

## ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

**La incapacidad humana por humo en incendios de árbol de navidad. Simulación con cfast.**

**Human incapacity due to smoke in christmas tree fires. Simulation with cfast.**

**DOI:** <https://doi.org/10.61154/metanoia.v11i1.3794>

Manolo Alexander Córdova Suárez <sup>1</sup>

María Magdalena Paredes Godoy <sup>2</sup>

Edison Patricio Villacrés Cevallos <sup>3</sup>

Fabian Fernando Silva Frey <sup>4</sup>

<sup>1</sup> **E- mail:** [manolo.cordova@unach.edu.ec](mailto:manolo.cordova@unach.edu.ec) **Afiliación:** Universidad Nacional de Chimborazo, Chimborazo, Riobamba, Ecuador. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6786-7926>

<sup>2</sup> **E- mail:** [maparedes@unach.edu.ec](mailto:maparedes@unach.edu.ec) **Afiliación:** Universidad Nacional de Chimborazo, Chimborazo, Riobamba, Ecuador. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8211-0400>

<sup>3</sup> **E- mail:** [pvillacres@unach.edu.ec](mailto:pvillacres@unach.edu.ec) **Afiliación:** Universidad Nacional de Chimborazo, Chimborazo, Riobamba, Ecuador. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9518-1278>

<sup>4</sup> **E- mail:** [fsilva@unach.edu.ec](mailto:fsilva@unach.edu.ec) **Afiliación:** Universidad Nacional de Chimborazo, Chimborazo, Riobamba, Ecuador. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3117-601X>

Recibido: 28/09/2024

Revisado: 15/11/2024

Aprobado: 11/11/2024

Publicado:01/01/2025

## RESUMEN

La navidad trae mucha satisfacción, pero también peligros por el uso de Árboles artificiales en el interior de las viviendas que podrían incendiarse y causar consecuencias lamentables a sus ocupantes por el fuego y el humo. Se calculó el tiempo de incapacidad por la generación de humo de combustión de dos árboles de navidad en un incendio dentro de una vivienda familiar de cuatro cuartos utilizando el software Consolidated Model of Fire and Smoke Transport (CFAST) y el visualizador de humo SmokView. Se utilizó una vivienda con un sistema de detección de humo y de temperatura según la norma UNE 12845, luego se simuló un incendio de dos árboles de navidad ubicados en dos de los compartimientos empleando el programa CFAST; con el programa SmokView se determinó el tiempo de incapacidad para usarlo en un plan de emergencia familiar. Al final se calculó un tiempo de incapacidad para las personas de 2,5 minutos en el incendio de una vivienda común ubicada en la ciudad de Riobamba considerando un valor de 8,15 (Valle), 40% de carboxihemoglobina en sangre y con un valor de 50 ppm de CO. Las consideraciones de la simulación fueron de: a) las ventanas se rompen en todas las habitaciones a los 100 segundos, b) la cantidad límite de oxígeno es de 0,15%, c) la Presión es de 101800 Pa, d) La temperatura ambiente 16°C, e) la Humedad relativa es de 76%, f) la elevación es de 2756 m, g) el tiempo de simulación es de 3600 s.

**DESCRIPTORES:** incapacidad, incendio, humedad, temperatura.

## ABSTRACT

Christmas brings a lot of satisfaction, but also dangers due to the use of artificial trees inside homes that could catch fire and cause regrettable consequences to their occupants due to fire and smoke. The incapacity time due to the generation of combustion smoke from two Christmas trees in a fire inside a four-room family home was calculated using the Consolidated Model of Fire and Smoke Transport (CFAST) software and the SmokView smoke visualizer. A home with a smoke and temperature detection system according to the UNE 12845 standard was used, then a fire of two Christmas trees located in two of the compartments was simulated using the CFAST program; with the SmokView program the incapacity time was determined to use it in a family emergency plan. In the end, a disability time for people of 2.5 minutes was calculated in the fire of a common home located in the city of Riobamba considering a value of 8.15

(Valley), 40% of carboxyhemoglobin in the blood and a value of 50 ppm of CO. The simulation considerations were: a) the windows break in all rooms after 100 seconds, b) the limit amount of oxygen is 0.15%, c) the pressure is 101800 Pa, d) the ambient temperature is 16 ° C, e) the relative humidity is 76%, f) the elevation is 2756 m, g) the simulation time is 3600 s.

**DESCRIPTORS:** disability, fire, humidity, temperature.

## INTRODUCCIÓN

En época Navideña el uso de árboles artificiales para decoración interna de viviendas es cada vez más recurrente. La carga térmica del material, los componentes eléctricos que pueden ocasionar una fuente de ignición y las especies que pueden formarse en caso de un incendio hacen de esta práctica muy peligrosa. Alrededor de 160 incendios al año se inician con los árboles de Navidad, ocasionando dos muertes, 12 lesionados y más de 10 millones de dólares al año en Estados Unidos (Association & -NFPSA, 2022). En el Ecuador el consumo de árboles de navidad artificiales tiene gran acogida por los costos relacionados a los de madera de ciprés. La fabricación artesanal de árboles de navidad utiliza plásticos de baja calidad y no consideran el uso de materiales retardante al fuego lo que complica la situación y sube el nivel de riesgo de incendio. Por otro lado, las regulaciones locales sobre Prevención de Incendios de los Cuerpos de Bomberos locales no exigen sistemas de detección, alerta y control de posibles incendios en viviendas comunes ya que no consideran el uso de los emplazamientos para estas actividades. Cuando se dan estos eventos no deseados, se forman incendios con presencia de fuego, calor y especies muy tóxicas para las personas que se encuentran ocupando estas viviendas limitando el tiempo de reacción y lamentablemente ocurren fatalidades y daños materiales significativos (Céspedes Pessini & Campos Medina, 2021). Los incendios de viviendas comunes no son considerados como importantes porque la mayoría de los estudios solo hacen referencia a situaciones de accidentes mayores en la industria (Ordóñez, Varela, & Reyes, 2011). Esta dificultad hace que los planes de prevención de incendios no sean efectivos al momento de una situación real. En las últimas décadas el incremento de la densidad poblacional y el aumento de la pobreza han contribuido con los decesos de personas en incendios urbanos y rurales significativamente (Caballero, 2004). Es de mencionar que, aunque el Gobierno Ecuatoriano desarrolló el sistema de llamadas del ECU 911 para situaciones de peligro, la no presencia de los ocupantes de las viviendas en horas laborales hacen que la

respuesta se dé cuando ya todo está perdido e incluso la emergencia ya se convierte en una crisis. El efecto directo en una persona que se expone a fuego directo en un incendio puede ser: a) confusión por el humo, b) irritación en los pulmones, c) hipoxia por falta de oxígeno y d) dolor por las quemaduras (Rodríguez, 2010). Los aspectos claves para la supervivencia en un incendio de cualquier tipo de emplazamiento son: a) el tiempo de evacuación y b) el tiempo de exposición incapacitante. La mayoría de los incendios son catastróficos cuando los ocupantes no alcanzan a salir del ambiente cubierto de humo generado por la exposición a los gases de combustión. Estos gases de combustión que en su mayoría son el Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el Monóxido de Carbono (CO) resultan letales para las personas que ocupan un recinto que se incendia a los pocos minutos incluso si el evento no tiene la presencia de llama (Kochi, Loomis, Champ, & Donovan). Para analizar el tiempo de exposición incapacitante se necesita el porcentaje de carboxihemoglobina en la sangre, el volumen respirado y la concentración de CO. Por lo tanto, se necesita analizar la posibilidad de conocer el tiempo de la saturación de las habitaciones con el humo generado en los incendios (Egea Mejía, 2009).

Por otro lado, la seguridad industrial ha desarrollado técnicas muy avanzadas para la estimación de variables que son indispensables a la hora de determinar el tiempo de incapacidad y ayudar a atenuar pérdidas humanas y materiales en sitios industriales. Una de estas herramientas es la Ingeniería de incendios, pero no se la está aplicando en las viviendas comunes (González, Jiménez-Octavio, Santamaría, & Garrido). Si bien es cierto existe la posibilidad de encontrar la concentración de oxígeno y el volumen de aire respirado con uso de sensores y equipos estos métodos son caros y complicados. Aunque lo ideal es realizar ensayos reales estos tienen limitaciones no solo por lo costosos que resultan sino también porque se hacen a pequeñas escalas en condiciones específicas de fuego y son de difícil reproducción. Por esto se utilizan ensayos virtuales en un ordenador evitando realizarlos de manera real y pudiendo simular a gran escala y reproducirlos en otros escenarios incluso de edificios completos y sobre todo menos caros y laboriosos. Estas prácticas se denominan la simulación de fuego o modelización del fuego (Capote, Alvear, Abreu Menéndez, Lázaro, & Espina, 2008).

Estas herramientas computacionales permiten realizar estas pruebas de una manera segura y sobre todo en tiempos muy cortos. La modelación de estos escenarios de incendios empieza con: a) la generación de una realidad del evento no deseado, b) el uso de modelos matemáticos

y físicos, c) el empleo de ecuaciones discretizadas, d) la ejecución de la solución, e) la validación y finalmente e) la adaptación de los cambios según los resultados deseados (Alvear, 2007). Para simular el fuego en recintos cerrados existen dos modelos matemáticos bien definidos: a) modelos de zonas y b) modelos de campo (Suárez, Cevallos, & Lema, 2021). No obstante, pese a que se han desarrollado muchas herramientas informáticas de acceso gratuito la mayoría desarrolladas por el: National Institute of Standards and Technology (NIST), como son el: ASET, ASET-B, COMP-F2, COMPBRNIII, FIRST, WPI, estos están desarrollados para incendios de una sola habitación (Sindt Gallés, 2015). Aunque los modelos de campo son los más exactos su uso se restringe por el costo de los softwares y los proveedores; es por eso que los prevencionistas o diseñadores prefieren la herramienta: Consolidated Model of Fire and Smoke Transport (CFAST) y el visualizador de humo Smokview que son códigos de uso libre y se utilizan para simular incendios de hasta 30 habitaciones con conexiones de ductos (Suárez, Mayorga, Cevallos, & Saul, 2021). Previo a la simulación del incendio resulta importante definir el sistema de extinción que utiliza el emplazamiento, pero en este trabajo se intenta replicar la situación más común que es solo utilizar detección de humo y temperatura según la norma UNE 12845. Además se necesita conocer las condiciones ambientales del lugar donde se va a realizar la simulación (Catalina Garrote & Gonzalo Miguel, 2013).

Este trabajo utiliza una herramienta de acceso libre como lo es el CFAST para determinar la concentración de CO que se produce en el incendio, el tiempo de llenado de humo en la habitación con personas y hacer una comparación con la ecuación de Steward en el cálculo del tiempo de incapacidad de las personas en un incendio causado por dos árboles de navidad ubicados en habitaciones contiguas en una casa tipo de 4 habitaciones.

## **MATERIALES Y METODOS**

La herramienta Consolidated Model of Fire and Smoke Transport (CFAST) y el visualizador de humo Smokview desarrollado por el National Institute of Standards and Technology (NIST) utilizan la siguientes premisas: a) recintos con suelos planos con secciones horizontales constantes y aperturas, b) estratificación perfecta: horizontal, transición brusca y velocidad nula, c) el fuego considera fuente de calor y de especies, d) pluma de gases calientes con: transporte vertical instantáneo, turbulenta y volumen despreciable, e) temperatura, densidad,

presión y fuegos homogéneos en cada capa y variables en el tiempo, f) posibilidad de varios focos de fuego a distintas alturas, g) despreciable la disipación de energía por fricción, h) gases ideales caloríficamente perfectos, i) despreciable el volumen y calor acumulado por elementos del recinto, j) variación de presión en vertical mucho menor que el valor de la presión absoluta, k) la interferencia al calor por parte de los elementos del recinto es despreciable.

El modelo de zona del CFAST maneja la ecuación 1:

$$h = (Z_c + Z_f) \quad (1)$$

Donde:

h=altura total

Zc= Altura de la capa caliente

Zf= Altura de la capa fría

Además de las ecuaciones de estado del gas ideal para el balance de masa de maneja la ecuación 2.

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_{j=1}^{Na} m_j + W_{vc} \quad (2)$$

Donde:

dm<sub>vc</sub>=derivada de masa del volumen de control

dt= derivada del tiempo

m<sub>j</sub>= gasto de entrada al volumen de control por apertura

W<sub>vc</sub>= gasto de salida (se considera cero)

Y para el balance de calor considera la ecuación 3.

$$\frac{d(m_{vc} * c_v * T)}{dt} = -p \frac{dV_{vc}}{dt} + \sum_{j=1}^{Na} m_j * c_p * T_j + q_c + q_{tr} \quad (3)$$

Donde:

$\frac{d(m_{vc} * c_v * T)}{dt}$  = acumulación de energía

$-p \frac{dV_{vc}}{dt}$  = trabajo de expansión o compresión de la capa de gases

$\sum_{j=1}^{Na} m_j * c_p * T_j$  = gasto de entrada por entalpía

q<sub>c</sub> = grado de liberación de calor

q<sub>tr</sub> = calor transferido

El CFAST también calcula con submodelos que toman en cuenta: a) la generación de calor, b)

las subespecies, c) gasto a través de las aperturas, d) gasto a través de las paredes y la e) transferencia de masa entre capas. El manejo de la interfaz del CFAST tiene una configuración de pestañas donde la primera de ellas y la más importante es la del ingreso de las condiciones ambientales y datos de tiempo de la simulación, además se tiene ventanas para ingreso de: los materiales, los recintos, las ventanas y puertas, los fuegos, la ventilación mecánica, las conexiones entre recintos, los targets y los dispositivos de control y detección de incendios (Zurita Castro, 2020). Esta investigación considera el uso de medidas de control como detectores de humo y de temperatura ubicadas en cada habitación para monitoreo de lo que ocurrió en el incendio.

#### Determinación del tiempo de incapacidad

El tiempo de incapacidad es el tiempo en el cual una persona queda inhabilitada de poder moverse o reaccionar en un incendio. La ecuación (4) indica la relación de la exposición al humo y el porcentaje de carboxihemoglobina, se puede calcular utilizando la ecuación de Stewart (Stewart et al., 1974).

$$eCOHb = (3.317 * 10^{-5}) * (ppmCO)^{1.036} * RMV * t \quad (4)$$

Donde:

eCOHb=porcentaje de carboxihemoglobina en sangre (%)

ppmCO= concentración de monóxido de carbono (ppm)

RMV= volumen respirado (lt/min)

t=tiempo (min)

El porcentaje de carboxihemoglobina en sangre y el volumen respirado se toman de la tabla: 1.

**Tabla 1.** Volumen respirado por minuto según esfuerzo

Actividad	Volumen respirado	% de COHb <sup>a</sup> en sangre (%)
Reposo	8,5	40
Esfuerzo moderado	25	20
Esfuerzo apreciable	50	30

**Nota:** Volumen respirado según tres categorías de actividad en el momento de un incendio, <sup>a</sup>

Porcentaje de carboxihemoglobina en sangre (Pérez (2017)).

Para este caso se fijó esfuerzo moderado quedando como única variable la cantidad de CO que se genera en el incendio y que se estimó con la herramienta CFAST.

## RESULTADOS

Luego se simuló el incendio de una vivienda de cuatro habitaciones en condiciones de la ciudad de Riobamba, con dos árboles de navidad de 1,5 m de altura y 0,5 m<sup>2</sup> de área de ocupación puestos en la sala principal (Recinto1) y otro en la sala de estar (Recinto 2) y además considerando detectores de humo y de temperatura en cada habitación se obtuvieron los siguientes resultados.

**Tabla 2.** Resultado activación de sistemas de detección de incendios.

Detector/alarma	Tiempo (s)	Detector/alarma	Tiempo (s)
Humo R2	6	Calor R1	16
Humo R1	6	Calor R2	29
Humo R3	11	Calor R3	444
Humo R4	23	Calor R1	....*

**Nota:** \* No se activa. Las ventanas se rompen en todas las habitaciones a los 100 segundos. La cantidad límite de oxígeno es de 0,15%. La Presión es de 101800 Pa, La temperatura ambiente 16°C. La Humedad relativa es de 76%. La elevación es de 2756 m. El tiempo de simulación es de 3600 s.

En la figura 1 se puede observar los resultados de la simulación y la visualización en el Smokview de la temperatura y humo en función del tiempo.

Figura a

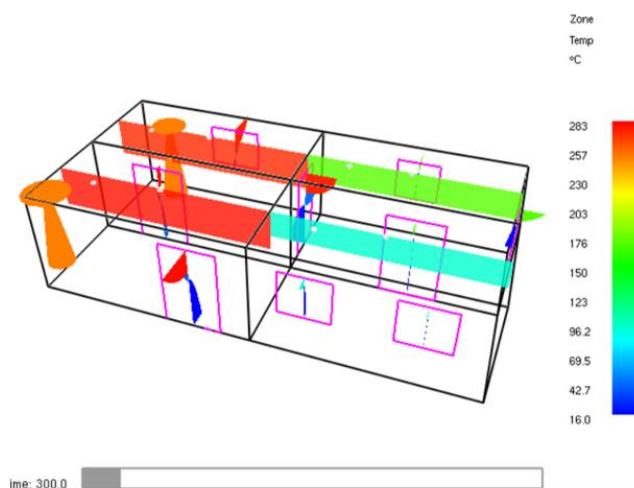




Figura b

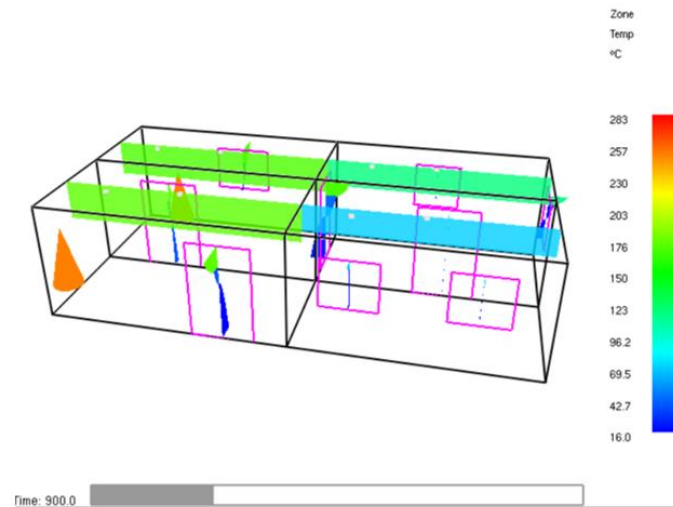


Figura1. La simulación del incendio indica temperaturas máximas en el recinto 1 y 2 a los 300 segundos (Fig. a). Las ventanas ayudan al enfriamiento de las zonas a los 900 segundos (Fig. b). Las alarmas de temperatura tienen un tiempo de activación de  $57,22^{\circ}\text{C}$  y los detectores de humo una activación al oscurecimiento de  $23.93346\ \%/m$  en todos los recintos. No se consideró ventilación mecánica ni llovederas para replicar las viviendas comunes.

En la figura 2 se observa la simulación del humo y la saturación de todas las especies en las habitaciones consideradas en este caso.

Figura a

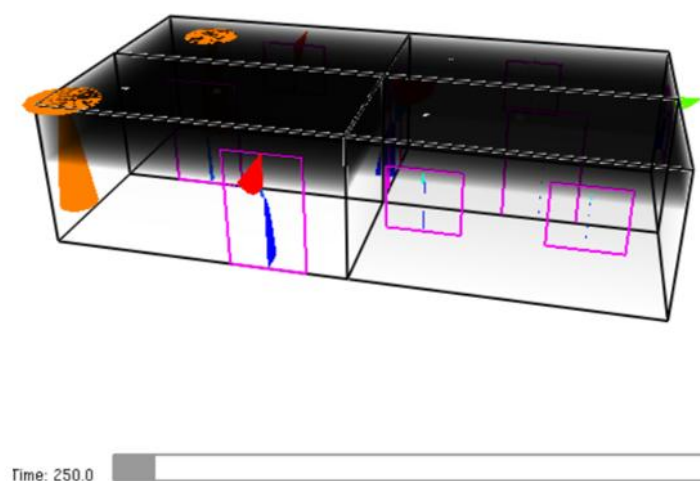


Figura b

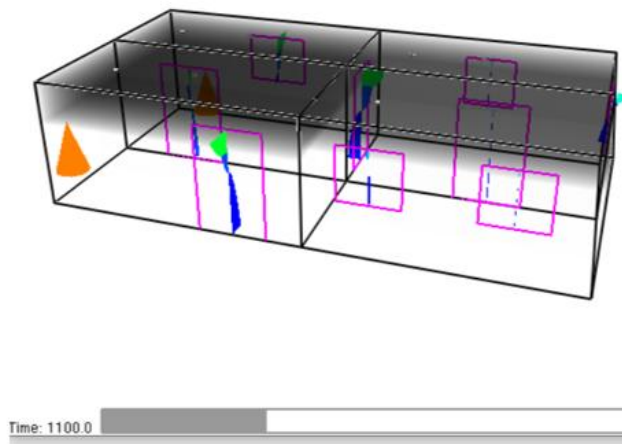


Figura 2. La simulación del incendio indica la saturación de los cuatro compartimientos a los 250 segundos (Fig. a). A los 1100 segundos (Fig. b) se desaloja y baja la capa de humo a niveles no incapacitantes.

En la tabla 3 se observa el resultado del cálculo del tiempo de incapacidad para las personas que se encuentren como ocupantes de una vivienda tipo.

**Tabla 3.** Resultado del cálculo del tiempo de incapacidad con CFAST.

Item	Valor	Tiempo incapacidad (min)
Actividad reposo	8,15	
Concentración CO	50 (ppm)	2,5*
carboxihemoglobina en sangre	40%	

**Nota:** \* El valor resulta de la ecuación (1). La simulación se realizó en condiciones críticas: reposo. El valor de CO resulta de los resultados de la simulación y las especies que genera el CFAST.

## DISCUSIÓN

Aunque los resultados sean parecidos a los valores recomendados por los cuerpos de bomberos locales para industrias es necesario incluir a las viviendas comunes en la exigencia de

prevención contra incendios. Además se podría mejorar estos resultados midiendo en los afectados la cantidad de carboxihemoglobina con equipos de medición (Dueñas-Laita et al., 2010).

## CONCLUSIONES

En el incendio de una vivienda común generada por instalaciones eléctricas de dos arreglos navideños con árboles de 1,5 m de altura y 0,5 m<sup>2</sup> de envergadura cada uno ubicado en dos habitaciones contiguas, se calculó un tiempo de incapacidad para los ocupantes de: 2,5 minutos en condiciones termo higrométricas de la ciudad de Riobamba considerando reposo de los ocupantes; 40% de carboxihemoglobina en sangre y con un valor de 50 ppm de CO. Las consideraciones de la simulación fueron de: a) las ventanas se rompen en todas las habitaciones a los 100 segundos, b) la cantidad límite de oxígeno es de 0,15%, c) la Presión es de 101800 Pa, d) La temperatura ambiente 16°C, e) la Humedad relativa es de 76%, f) la elevación es de 2756 m, g) el tiempo de simulación es de 3600 s.

El tiempo de incapacidad coincide con el tiempo de saturación del humo en las cuatro habitaciones según el Programa CFAST.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvear, D. (2007). *Modelado y simulación computacional de incendios en la edificación*: Ediciones Díaz de Santos.
- Hoja Informativa sobre la Seguridad con los Árboles de Navidad, (2022).
- Caballero, D. (2004). *Gestión de los riesgos de incendios en la interfase forestal-urbana: Proyecto WARM*. Paper presented at the II° Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación y Economía de los Programas de Protección contra los incendios Forestales.
- Capote, J., Alvear, D., Abreu Menéndez, O. V., Lázaro, M., & Espina, P. J. R. i. d. m. n. p. c. y. d. e. i. (2008). Influencia del Modelo de Turbulencia y del Refinamiento de la Discretización Espacial en la Exactitud de las Simulaciones Computacionales de Incendios. *24*(3), 227-245.

- Catalina Garrote, A., & Gonzalo Miguel, D. (2013). Evaluación de rociadores automáticos de acuerdo con la norma UNE-EN 12845.
- Céspedes Pessini, J., & Campos Medina, L. J. E., sociedad y territorio. (2021). Gubernamentalidad en la reconstrucción post-desastres. El caso del incendio de Valparaíso en 2014. *21(66)*, 383-411.
- Dueñas-Laita, A., Putze, G. B., Alonso, J., Bajo, A., Climent, B., Corral, E., . . . Nogué, S. J. M. i. (2010). Bases del manejo clínico de la intoxicación por humo de incendios «Docohumo Madrid 2010». *34(9)*, 609-619.
- Egea Mejía, J. (2009). Modelaje y simulación de dispersiones de humo generado por un incendio en un espacio confinado-tunel; a partir de una herramienta CFD.
- González, A. C., Jiménez-Octavio, J., Santamaría, P. A., & Garrido, A. R. La Ingeniería de Protección contra Incendios a través de la Ingeniería Mecánica.
- Kochi, I., Loomis, J., Champ, P., & Donovan, G. *El Efecto de los Incendios Forestales sobre la Salud y la Economía: Revisión de la Bibliografía y Evaluación del Impacto I*. Paper presented at the Memorias del Tercer Simposio Internacional Sobre Economía, Planificación, y Políticas de los Incendios Forestales: Problemas y.
- Ordóñez, C., Varela, M. R., & Reyes, A. J. G. R. I. d. C. y. T. d. I. I. G. (2011). Desarrollo de un SIG para el análisis de patrones espaciales de incendios en viviendas. (11), 1-18.
- Pérez, J. (Producer). (2017). Riesgos y efectos del fuego. [Video conferencia]
- Rodríguez, M. P. R. (2010). *Manejo del fuego*: Editorial Félix Varela Havana.
- Sindt Gallés, X. (2015). *Simulación computacional de la propagación de incendios en fachadas ventiladas. Comparación con pruebas experimentales a gran escala*. Universitat Politècnica de Catalunya,
- Stewart, R. D., Baretta, E. D., Platte, L. R., Stewart, E. B., Kalbfleisch, J. H., Van Yserloo, B., & Rimm, A. A. J. J. (1974). Carboxyhemoglobin levels in American blood donors. *229(9)*, 1187-1195.
- Suárez, M. A. C., Cevallos, E. P. V., & Lema, G. C. J. A. D. (2021). Eficacia del rediseño de las salidas de emergencia en la evacuación de personas por incendio de un almacén de calzado. Caso simulado con modelos de campo. *4(3.1)*, 138-148.
- Suárez, M. A. C., Mayorga, D. F. B., Cevallos, E. P. V., & Saul, M. V. K. J. C. (2021). Simulación de la eficacia de ignífugos inorgánicos en la extinción de incendios con CFAST. Caso de un laboratorio químico. *4(1.2)*, 176-186.

Zurita Castro, F. B. (2020). *Diseño de un sistema contra incendios mediante la utilización de la herramienta CFAST en el Laboratorio de Control y Análisis de Alimentos LACONAL*. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos.

©2025 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)