubo galvanizado en L: diámetro 25.4 mm, base 50 mm y altura 100 mm. Dos codos de 90°. Válvula bola: diámetro 25.4 mm. Gasto de combustible diesel: 0.00031568 L s<sup>-1</sup>. Gasto de vapor de agua: 0.03221 L kg<sup>-1</sup> de vapor. Flujo de aire: 0.02933 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Relación aire-vapor: 3:1 (Figuras 3 y 4).



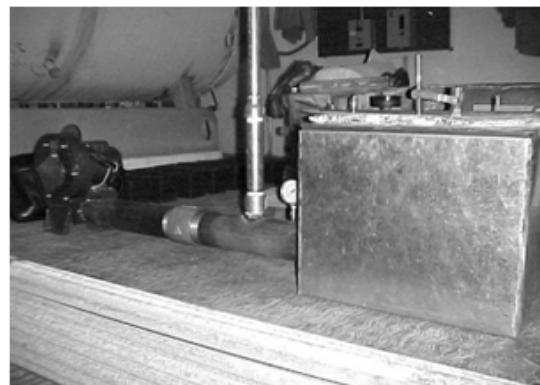
Descripción de componentes:

1. Contenedor de doble fondo
2. Ventilador
3. Tubería para conducción de la mezcla vapor de agua aireado
4. Tubería para conducción de vapor de agua
5. Caldera
6. Termómetros de mercurio
7. Termómetro bimetalico
8. Válvula para escape de gases
9. Válvula para control de vapor de agua

**Figura 3. Componentes del equipo de desinfección con vapor de agua aireado.**



Vista posterior



Vista lateral

**Figura 4. Equipo tipo baúl con aplicación de calor a través de agua aireado.**

**VARIABLES RESPUESTA**

El equipo para desinfección con aire caliente alcanzó la temperatura mínima deseada ( $T_{min}$ ) en 26 min en promedio y fue 7.4% mayor al nivel de humedad 75.48% que el de 61.29%. El Rango de temperatura sostenido ( $T_{rango}$ ) fue de 71-81.33 y de 71-80.66 °C, para los niveles de humedad de

75.78 y 61.42% respectivamente, estos resultados coinciden con los reportados por Langhans (1990), French y Hebert (1997), Boodley (1998) (Cuadro 3).

De igual manera  $T_{rango}$  fue 6.45% mayor al nivel alto (75.48%) de humedad en el sustrato que el nivel 61.29%. Para el nivel de humedad de 75.48%,  $T_{rango}$  fue mayor en el tiempo

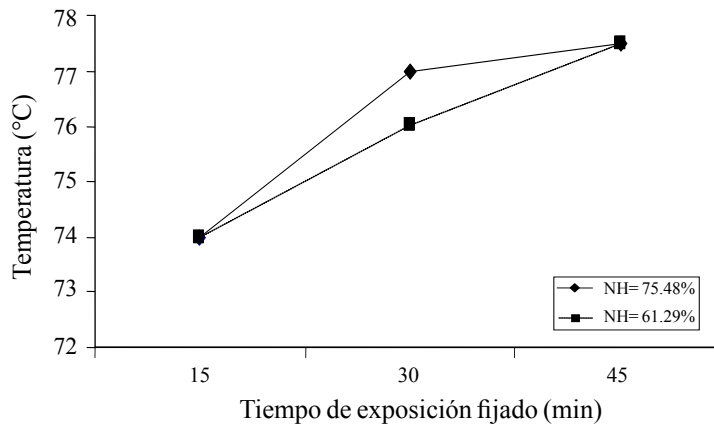
de exposición de 45 min 1.19 y 8.33% que en 30 y 15 min, respectivamente. Para el nivel de humedad de 61.29%,  $T_{\text{rango}}$  en el tiempo de exposición de 45 min fue mayor en 3.57 y 8.33% que en 30 y 15 min, respectivamente (Figura 5). Las unidades de crecimiento observadas, indican que el tratamiento en los dos niveles de humedad y en los tres tiempos de exposición erradicó completamente el hongo *Fusarium oxisporum culmorum*.

El costo específico de energía (CEE) fue  $\$3.40 \text{ kg}^{-1}_{\text{sustrato}}$  y fue 3.5% mayor en el nivel de humedad de 75.48% que en 61.29%. Para el nivel de humedad de 75.48% con 45 min de exposición, el CEE fue 20.83 y 14.66% mayor que en los tiempos de exposición de 30 y 15 min respectivamente. Para el nivel de humedad de 61.29% con 45 min de exposición, el CEE fue 21.42 y 42.85% mayor que en los tiempos de exposición de 30 y 15 min respectivamente (Cuadro 3).

**Cuadro 3. Valores de las variables respuesta con aplicación de calor mediante aire caliente.**

NH (%)	T <sub>ef</sub> (min)	T <sub>min</sub> (min)	T <sub>rango</sub> (°C)	Erradicación del hongo (UC g <sup>-1</sup> )	CEE (\$ kg <sup>-1</sup> )
75.48	15	27	71-77	0	2.554
	30	27	71-83	0	3.466
	45	27	71-84	0	4.378
61.29	15	25	71-77	0	2.432
	30	25	71-81	0	3.344
	45	25	71-84	0	4.256

NH= nivel de humedad; T<sub>ef</sub>= tiempo de exposición fijado; T<sub>min</sub>= tiempo de exposición en el cual se alcanzó la temperatura mínima deseada; T<sub>rango</sub>= rango de temperatura sostenido; UC g<sup>-1</sup>= unidades de crecimiento por gramo de sustrato; CEE= costo específico de la energía por kg de sustrato tratado.



**Figura 5. Relación temperatura-tiempo de exposición fijado con calor de aire caliente.**

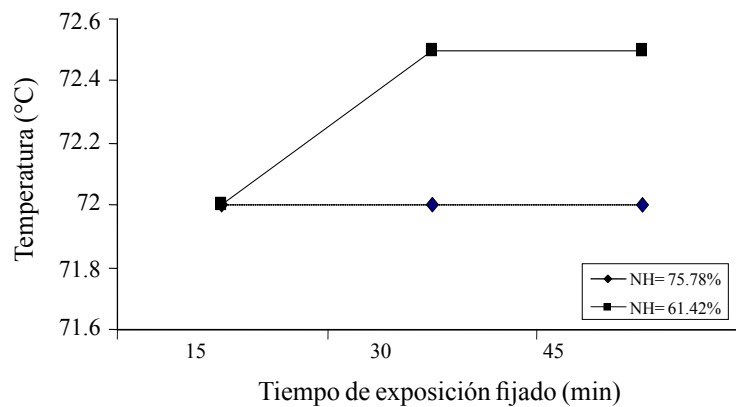
En el equipo con vapor de agua-aireado se determinó el tiempo en el cual se alcanzó la temperatura mínima deseada ( $T_{\text{min}}$ ), ésta fue de 1 min para los dos niveles de humedad en el sustrato y los tres tiempos de exposición fijados. El rango de temperatura sostenido ( $T_{\text{rango}}$ ) fue 71-73 °C y de 71-73.66 °C para las niveles de humedad de 75.78% y de 61.42%, respectivamente. El  $T_{\text{rango}}$  fue

mayor en el nivel de humedad de 75.78% en 24.98% que en el nivel de humedad de 61.29% (Cuadro 4). Para el nivel de humedad de 75.78%,  $T_{\text{rango}}$  fue igual en los tres tiempos de exposición, pero para el nivel de humedad de 61.42% fue igual en los tiempos de 30 y 45 min; sin embargo, mostró 33.33% menos en el tiempo de exposición de 15 min (Figura 6).

**Cuadro 4. Valores de las variables respuesta con aplicación de calor mediante vapor de agua aireado.**

NH (%)	Tef (min)	T <sub>min</sub> (min)	T <sub>rango</sub> (°C)	Erradicación del hongo (UC g <sup>-1</sup> )	CEE (\$ kg <sup>-1</sup> )
75.78	15	1	71 – 73	50	1.8152
	30	1	71 – 73	0	3.5007
	45	1	71 – 73	0	5.1465
61.42	15	1	71 – 73	50	2.8696
	30	1	71 – 74	150	5.5884
	45	1	71 – 74	0	8.1916

NH= nivel de humedad; Tef= tiempo de exposición fijado; T<sub>min</sub>= tiempo de exposición en el cual se alcanzó la temperatura mínima deseada; T<sub>rango</sub>= rango de temperatura sostenido; UC g<sup>-1</sup>= unidades de crecimiento por gramo de sustrato; CEE= costo de la energía por kg de sustrato tratado.



**Figura 6. Relación temperatura-tiempo de exposición fijado cuando el calor se aplicó con vapor de agua aireado.**

En los Cuadros 5 y 6, se presentan los análisis de varianza para el testigo y tratamiento respectivamente, y en el Cuadro 7 se muestran las pruebas de Tukey, para las fuentes de variación, nivel de humedad (NH) y tiempo de exposición fijado

(Tef), sobre las colonias o unidades de crecimiento (UC g<sup>-1</sup> de sustrato) del hongo *Fusarium oxisporum culmorum*, para el testigo y tratamiento; en donde, el número de observaciones fue de 6 y 4 para NH y Tef respectivamente.

**Cuadro 5. Análisis de varianza de las fuentes de variación sobre la variable UC g<sup>-1</sup> de sustrato para el testigo.**

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	F <sub>calculada</sub>	P>F	CV	R <sup>2</sup>
NH	1	1 840 833.333	0.05	0.8233	143.88	0.0328
Tef	2	321 666.667	0	0.9953		

NH= nivel de humedad en el sustrato; Tef= tiempo de exposición fija; CV= coeficiente de variación; R<sup>2</sup>= coeficiente de correlación.

**Cuadro 6. Análisis de varianza de las fuentes de variación sobre la variable UC g<sup>-1</sup> de sustrato para los tratamientos.**

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	F <sub>calculada</sub>	P>F	CV	R <sup>2</sup>
NH	1	7 500	3	0.134	120	0.6949
Tef	2	11 666	2.33	0.178		

CV= coeficiente de variación; R<sup>2</sup>= coeficiente de correlación.



**Cuadro 7. Pruebas de Tukey de las fuentes de variación, nivel de humedad en el sustrato y tiempo de exposición sobre las UC g<sup>-1</sup> de sustrato.**

Fuente de variación		Testigo	Tratamiento
		$\bar{X}$	$\bar{X}$
NH	61.42%	4433 a	66.67 a
	75.78%	3650 a	16.67 a
Tef	DMS <sub>0.05</sub>	8215.3	70.635
	15 min	4250 a	75 a
	30 min	4025 a	50 a
	45 min	3850 a	0 a
	DMS <sub>0.05</sub>	12617	108.48

NH= nivel de humedad en el sustrato; Tef= tiempo de exposición fijo; DMS<sub>0.05</sub>= diferencia mínima significativa;  $\bar{X}$ = medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Se determinó que el testigo (sin desinfectar), el número de colonias o unidades de crecimiento fue 4 041.66 UC g<sup>-1</sup> de sustrato en promedio y fue 17.66% mayor en el nivel de humedad de 75.78% que el de 61.42%. En los sustratos tratados, las UC g<sup>-1</sup> mostraron en promedio 41.66 UC g<sup>-1</sup> de sustrato y fueron 74.99% mayores en el nivel de humedad de 61.42% que en el nivel de 75.78%. En el tiempo de exposición de 30 min las UC g<sup>-1</sup> de sustrato fueron mayores en 33.33 y 100% que en 15 y 45 min, respectivamente. La eficiencia de erradicación del patógeno con 71 °C y 30 min de exposición fue similar a la reportada por Runia (1983); Bartok (1994); Nelson (1998); Runia (2000); y EPA (2002).

Al comparar las UC g<sup>-1</sup> entre el sustrato testigo y el tratado con vapor de agua-aireado, se observó que en general las unidades de crecimiento se redujeron 98.45% al tratar el sustrato, así como en 98.14 y 99.98% para los tiempos de exposición de 15 y 30 min, respectivamente. En relación con el costo específico de la energía por operación del equipo, éste mostró un promedio de \$ 4.5186 kg<sup>-1</sup> y fue 37.16% mayor en el nivel de humedad de 61.42% que en el de 75.78 %. Para el nivel de humedad 61.42% el CEE se incrementó en el tiempo de exposición de 45 min en 31.77 y 64.96% comparado con los tiempos de exposición de 15 y 30 min, respectivamente. Para el nivel de humedad 75.78% el CEE fue mayor en el tiempo de exposición de 45 min en 31.97 y 64.72% que en los tiempos de 15 y 30 min, respectivamente.

## CONCLUSIONES

Los equipos para aplicar calor con aire caliente o mediante vapor de agua aireado son sencillos de construir y operar, confiables porque permite mantener la temperatura constante durante el período de tratamiento, eficientes para erradicar el hongo *Fusarium oxisporum culmorum* en un tiempo igual o menor al recomendado y de bajo costo de operación.

Con 15 min de exposición y con cualquier nivel de humedad del sustrato, la aplicación de aire caliente erradicó en forma efectiva el patógeno *Fusarium oxisporum culmorum*. Con aplicación de calor con vapor de agua-aireado se erradicó a partir de los 30 min de tiempo de exposición.

El costo específico de la energía con la aplicación de calor con aire caliente, es menor que con vapor de agua aireado.

## LITERATURA CITADA

- Alpi, A. y Tognoni, F. 1999. Cultivo en invernadero. Traducción del Italiano por Cerisola, C. I. y Domínguez, C. E. Reimpresión de la 3ª edición. Mundi-Prensa. España. 347 p.
- Bartok, J. W. Jr. 1994. Steam sterilization of growing media. Proceedings, forest and conservation. Nursey Associations. Williamsburg, Va. Gen. Tech. Rep. RM-GTR-257. For Collins, CO: USDA. Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. URL: <http://www.fcnet.org/proceedings/1994/bartok1.pdf>. 163-165.
- Boodley, J. W. 1998. The commercial greenhouse. 2ª edición. Delmar Publishers. USA. 612 p.
- Burés, S. 1997. Sustratos. 1ª edición. Agrotécnicas F. L. España. 342 p.
- Carrero, J. M. 1996. Lucha integrada contra las plagas agrícolas y forestales. 1ª edición. Mundi-Prensa. España. 256 p.
- Eaton, J. R. 1981. Principios de electricidad. 14ª edición. Constancia S. A. México. Traducción del Inglés. 404 p.
- Environmental Protection Agency (EPA). 2002. Steam as an alternative to methyl bromide in nursery crops. URL: <http://www.epa.gov/>.

- French, E. R. y Hebert, T. I. 1997. Soil preparation and disinfecting: extracted from methods of phytopathology. Centro Internacional de la papa (CIP). IICA. San José, Costa Rica. URL: <http://www.cipotato.org/training/materials/Bacterial/Bacterial>. 12 p.
- Gracia, L. C. y Martín-Portugués, E. P. 1983. Mecanización de los cultivos hortícolas. 1ª edición. Mundi-Prensa. España. 243 p.
- Hudson, T. H.; Kester, D. E.; Daviles, F. T. Jr. 1990. Plant propagation: principles and practices. 5ª edición. Prentice-Hall. USA. 34-40 pp.
- Jarvis, W. R. 1998. Control de enfermedades en cultivo de invernadero. Traducción del inglés por Mate, B. J. M. 1ª edición. Mundi-Prensa. España. 334 p.
- Langhans, R. W. 1990. Greenhouse management: a guide to structures, environmental control, materials handling, crop programming and business analysis. 3ª impresión. Halcyon Press of Ithaca. USA. 274 p.
- Nelson, P. V. 1998. Greenhouse operation and management. 5ª edición. Prentice Hall. USA. 637 p.
- Ortiz-Cañavate, J. 1987. Las máquinas agrícolas y su aplicación. 5ª edición. Mundi-Prensa. España. 465 p.
- Pierce, J. H. 1977. Green house grow how. Plants Alive Books. USA. 241 p.
- Pizano, M. 2001. Floriculture and the environment: growing flowers without methyl bromide. 1ª edición. United Nations Publication. UNEP. USA. URL: <http://www.epa.gov/>. 124 p.
- Runia, W. T. 1983. A recent development for steam sterilization. Netherlands. Acta Hortic. 152:195-199.
- Runia, W. T. 2000. Steaming methods for soils and substrates. Netherlands. Acta Hortic. 532:115-123.
- United States Global Resources (USGR). 2004. Siebring steam 'N' air. URL: <http://www.usgr.com/>.
- Walls, I. G. 1992. The complete book of the greenhouse. 4ª edición. Ward lock. British. 104-108 pp.
- Worf, G. L. 1990. Selecting and using chemical fumigants and soil sterilants for ornamental disease control. Department of Agricultural Journalism. University of Wisconsin-Madison. USA. URL: <http://www.learningstore.uwex.edu/pdf/A2612.pdf>. 1-4 pp.
- Zuzqueva, J. 2000. Alternativas a la lucha química en la protección de los cultivos: fungicidas y herbicidas. Terraglia. 21:35-36.