

Artículo de revisión

Hacia una estructura de investigación y educación para la prevención de accidentes por incendios y explosiones en Colombia

Towards the creation of a research and education structure for the prevention of accidents due to fires and explosions in Colombia

✉ Alejandro Molina^{1,*}, ✉ Sebastián López¹, ✉ Jorge Martín Molina-Escobar²,
✉ Henry Copete³, ✉ David Soto¹, ✉ Linda Jaramillo², ✉ Astrid Blandón²

¹Departamento de Procesos y Energía, Bioprocesos y Flujos Reactivos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

²Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Materia Orgánica Sedimentaria y Análisis de Imagen, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

³Soluciones Energéticas y de Automatización, Medellín, Colombia

Artículo de posesión para admisión de Alejandro Molina, como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen

Se analizó la situación actual de la investigación y la educación en incendios y explosiones en Colombia desde un enfoque de ciencia e ingeniería y se hicieron recomendaciones sobre los campos que deben desarrollarse para crear una estructura investigativa y educativa que respalde los esfuerzos por prevenirlos. Dado el riesgo de incendios y explosiones, la mayoría de los países han propiciado la creación de centros de investigación y educación orientados al desarrollo científico en esta área. En Colombia tal infraestructura tiene un desarrollo apenas incipiente. La revisión de aspectos importantes en incendios y explosiones como el análisis estadístico, la caracterización fisicoquímica de sustancias inflamables, la cinética química, la combustión, la simulación, la radiación térmica, los fenómenos de pirólisis, el *smouldering*, la formación de hollín y de humo, la caracterización experimental, la evaluación de riesgos, la educación y otros aspectos específicos de las explosiones evidenció que en Colombia existe un buen desarrollo en la aplicación de la combustión y la pirólisis con fines comerciales, pero sin énfasis en incendios y explosiones. En las demás áreas existen antecedentes de investigación específicamente relacionados con este campo que deben reforzarse. Se recomienda la creación de programas curriculares de posgrado en ciencia y tecnología en esta área, así como el aumento de la capacidad experimental para la caracterización de sustancias inflamables, el fortalecimiento de la investigación en ciencias básicas y el desarrollo de habilidades de computación y simulación.

Palabras clave: Incendios; Explosiones; Educación; Colombia.

Abstract

We review here the current situation of research and education related to fires and explosions in Colombia from a science and engineering perspective. We present the fields that should be developed to create a research and education structure in support of the efforts to prevent accidents and explosions. Given the risk of fires and explosions, most countries have developed research and education centers focused on scientific analysis in this field. In Colombia, the development of such a structure is barely incipient. A review of different important areas in fires and explosions such as statistical analysis, physicochemical characterization of flammable substances, chemical kinetics, combustion, simulation, thermal radiation, pyrolysis, smouldering, soot and smoke formation, experimental characterization, risk assessment, education, and specific aspects of explosions showed

Citación: Molina A, López S, Molina-Escobar JM, *et al.* Hacia una estructura de investigación y educación para la prevención de accidentes por incendios y explosiones en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(178):50-67, enero-marzo de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1539>

Editor: Óscar José Mesa-Sánchez

***Correspondencia:**

Alejandro Molina;
amolinao@unal.edu.co

Recibido: 19 de agosto de 2021

Aceptado: 30 de noviembre de 2021

Publicado en línea: 15 de diciembre de 2022



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

that combustion and pyrolysis are widely applied for commercial purposes, but with no emphasis on fires and explosions. In the other areas, there is some evidence of research that should be further advanced. To strengthen the academic environment related to fires and explosions, we recommend the creation of graduate science and technology education programs to strengthen the experimental capacity for the characterization of flammable substances fostering research in basic sciences and develop computer and simulation skills.

Keywords: Fires; Explosions; Education; Colombia.

Introducción

La posibilidad de desastres por incendios y explosiones es alta y diversas industrias en todo el mundo se enfrentan a este riesgo como lo demuestran eventos recientes en la minería, la explotación de gas y petróleo y la industria química. Asimismo, se pueden registrar incendios y explosiones en edificaciones y obras civiles y también es alta la incidencia de incendios forestales a nivel mundial (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>). La prevención de incendios y explosiones involucra a muchas partes, desde los entes reguladores y fiscalizadores del gobierno hasta la industria privada. Las universidades y los centros de investigación deben hacer parte de cualquier esfuerzo para prevenir los desastres por incendios y explosiones.

A nivel internacional se han desarrollado centros de investigación cuyo interés principal es la prevención de accidentes por incendios y explosiones (**Tabla 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>), pues, aunque es común que los temas de seguridad contra incendios y explosiones se integren en los currículos de los programas académicos tradicionales de ingeniería, en algunos países existen programas de posgrado exclusivamente diseñados para mejorar la seguridad contra incendios y explosiones (**Tabla 3S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>).

La prevención de incendios y explosiones constituye un campo bastante extenso, con un carácter inherentemente interdisciplinario, pero es posible clasificar los grupos que deciden abordarla mediante la investigación y educación. En primer lugar, según el enfoque que se adopte, se pueden diferenciar las actividades específicas de prevención de incendios de aquellas orientadas a combatirlos. Las primeras incluyen el diseño estructural de edificios, minas, empresas y plantaciones que prevenga la formación de incendios. Las segundas competen más a los organismos de control de incendios, como los bomberos y las unidades de rescate.

Más allá de esta división, de carácter esencialmente operativo, se puede proponer otra clasificación que distingue entre centros o grupos de investigación que estudian la seguridad y la salud ocupacional relacionadas con incendios y explosiones de aquellos que se centran más en entender la ciencia que subyace a estos fenómenos, la resistencia de los materiales frente a un accidente de este tipo, los fenómenos físicos que dan lugar a la ignición, y la estimación de riesgos y las propuestas de soluciones de ingeniería para mitigarlos. Esta clasificación no es excluyente y hay grupos que abordan tanto la prevención como la mitigación de incendios y realizan análisis de seguridad y salud ocupacional.

En Colombia hay investigación relacionada con el área de seguridad ocupacional y una cantidad significativa de programas de posgrado enfocados en los aspectos académicos, no gerenciales, de la salud ocupacional y la seguridad en el trabajo en diferentes instituciones académicas (**Tabla 4S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>). Sin embargo, el campo de los estudios más fundamentales sobre la dinámica de los incendios y explosiones y las soluciones ingenieriles que pueden mitigarlas no ha tenido tanta difusión como el de la salud y la seguridad ocupacional, aunque se destaca un incipiente pero importante desarrollo con nuevos programas de posgrado y estudios a cargo de investigadores asociados con universidades colombianas (**Tabla 5S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>).

Debe admitirse, sin embargo, que, a pesar del avance que se evidencia en el estudio de la ciencia e ingeniería de la prevención de incendios y explosiones en el país, es necesario desarrollar una estructura de investigación y educación en esta área. En una primera parte

de este documento se describen las investigaciones actuales en Colombia, así como aquellas que pueden aprovecharse en la prevención de accidentes por incendios y explosiones. En la segunda parte se proponen estrategias para guiar la investigación y la educación desde la perspectiva de la ciencia y la ingeniería.

Antecedentes de investigación en ciencia e ingeniería de incendios y explosiones en Colombia

La revisión de la investigación en el tema de incendios y explosiones tuvo como norma incluir principalmente publicaciones realizadas por instituciones o investigadores vinculados o relacionados con universidades y centros de investigación colombianos. Se consultaron revistas académicas internacionales y nacionales. Se dio más énfasis a la relevancia del tema de los artículos que a la calidad técnica o importancia de las revistas en que aparecen privilegiando el interés por lograr una visión del desarrollo actual de la investigación en este campo en Colombia. Como se sabe, hay una disciplina de investigación conocida como bibliometría, cuyo objeto es la recopilación, organización y manipulación cuantitativa de la información recogida en las publicaciones científicas (Verbeek, *et al.*, 2002). Tales mediciones se consideran útiles en el desarrollo de las políticas de ciencia y tecnología, pues suministran estadísticas sobre el número de publicaciones, las citas de la publicación, el promedio de citas por publicación, el número de autocitas, el factor de impacto de la revista, el promedio mundial del factor de impacto en el tema, etc., y es evidente que dichos datos son relevantes para el análisis que nos ocupa. Sin embargo, la revisión que acá se presenta es de orden cualitativo y se limita a describir los diferentes frentes de investigación relacionados con la ciencia de incendios y explosiones en Colombia. En la revisión se encontraron 82 publicaciones relacionadas con este campo, aparecidas entre 1992 y 2021. Antes del 2010 solo se registran seis, cifra que aumentó a 11 entre el 2012 y el 2013 como respuesta al incendio del poliducto en Dosquebradas a finales del 2011. Entre el 2013 y el 2017 el número de referencias por año fue inferior a 10. Solo a partir del 2018 el número de referencias por año superó las diez (2018:14, 2019:11 y 2020: 13), la mayoría motivada por estudios relacionados con la minería del carbón.

Uno de los aspectos más interesantes al estudiar incendios y explosiones es su ubicuidad en el quehacer humano. Hay estudios en Colombia sobre incendios en lugares tan diversos como una mina de carbón (García-Torrent, *et al.*, 2016) o una sala de cirugía (Llamas, *et al.*, 2007). A pesar de este carácter ampliamente interdisciplinario, los eventos químicos y físicos que tienen lugar durante un incendio son bastante similares, independientemente de su origen. Puede decirse, de forma un tanto extrema, que tanto el incendio en la mina de carbón como el de la sala de cirugía producen dióxido de carbono, agua, humo y hollín, aunque claro, en diferentes concentraciones.

En el caso de las explosiones también es posible hacer un análisis teórico general para entender eventos de tan diferente escala como la explosión de una estrella supernova o la de un depósito de combustibles (Oran, 2015). A pesar de las diferencias entre los incendios y las explosiones en cuanto a la forma y velocidad de los procesos, existen similitudes evidentes en las primeras etapas, antes del paso de deflagración a detonación.

Desde el punto de vista de ciencia y tecnología, la investigación y la educación para la prevención de accidentes por incendios y explosiones objeto de este artículo se centran principalmente en esos aspectos comunes y en la información estadística que documenta el número de accidentes por incendios y explosiones, la caracterización fisicoquímica de las sustancias inflamables, la cinética de las reacciones químicas, el entendimiento de la combustión, los avances en simulación, la transferencia de calor por radiación, los fenómenos de pirólisis, *smouldering* y formación de hollín y humo, la caracterización experimental, la evaluación de riesgos y la educación. Dadas las particularidades inherentes a los procesos explosivos, se les dedica una sección aparte. Aunque hay otras áreas relevantes, por ejemplo la resistencia de los materiales, estas no se alcanzaron a abordar en esta revisión.

Análisis estadístico

Más allá de las estadísticas que diferentes instituciones gubernamentales presentan sobre los incendios y explosiones, es común que los investigadores analicen los datos sobre tales accidentes para aprender sobre ellos. En este sentido, en la **Tabla 6S**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1539/3177>, se presentan ejemplos de informes de estadísticas de incendios en distintos países, así como de estudios que las analizan con el fin de disminuir su incidencia.

En cuanto a Colombia, se presentan varios estudios en que se revisan las estadísticas, por ejemplo, de las emergencias mineras mortales en el país (**Gheorghe, 2020; Gheorghe, et al., 2021**) o en regiones específicas (**Ramírez-Rosas & González-Sierra, 2016**). Cuando estos estudios se combinan con herramientas de análisis avanzadas, por ejemplo la modelación estructural interpretativa (*Interpretative Structural Modeling, ISM*), la cual permite el aprendizaje interactivo asistido por computador (**Gheorghe, 2020**), es posible acoplar los factores de riesgo internos y externos de las empresas involucradas y ver cómo se propagan en la cadena de producción debido a sistemas de seguridad defectuosos. Es decir, más allá de la importante recopilación estadística que indica, por ejemplo, que entre el 2005 y el 2018 en la minería colombiana (**Gheorghe, et al., 2021**) la mayoría de emergencias se originaron en minas de carbón (77,4 %) y un número significativo del total (27,2 %) tuvo lugar en minas ilegales. En este caso, el análisis ISM indica (**Gheorghe, 2020**) que hay cuatro causas directas de riesgo de accidentes en minería: 1) falta de condiciones de seguridad en techos, paredes y pisos; 2) un porcentaje elevado de gases peligrosos; 3) uso inadecuado de las herramientas y equipos, y 4) procedimientos de trabajo seguro precedidos de otros factores de riesgo que no son producto del azar. En lo que compete a incendios y explosiones, este tipo de análisis permite reconocer que la causa inmediata, relacionada con un porcentaje elevado de gases peligrosos, normalmente está precedida por la ausencia de monitoreo permanente de gases y de un plan de ventilación adecuado.

También se han publicado análisis estadísticos para revisar el área afectada por incendios forestales en Colombia (**Armenteras-Pascual, et al., 2011; Romero-Ruiz, 2011**) y su relación con el clima y la vegetación. La importancia de este tipo de estudios es evidente para la planeación de estrategias de mitigación y de reacción ante futuras emergencias.

Asimismo, en la literatura médica se encuentran análisis de las causas, de las poblaciones en alto riesgo, y de la tasa de mortalidad por quemaduras (**Aldana & Navarrete, 2015; Navarrete & Rodríguez, 2016**). Entre el 2000 y el 2009 la mayoría de accidentes fatales por quemaduras (**Navarrete & Rodríguez, 2016**) en la población general se debió a accidentes eléctricos (49 %), seguidos por incendios (29 %). Por el contrario, en la población pediátrica (**Aldana & Navarrete, 2015**) la principal causa fueron los incendios (44 %) seguidos por los accidentes eléctricos (30 %). No se encontraron otros artículos con datos estadísticos sobre incendios y explosiones en Colombia fuera de las referencias ya mencionadas.

Caracterización fisicoquímica de sustancias inflamables

Los equipos de investigación en Colombia han caracterizado con frecuencia las propiedades relevantes de sustancias potencialmente inflamables. Como se resume en la **Tabla 7S**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1539/3177>, estas incluyen combustibles líquidos, fracciones de petróleo y productos de la combustión. Sin embargo, las investigaciones directamente relacionadas con las propiedades de sustancias combustibles desde el punto de vista de incendios y explosiones son pocas. Se pudo encontrar, por ejemplo, la caracterización de las propiedades de ignición y explosividad de los carbones colombianos (**Fuentes, et al., 2018; García-Torrent, et al., 2016**) y de sus procesos de combustión espontánea (**Gutiérrez, et al., 2018**), el análisis del efecto del tamaño de partícula en la explosividad de material particulado de trigo (**Pico, et al., 2020b**) o las características espectrales de distintos explosivos (**Garzón-Serrano, et al., 2020; Sierra, et al., 2020**). Con contadas excepciones, los experimentos se hicieron en universidades extranjeras y, en algunos casos, en Colombia, pero solo simulaciones (**Mena, et al., 2012**;

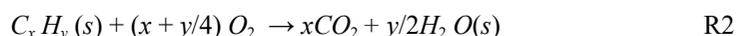
Pico, et al., 2020a, 2020b; **Torrado**, 2017; **Vizcaya, et al.**, 2018); tampoco hay evidencia del uso de equipos básicos en la determinación de parámetros relevantes para el estudio de incendios y explosiones, como el tubo Hartmann, el test de la esfera de 20 L o de 1 m³ y el horno Godbert-Greenland.

En la revisión solo se reportó una investigación (**Fuentes, et al.**, 2018) que hace referencia al uso de placas calientes para la determinación de la temperatura de mínima ignición de sustancias combustibles y la aplicación de equipos experimentales o aproximaciones teóricas para la evaluación de parámetros característicos de la ignición, pero desde el punto de vista del uso de combustibles, como se indica en la **Tabla 7S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>. Se destaca también un estudio (**Bustamante-Rúa, et al.**, 2019) en el que se evalúa la posibilidad de ignición espontánea en minas a cielo abierto usando un análisis estadístico que consideró 21.000 datos de propiedades de vetas de carbón, tales como temperatura ambiente, temperatura de la veta, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad de viento, composición de la atmósfera (oxígeno, monóxido de carbono, metano), altura sobre el nivel del mar y composición del carbón de dos minas a cielo abierto y en minas de carbón ya abandonadas.

La escasez de los análisis de las propiedades de ignición de combustibles contrasta con los múltiples estudios sobre las propiedades claves para entender el desempeño de combustibles como, por ejemplo, la velocidad de llama laminar, las dimensiones y temperatura de la llama, el índice Wobbe, los calores inferiores y superiores de combustión, los límites de inflamabilidad y el punto de rocío (**Tabla 7S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>).

Cinética química

Para entender desde el punto de vista teórico un evento como un incendio o una explosión es necesario caracterizar las múltiples reacciones que tienen lugar y simplificarlas de tal forma que estén al alcance de los cálculos necesarios para predecir o mitigar un incendio. En Colombia se registra un número significativo de estudios (**Tabla 8S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>) que abordan el tema de la cinética química cuando se aplica al uso de combustibles. Esa relativa abundancia de artículos en esta área contrasta con los pocos estudios relacionados con el uso de mecanismos de reacción en la simulación de incendios. Solo se encontró un artículo en este campo (**Mariño, et al.**, 2020) en el que se comparan tres situaciones: una llama laminar, una turbulenta y un incendio causado por empozamiento de hidrocarburos, mediante la herramienta de representación física *Fire Dynamic Simulator* (FDS) (**McGrattan, et al.**, 2021) utilizando un modelo que, en vez de definir de forma heurística la cantidad de combustible que se convierte en hollín, propone sendas reacciones de formación (R1) y oxidación de hollín (R2). Cada reacción está acompañada de diferentes submodelos que buscan ajustar la cinética para representar un proceso tan complejo como la formación y oxidación del hollín, el cual involucra cientos de reacciones químicas. El análisis presentado en este artículo (**Mariño, et al.**, 2020) no busca un desarrollo fundamental en la química del proceso de formación de hollín, sino que considera aspectos como la resolución de la malla computacional y cómo se acopla dentro de los submodelos de turbulencia, radiación y combustión.



Combustión

En Colombia ha habido un amplio desarrollo en temas de combustión (**Tabla 9S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>). Ahora bien, cuando se analizan los estudios relacionados directamente con la combustión y la prevención de incendios y explosiones, la información es más limitada. Se encontraron estudios sobre la combustión espontánea de carbón que analizan el efecto de la concentración de sodio (**Bustamante**

Rúa, *et al.*, 2019), las propiedades fisicoquímicas del carbón (Castro-Marín & Martínez, 1997) o que simulan la propagación del incendio en el manto de carbón (Bustamante-Rúa, *et al.*, 2019). También se encontraron estudios sobre el desempeño de distintas sustancias inflamables en ensayos de laboratorio típicos que incluyen datos experimentales (Serrano, *et al.*, 2020) o de simulaciones (Murillo, *et al.*, 2013, 2016, 2018; Serrano, *et al.*, 2020; Vizcaya, *et al.*, 2018), así como el análisis de datos experimentales relacionados con incendios por compartimientos (Majdalani, *et al.*, 2016), o la simulación de incendios causados por empozamiento de combustibles (Sedano, *et al.*, 2017).

Simulación

Quizás el área de mayor avance en la comprensión de incendios y explosiones es la del desarrollo de herramientas de representación física de estos dos fenómenos. Gracias a los métodos de computación actuales, se cuenta con programas, muchos de ellos de acceso libre, que sirven para estudiar los incendios y explosiones. Entre las publicaciones de instituciones colombianas fue frecuente encontrar estudios que han aplicado modelos de representación física en temas afines a los incendios (Tabla 10S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>).

No resultó una sorpresa que el número de publicaciones que estudian los incendios y explosiones mediante simulaciones fuera alto en comparación con aquellos que lo hacen por la vía experimental. A la experiencia que se tiene en simulación se suma el hecho de que la investigación experimental en esta área demanda una gran cantidad de recursos, bien sea por el costo de los equipos de caracterización o por el carácter destructivo inherente a los experimentos. Por ejemplo, recientemente se desarrollaron simulaciones (Bustamante-Rúa, *et al.*, 2019; Gutiérrez, *et al.*, 2018) para predecir la propagación de incendios en minas a cielo abierto durante la combustión espontánea del carbón que resuelven las ecuaciones de transferencia de calor y de conservación de especies en la fase sólida. En este caso, los investigadores resolvieron sus propios modelos en la plataforma de modelación Comsol (COMSOL Inc., 2021). Sin embargo, en otros estudios (Mariño, *et al.*, 2020) se emplearon herramientas de representación física más tradicionales en el área de incendios y explosiones, como el FDS, quizá el programa de mayor uso por parte de ingenieros y diseñadores para simular incendios. Otros autores han empleado el programa FireFoam (Sedano, *et al.*, 2017), una herramienta de simulación de incendios de amplio uso en la comunidad académica. El FDS se ha empleado también en estudios relacionados con Colombia en el análisis de la interacción de los aspersores y los equipos de ventilación en incendios (Moya-Forero, 2013). Incluso algunos autores han usado herramientas de representación física de dinámica de fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) tradicionales como Star CCM (Murillo, *et al.*, 2018; Pico, *et al.*, 2020b; Pinilla, *et al.*, 2019; Serrano, *et al.*, 2020) para analizar la dispersión de polvos combustibles en rangos de 20 L cuando se estudian sus propiedades de ignición.

En la revisión solo se encontraron trabajos de pregrado (Tabla 11S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>) con herramientas de modelación física como FLACS (GeXCon US Inc, 2019), PHAST (DNV, 2021) y Ansys (ANSYS Inc, 2021) para el análisis de eventos explosivos. La simulación de incendios y explosiones tiene muchos usos en la prevención y la educación para su mitigación y en los estudios forenses posteriores a un accidente. Una de las aplicaciones más interesantes es en el diseño por desempeño, en el cual las estrategias de mitigación y control contra incendios en construcciones civiles, por ejemplo, se basan en el desempeño del sistema y no en normas preestablecidas con códigos de ingeniería, práctica que hoy se usa más frecuentemente. En Colombia la investigación en herramientas de simulación física para el diseño por desempeño es algo incipiente (Cadena & Muñoz, 2013).

Radiación térmica

De los tres fenómenos en los que es posible dividir la transferencia de calor en un incendio, conducción, convección y radiación, esta última es la que domina cuando el tamaño del material combustible es superior a 0,3 m, lo que determina los procesos de crecimiento y

esparcimiento de un incendio cuando hay compartimientos (**Drysdale, 2011**). Si bien el análisis de la conducción y la convección es bastante importante, principalmente durante la ignición el primero, y cuando la radiación no es importante el segundo, la comprensión de la radiación térmica es clave para entender y predecir cómo se propaga un incendio.

En la investigación en este campo en el país, no es extraño el estudio de la radiación (**Tabla 12S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>) en ciencias básicas, de la combustión o del uso de la radiación solar como fuente de energía, pero solo se encontró un artículo relacionado con la radiación de llamas de hidrógeno (**Molina, et al., 2007**) con cierto énfasis en incendios y ninguno sobre el efecto de la radiación en estos, un tema bastante común (**Gavelli, 2021**) en las investigaciones internacionales dedicadas a incendios y explosiones.

Pirólisis, smouldering, hollín y humo

Entre las áreas revisadas, la caracterización fisicoquímica, la cinética química, la simulación y la radiación térmica son importantes en muchos campos, desde la industria química hasta la energía solar. La combustión es un área que en sí misma tiene amplia aplicación industrial. Por el contrario, aunque la pirólisis, el proceso de *smouldering*, la producción de hollín y el humo pueden ser relevantes en otros campos, tienen especial trascendencia en el estudio de incendios.

Al comienzo de un incendio se registra la producción de combustibles gaseosos provenientes de la descomposición, o pirólisis, de compuestos orgánicos. Dada la importancia de los fenómenos de descomposición de materiales combustibles en la predicción del avance de un incendio y los resultados de una explosión, resultan importantes los diferentes análisis hechos en Colombia sobre la caracterización de la pirólisis (**Tabla 13S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>), principalmente de residuos agroindustriales, carbón y materiales de desecho. Se debe destacar, sin embargo, que todos estos análisis se centran en el potencial uso comercial de la pirólisis.

El fenómeno de *smouldering*, cuya traducción al español más acertada podría ser “oxidación autónoma de un sólido”, es característica de materiales sólidos con alta porosidad que producen un carbonizado, normalmente conocido como *char* (**Drysdale, 2011**). Se asocia principalmente con procesos de calentamiento en masas grandes de material y es clave cuando se analiza cómo se esparce un incendio en superficies sólidas. En la revisión no se encontraron referencias al estudio de los fenómenos de *smouldering* o de pirólisis en la dinámica de incendios. Lo más cercano son los análisis de los procesos de secado y oxidación de alimentos, que presentan cierta similitud con los que ocurren en las primeras etapas de formación de un incendio, y los análisis del proceso de combustión *in situ* para el recobro mejorado del petróleo, que también se acercan a los procesos de pirólisis en un incendio (**Tabla 13S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>).

El hollín, sólido que se produce durante la combustión incompleta de hidrocarburos, es responsable en gran medida de la luminosidad de las llamas. Entender cómo los combustibles líquidos, los cuales pasan a la fase de vapor antes de la combustión, se convierten en pequeñas partículas sólidas ha intrigado a científicos como Faraday desde 1861 (**Faraday, 1861**). A finales del siglo XX y comienzos del XXI se hicieron muchas investigaciones para entender desde el punto de vista teórico el fenómeno, principalmente con el fin de disminuir la contaminación de material en partículas producto de los motores de combustión interna (**Michelsen, 2017**). Investigadores asociados con Colombia han hecho algunas de esos estudios (**Tabla 13S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>).

En los incendios la investigación sobre hollín es clave dada su importancia en la predicción de la radiación, la opacidad y la forma cómo se propagan. Solo se encontraron dos estudios (**Mariño, et al., 2020**; **Mariño-Sánchez, 2016**) en instituciones colombianas que analizaron la forma de simular la producción de hollín mediante FDS (**McGrattan, et al., 2021**).

Quizás más importante que el papel del hollín en los incendios es el del humo, algo tan cotidiano que su definición para el análisis ingenieril o científico resulta bastante compleja. El humo, que se puede entender como una mezcla que contiene aire arrastrado por

los procesos de combustión y productos gaseosos resultantes de la combustión de material orgánico, así como pequeñas partículas líquidas y sólidas dispersas (Drysdale, 2011), se considera responsable de más de la mitad de las víctimas mortales en incendios debido a su toxicidad y opacidad. Predecir la velocidad a la cual se transporta la capa de humo es clave para el diseño de zonas de evacuación en obras de infraestructura civil.

A nivel internacional son bastantes los estudios orientados a mejorar los modelos para predecir la dispersión del humo en incendios forestales (Prichard, *et al.*, 2019), o los que analizan la forma de integrar herramientas para el control de humos en simulaciones de incendios (Zhang, *et al.*, 2008). En esta revisión, sin embargo, no se encontraron publicaciones de investigadores en Colombia en el área de la simulación del comportamiento del humo, pero sí estudios que buscaban diseñar sistemas de detección de humo económicos en sectores económicamente vulnerables de Colombia (Aguirre, *et al.*, 2017), además de los trabajos ya citados de simulación de incendios (Mariño, *et al.*, 2020; Mariño-Sánchez, 2016; Sedano, *et al.*, 2017), los cuales también analizan la dispersión del humo durante el incendio. El análisis del humo y su aplicación en la prevención de incendios es otra área de poco desarrollo en Colombia.

Caracterización experimental

El análisis experimental de incendios y explosiones tiene muchas escalas y matices. Es posible hacer experimentos muy fundamentales que caractericen, por ejemplo, las propiedades del hollín en equipos con tamaños que van desde centímetros hasta los 6 metros. Se pueden estudiar las propiedades inflamables de sustancias en equipos de laboratorio como el calorímetro de cono, o caracterizar el incendio completo de todo un apartamento como se hizo a finales de la primera década de este siglo en Escocia (Abecassis-Empis, *et al.*, 2008), y también es factible estudiar las características explosivas de carbones en la esfera de 20 L o en minas experimentales (Sapko, *et al.*, 2000). Tanto los experimentos más relacionados con la ciencia básica, como los que involucran estructuras con tamaños más cercanos a los reales, son importantes para entender cómo se propagan los incendios y las explosiones y para prevenir que ocurran. En la revisión no se encontró evidencia de artículos sobre Colombia que estudien de forma experimental la propagación de incendios o el desarrollo de explosiones.

Evaluación de riesgos

La evaluación de riesgos es una herramienta clave en la prevención de accidentes por incendios y explosiones. Normalmente incluye pasos como la determinación de peligros, la cuantificación, evaluación, y control de riesgos y un plan de emergencias y son muchas las metodologías que buscan entender y mitigar dichos riesgos. De hecho, la evaluación de riesgos es en sí misma objeto de investigación y su aplicación incluye desde incendios forestales hasta incendios y explosiones en minas subterráneas. Se podría argumentar que toda la investigación básica y aplicada en este campo debe resultar en un análisis de riesgos que efectivamente permita evitarlos.

En las investigaciones en Colombia se han hecho análisis de riesgos de eventos relacionados con el efecto de desastres tecnológicos originados por fenómenos naturales (*natural hazard triggering technological disasters*, natech) tales como terremotos, oleaje extremo, relámpagos y truenos, accidentes volcánicos, vientos y desplazamientos de tierra, así como análisis del impacto ecológico. En la **tabla 14S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177> se dan ejemplos de investigaciones relacionadas con el análisis de riesgos en Colombia, aunque en el caso de los incendios y explosiones no hay muchos estudios de este tipo, excepto unos pocos, como el relacionado con la explosión de nanopulvos de aluminio (Vignes, *et al.*, 2012), en el que se determinaron los riesgos de incendio y explosión y las consecuencias asociadas con la producción de estas sustancias, o una evaluación del efecto dominó en poliductos por no guardar suficiente distancia entre uno y otro (Ramírez-Camacho, *et al.*, 2015), o el análisis detallado del potencial riesgo de incendios y explosiones en plantas para

la producción de aceite crudo de palma en el norte de Colombia (**Moreno-Sader, et al., 2020**), o sobre el desarrollo de planes de contingencia en la industria del petróleo (**Miranda, et al., 2003**) y el riesgo de explosiones por polvo de combustible en minas subterráneas (**William & Martínez, 1998**).

Educación

El componente educativo es clave en la mitigación de los efectos de los incendios y explosiones. La revisión se centró en los intentos por mejorar la educación sobre la prevención de incendios y explosiones a nivel superior, aunque reconociendo la importancia de la educación en todos los niveles involucrados: público general, operadores, personal de salud, personal administrativo, gobierno, entes reguladores, etc.

Se encontraron estudios (**Tabla 15S**, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/1539/3177>) asociados con investigaciones en Colombia en los que se reconoce la importancia de adecuar la educación en ciencia e ingeniería al nuevo entorno pedagógico, que involucra aspectos técnicos como el uso de herramientas virtuales o de simulación física, o pedagógicos, como la educación basada en proyectos, en la solución de problemas o en servicios, el plan padrino o el uso de juegos. Sin embargo, solo se encontró un artículo directamente relacionado con la educación para mitigar incendios y explosiones y garantizar la seguridad de los procesos como parte del ADN de la formación del ingeniero químico (**Amaya-Gómez, et al., 2019**), el cual incorpora al currículo cuatro módulos educativos sobre la importancia de la seguridad de procesos.

Explosión

Los incendios y las explosiones son eventos estrechamente relacionados, pues es común que un incendio dé lugar a una explosión y que esta, a su vez, provoque un incendio. Los fenómenos que ocurren, en forma general, son similares, ya que involucran reacciones químicas, transferencia de masa, calor y movimiento. Sin embargo, la distancia temporal entre dichos fenómenos es clave, dado que los eventos explosivos suceden en períodos mucho más cortos que los incendios.

La investigación en explosiones involucra muchas áreas: desde el análisis de las formaciones geológicas y la posibilidad de explosiones volcánicas (**Bain, et al., 2018**) hasta la pirotécnica, actividad en la que debe manejarse adecuadamente el almacenamiento para disminuir la incidencia de accidentes (**González-Toloza, et al., 2018**). En la prevención de incendios y explosiones los objetivos son minimizar la posibilidad de que tenga lugar una explosión, predecir su alcance para crear barreras que reduzcan su impacto y hacer estudios forenses sobre eventos ya pasados.

En los artículos publicados por universidades sobre Colombia no es mucha la referencia a la ciencia de las explosiones. Están las simulaciones y experimentos para caracterizar el comportamiento explosivo de mezclas de almidón de trigo y gases de pirólisis en una esfera de 20L (**Pico, et al., 2020b**) o que analizan el efecto de nanopartículas de carbono negro en la gravedad de la explosión de mezclas de gases (**Torrado, 2017**) o las características explosivas de los carbones colombianos (**Fuentes, et al., 2018**; **García-Torrent, et al., 2016**; **Ortega-Ramos, et al., 2018**). En este campo se hace especialmente evidente la ausencia de estudios académicos que exploren áreas como la simulación numérica, la caracterización de sustancias inflamables y la prevención de riesgos.

Otros aspectos

En la revisión se incluyeron estudios en diversas áreas relacionadas con incendios y explosiones, pero hay otros campos que no se exploraron. El análisis de la normatividad colombiana para mitigar incendios y explosiones es uno de ellos. En el 2012 (**Perrin, et al., 2012**) se revisó dicha normativa, específicamente la asociada con la minería, usando la metodología de *Model Analysis of Dysfunctions of the System* (MADS) y el *Method Organized for a Systematic Analysis of Risk* (MOSAR) y se encontró que los decretos vigentes en el momento, aunque claros en las sanciones, no abordaban el tema de la seguridad en la mina

en sus distintas etapas productivas. En ese estudio (Perrin, *et al.*, 2012) se hicieron varias recomendaciones, entre ellas, la de hacer el análisis en el contexto de atmósferas explosivas (directiva ATEX) en minas. La reflexión sobre el entorno regulatorio y su efectividad desde el punto de vista técnico debería ser motivo de constante evaluación por parte de la comunidad técnica en Colombia.

Otro aspecto de gran relevancia en la ingeniería para mitigar incendios y explosiones es el desarrollo del diseño por desempeño como alternativa frente al más tradicional diseño prescriptivo que ha acompañado la regulación sobre incendios y explosiones. La ingeniería para la seguridad contra incendios se enfrenta actualmente a la necesidad de incorporar las múltiples ventajas que otorga el diseño por desempeño (Cadena & Muñoz, 2013), por ejemplo, mediante el análisis de las particularidades de cada caso pero manteniendo el mismo nivel de seguridad.

Otra área de estudio es el análisis de las diferentes industrias colombianas y su viabilidad en la mitigación de incendios y explosiones a la luz de la tecnología actual. En la industria minera, por ejemplo, algunos autores (Salamanca, *et al.*, 2017) han destacado la importancia de la modernización para disminuir la incidencia de accidentes con consecuencias fatales.

Recomendaciones para la construcción de una estructura de educación enfocada en la seguridad contra incendios y explosiones

El diagnóstico presentado busca sentar las bases para la construcción de un ambiente académico que permita que en Colombia se puedan enfrentar los retos asociados con incendios y explosiones. Se debe reconocer, sin embargo, que fortalecer el entorno de investigación y de educación en este campo es una de las múltiples aristas que plantea el problema. Los entes reguladores, el compromiso de la industria con la seguridad, la salud ocupacional, la preparación y la dotación de los entes que atienden las emergencias y la educación y capacitación de los operadores, también hacen parte de este esfuerzo.

Programas curriculares

En la revisión solo se encontró un programa de posgrado directamente relacionado con el estudio de la ingeniería y su aplicación en incendios y explosiones. El desarrollo de industrias como la minera y la química, y los retos que el efecto invernadero impone en el desarrollo forestal demandan programas de pregrado y posgrado (Magnusson, *et al.*, 1995) que capaciten a los ingenieros en temas como el diseño por desempeño y su integración con el más tradicional diseño prescriptivo, la dinámica de incendios, la aplicación de herramientas de simulación en el análisis de riesgos por incendios o explosiones, las herramientas necesarias para investigación de accidentes, y el desarrollo de materiales y equipos que resistan incendios y explosiones o que las eviten. Estos múltiples temas deben estudiarse a nivel de posgrado y orientar proyectos de investigación que estudien su aplicación en Colombia.

Tales programas de educación deben soportarse en estrategias pedagógicas especialmente diseñadas para profesionales que trabajan en seguridad contra incendios y explosiones y no solo centrarse en el desarrollo del conocimiento básico, de manera que también se desarrollen competencias y habilidades (Woodrow, *et al.*, 2013) que permitan mejores diseños de seguridad contra incendios y explosiones. A la aproximación tradicional del especialista, deben agregarse estrategias que fortalezcan la autonomía de los estudiantes y permitan un mayor nivel de comprensión de los conceptos básicos (Woodrow, 2013; Woodrow, *et al.*, 2020).

En este sentido, nuestro equipo ha aplicado estrategias que generan autonomía entre el personal profesional dedicado a apoyar la prevención y la atención de emergencias en la industria minera en Colombia mediante cursos de posgrado y diplomados. En la **figura 1** se muestra el efecto de la velocidad de ventilación según lo predice el FDS en el desplazamiento de la capa de humo en un incendio cuando existe una barrera. En el curso



Figura 1. Simulación mediante FDS del efecto del viento y de una barrera de protección en una galería de una mina cuando se varía la velocidad del viento: **a)** 0,5 m/s, **b)** 1,0 m/s, **c)** 1,5 m/s y **d)** 2,0 m/s

se pide a los estudiantes que propongan una velocidad de ventilación para evitar que el humo logre llegar a un equipo socorrista. Aunque la reglamentación colombiana exige que en condiciones normales la velocidad del aire sea de 0,5 m/s, valor que normalmente escogen los estudiantes, la simulación muestra que bajo condiciones de un incendio este valor es muy bajo, incluso en la presencia de una barrera de protección. Este tipo de ejercicios fomenta la autonomía del alumno para buscar soluciones e ilustra la importancia del manejo del humo en el caso de un incendio. En cursos avanzados se explora el efecto del tamaño de la barrera, su ubicación y cómo altera el tipo de combustible el resultado de la simulación.

En estos cursos se usaron también herramientas más fundamentales de simulación, como la de dinámica de fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics, CFD*), o el programa Ansys Fluent (ANSYS, 2021), para presentar ejemplos de explosiones. Si bien la simulación de explosiones para obtener predicciones cuantitativas válidas es algo bastante complejo (Oran, 2015), su utilización con fines pedagógicos surte efecto, por ejemplo, para simular la presencia de polvo de carbón al aumentar la magnitud la velocidad de la onda explosiva originada inicialmente por la acumulación de gas metano. En este caso los estudiantes deben predecir hasta qué punto avanza la explosión si el gas metano solo se encuentra en una de las galerías pero hay una cantidad importante de polvo de carbón acumulado. La **figura 2** muestra la representación física de las galerías, donde solo la región que simula el frente de la explosión tiene una concentración de metano (6 % v) en el límite de inflamabilidad. Sin embargo, toda la mina presenta una concentración de polvo de carbón de 100 g/m³, un diámetro de partícula de 40 μm y propiedades típicas del carbón bituminoso. Aun cuando la velocidad del aire a lo largo de la mina cumple con la norma (0,5 m/s), la presencia de polvo de carbón en la mina hace que todas las galerías se vean afectadas por un rápido fenómeno explosivo. Al resolver el problema, algunos estudiantes consideran suficiente la ventilación como estrategia para evitar la propagación de la onda explosiva y no dimensionan el efecto del polvo de carbón en el resultado hasta después de la simulación.

Aunque la evaluación de los cursos fue buena, pues el 87 % de los alumnos lo calificó con 4 o más en una escala de 5 (67 %: 5 y 21 %: 4), se encontró que una de las principales dificultades fue el manejo de la herramienta de representación física, pues exigía mucho detalle, tanto en la solución como en la implementación del caso de estudio, lo cual comprometió el proceso de aprendizaje. Actualmente nuestros grupos de investigación están desarrollando un proyecto de investigación como parte de la iniciativa *Transforming Systems through Partnership* de la *Royal Academy of Engineering* que busca mejorar la integración del *software* a la enseñanza sobre seguridad contra incendios y explosiones. Una de las preguntas que este proyecto debe resolver es cuál es la mejor

herramienta computacional para enseñar la forma de integrar conceptos avanzados como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático en el control de incendios y explosiones (Xi, *et al.*, 2021).

Equipos de laboratorio

En la revisión de los antecedentes de investigación en Colombia resultó evidente que existe poca infraestructura para caracterizar las propiedades de las sustancias inflamables, sus características explosivas y, en general, el estudio de la dinámica de incendios o la magnitud de una explosión.

Una estructura de investigación y educación que apoye la prevención de incendios y explosiones debe estar soportada por equipos de laboratorio. Para explosiones se destaca el tubo Hartmann, el test de la esfera de 20 L o de 1 m³ y el horno Godbert-Greenland. En cuanto a los incendios, son claves (Berlied, *et al.*, 2010) equipos como el calorímetro de cono, la prueba de un solo artículo en llamas (*Single Burning Item test*, SBI), el análisis de propagación de llama radiante, el panel radiante, los equipos de inflamabilidad horizontal y vertical y el detector de densidad de humo.

En colaboración con la industria colombiana, los autores de este artículo han desarrollado instrumentos para hacer mediciones claves con el fin de caracterizar las propiedades inflamables y explosivas de sustancias, entre ellas, la temperatura de ignición en nube y en capa y la energía mínima de ignición, así como un equipo que demuestra el efecto del polvo de carbón en la intensidad de los procesos explosivos. Más allá del uso obvio de estos equipos en la caracterización de diferentes sustancias, es importante su integración en la educación contra incendios y explosiones. El desarrollo del diseño por desempeño exige contar con equipos para los análisis cualitativo y cuantitativo de las propiedades inflamables de distintos materiales (Berlied, *et al.*, 2010).

Investigación en ciencia básica

A pesar del marcado carácter aplicado de la prevención de incendios y explosiones, es muy importante el desarrollo de investigación en ciencias básicas que acompañe ese esfuerzo. Algunos temas importantes son el estudio de las estructuras poliméricas y cómo pueden modificarse para disminuir la posibilidad de incendio; la cinética química asociada con todos los procesos en incendios y explosiones, desde la ignición y propagación de llama hasta el desarrollo de la onda explosiva; la formación de hollín y humo, y la resistencia de materiales ante condiciones extremas. Se requieren modelos que permitan simular los diferentes aspectos del incendio o la explosión y el desarrollo de algoritmos matemáticos y

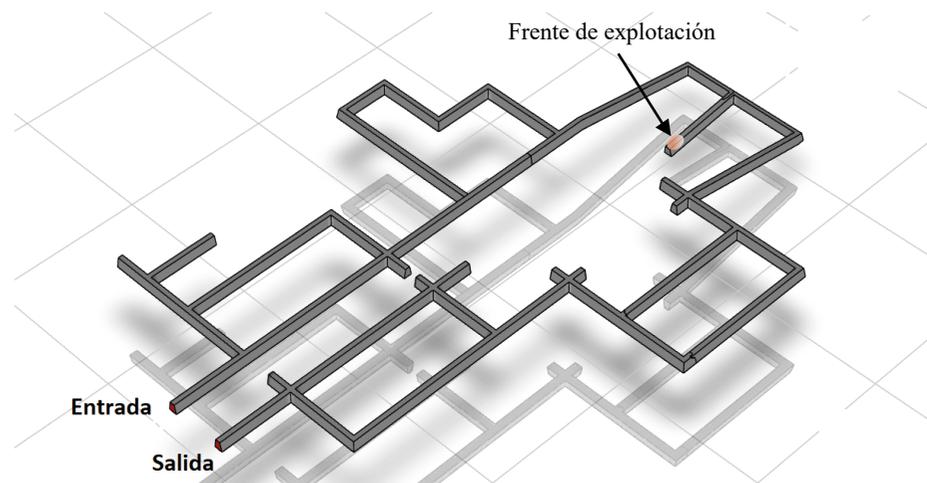


Figura 2. Representación física de la mina donde se registra una explosión. La sección transversal tiene una altura de 1,8 m y el largo es de 120 m.

de herramientas computacionales que logren resultados en los tiempos propios de quienes diseñan para evitar y controlar un incendio, para quienes atienden una emergencia o para quienes realizan los análisis forenses.

Desarrollo de habilidades de computación

A lo largo de este artículo se mencionaron diferentes herramientas de simulación física que se usan en la seguridad contra incendios y explosiones. La aplicación de sistemas de simulación física al estudio de la ciencia de incendios y explosiones es un tema con alto potencial en Colombia. Se deben desarrollar habilidades técnicas y profesionales en el manejo de herramientas como el FDS (**McGrattan, et al., 2021**), el M-Fire (**Centers for Disease Control and Prevention- CDC, 2021**), el FireFoam (**WiKi, 2021**), el PHAST (**DNV, 2021**), el FLACS, SafeSite3G o el BWTI (**BakerRisk, 2018 a,b**), así como fomentar la investigación que permita mejorar el desempeño de estos y otros programas más orientados al campo académico, como el FireFoam, y ajustarlos a las necesidades del entorno colombiano.

Una característica bastante interesante de las herramientas de simulación física de incendios es su carácter de código abierto, lo que significa que su uso y desarrollo depende en gran medida de las habilidades de quienes las aplican. Una segunda característica es que algunas de sus aplicaciones demandan un alto costo computacional. Es importante, entonces, que se aumente la aplicación de herramientas como el FDS (**McGrattan, et al., 2021**), el M-Fire (**Centers for Disease Control and Prevention-CDC, 2021**) y el FireFoam (**WiKi, 2021**) en el estudio de incendios específicamente en Colombia. El análisis de las explosiones, principalmente en lo referente a sus posibles efectos y la mitigación de los riesgos, también debe apoyarse en el uso de herramientas de simulación como el FLACS (**GexCon US, 2019**), el SafeSite3G o el BWTI (**BakerRisk, 2018 a,b**). Esto implica una mayor capacitación de los usuarios de dichas herramientas, así como su desarrollo para la resolución de los problemas específicos asociados con incendios y explosiones en Colombia. La potencial incorporación, por ejemplo, de conceptos como inteligencia artificial y aprendizaje automático a las capacidades predictivas de estos programas, tanto en el diseño como en la atención de desastres, es una línea de investigación en auge a nivel mundial (**Xi, et al., 2021**) que debe explorarse en Colombia.

Conclusiones

Al analizar el estado actual del entorno académico que soporta o puede soportar las estrategias de prevención de accidentes por incendios y explosiones resulta evidente que, aunque hay un amplio desarrollo en salud ocupacional, en la ciencia e ingeniería asociadas el desarrollo es incipiente. Entre las diferentes áreas que se consideraron de importancia para la prevención de incendios y explosiones, se encontró una actividad académica importante en lo concerniente al análisis de la combustión y la pirólisis, pero con una orientación industrial. El desarrollo en esas áreas, conjuntamente con lo aprendido en la cinética química y la radiación térmica, debe respaldar cualquier iniciativa de desarrollo de una estructura de investigación en este campo. La aplicación de los análisis estadísticos, la caracterización fisicoquímica de sustancias inflamables, los análisis de los procesos de smouldering, formación de hollín y humo, la caracterización experimental de los fenómenos de ignición y explosivos, la evaluación de riesgos, la educación de los profesionales y las particularidades de las explosiones son aspectos que exigen mayor desarrollo si se quiere incentivar la investigación y la educación en este campo.

Debe fortalecerse el desarrollo de programas curriculares centrados en los temas de ingeniería relevantes para incendios y explosiones, así como la capacidad para caracterizar las propiedades inflamables de distintos materiales, particularmente de aquellos extraídos, procesados o producidos en Colombia, y la biomasa con potencial para generar incendios forestales. Todo desarrollo en investigación y educación destinado a la aplicación, debe acompañarse del desarrollo de la ciencia básica, y esta no es la excepción. La investigación de los fenómenos de cinética química, *smouldering*, formación de hollín y humo y resistencia

de materiales en condiciones extremas son muy importantes en las estrategias para evitar y controlar incendios y explosiones. El desarrollo de submodelos que permitan simular la dinámica del incendio, la dispersión de la capa de humo y la emanación de gases tóxicos, así como la interacción de los agentes supresores de llama, los fenómenos de pirólisis y el *smouldering* en las condiciones atmosféricas de Colombia y en los materiales típicos de nuestro país, hacen parte de este enfoque en ciencia básica. Asimismo, son necesarios algoritmos matemáticos y herramientas de computación que permitan la solución de problemas tan complejos por su variabilidad en escalas y tiempos como un incendio o una explosión.

Una forma de garantizar que el desarrollo de la ciencia básica en esta área redunde en la prevención de incendios y explosiones es el avance en el área de la simulación. A la apropiación de las herramientas de representación física actualmente disponibles, la mayoría de código abierto, se deben sumar esfuerzos para su desarrollo ajustado a las condiciones específicas de Colombia. Asimismo, deben incorporarse las herramientas de inteligencia artificial y aprendizaje automático.

Agradecimientos

Se reconoce el apoyo financiero recibido de la Agencia Nacional de Minería y la Universidad Nacional de Colombia a través del convenio Interadministrativo Específico 002 de 2020 en el marco del proyecto “Formulación de centro de investigación enfocado en el estudio de incendios y atmósferas explosivas en Colombia” y por la Royal Academy of Engineering mediante el programa “Engineering X Transforming Systems through Partnership 20/21programme”, proyecto “Training for the prevention of fires and explosions through the use of data analysis and simulation.”

Información suplementaria

Tabla 1S. Ejemplo de estudios relacionados con accidentes causados por incendios y explosiones en diferentes industrias. Ver tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 2S. Centros de investigación cuyo interés principal es la prevención de accidentes por incendios y explosiones^a. Ver tabla 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 3S. Programas de posgrado exclusivamente diseñados para mejorar la seguridad contra incendios y explosiones. Ver tabla 3S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 4S. Programas de posgrado e investigaciones relacionados con la parte académica (no gerencial) de la salud ocupacional y seguridad en el trabajo en diferentes instituciones académicas colombianas. Ver tabla 4S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 5S. Investigaciones y programas de posgrados en Colombia que están relacionados con la ciencia e ingeniería de incendios y explosiones. Ver tabla 5S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 6S. Ejemplos de resumen de estadísticas de incendios y explosiones en algunos países y de estudios que las analizan. Ver tabla 6S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 7S. Estudios realizados por investigadores asociados con Colombia que incluyen la caracterización de diferentes sustancias inflamables. Ver tabla 7S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 8S. Estudios relacionados con la cinética química en procesos que involucran sustancias combustibles que han sido estudiados por investigadores en Colombia. Ver tabla 8S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 9S. Investigaciones relacionadas con la combustión realizadas por investigadores colombianos. Ver tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 10S. Artículos en los cuales se aplican modelos de representación física a temas cercanos a los incendios como la combustión y la pirólisis como aplicación industrial. Ver tabla 10S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 11S. Trabajos de pregrado relacionados con simulación de incendios y explosiones. Ver tabla 11S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 12S. Investigaciones que involucran el tema radiación térmica relacionadas con investigadores colombianos. Ver tabla 12S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 13S. Artículos relacionados con pirólisis, smoldering y la formación de hollín realizados por investigadores asociados con Colombia. Ver tabla 13S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 14S. Investigación en análisis de riesgos que se presenta por parte de investigadores asociados con Colombia. Ver tabla 14S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Tabla 15S. Investigaciones relacionadas con la aplicación de estrategias pedagógicas en el área de ingeniería. Ver tabla 15S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1539/3177>

Contribución de los autores

AM preparó el texto final con base en una revisión general de la literatura la cual contó con el aporte de JMM, AB y LJ en los temas de análisis estadístico, caracterización fisicoquímica de sustancias inflamables, caracterización experimental y explosión; de HC en el área de combustión y caracterización experimental; y de DS y SL en el área de simulación. SL y DS desarrollaron las simulaciones en CFD y FDS.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan que no conocen ningún conflicto de intereses relevante.

Referencias

- Abecassis-Empis, C., Reszka, P., Steinhaus, T., Cowlard, A., Biteau, H., Welch, S., Rein, G., Torero, J. L.** (2008). Characterisation of Dalmarnock fire Test One. *Experimental Thermal and Fluid Science*. **32** (7): 1334-1343.
- Aguirre, J., Ordóñez, A., Ordóñez, H.** (2017). Low-Cost Fire Alarm System Supported on the Internet of Things. *Advances in Computing*, p. 257-266.
- Aldana, M. C. del R. & Navarrete, N.** (2015). Epidemiology of a decade of Pediatric fatal burns in Colombia, South America. *Burns: Journal of the International Society for Burn Injuries.*, **41** (7): 1587-1592.
- Amaya-Gómez, R., Dumar, V., Sánchez-Silva, M., Romero, R., Arbeláez, C., Muñoz, F.** (2019). Process safety part of the engineering education DNA. *Education for Chemical Engineers*. **27**: 43-53.
- ANSYS.** (2021). Ansys - Fluent. ANSYS. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
- Armenteras-Pascual, D., Retana-Alumbreros, J., Molowny-Horas, R., Román-Cuesta, R. M., González-Alonso, F., Morales-Rivas, M.** (2011). Characterising fire spatial pattern interactions with climate and vegetation in Colombia. *Agricultural and Forest Meteorology*. **151** (3): 279-289.
- Bain, A. A., Calder, E. S., Cortés, J. A., Cortés, G. P., Loughlin, S. C.** (2018). Textural and geochemical constraints on andesitic plug emplacement prior to the 2004–2010 vulcanian explosions at Galeras volcano, Colombia. *Bulletin of Volcanology*. **81** (1): 1.
- BakerRisk.** (2018a). SafeSite3G©. BakerRisk. <https://www.bakerrisk.com/products/software-tools/safesite/>
- BakerRisk.** (2018b). Computational Fluid Dynamics - BakerRisk. BakerRisk. <https://www.bakerrisk.com/services/consequence-risk-analysis/computational-fluid-dynamics/>
- Berlied, M., Fajardo, E., Mackenzie, A., Tuttle, C.** (2010). Designing a fire-testing laboratory for the University of Costa Rica. Worcester Polytechnic Institute. https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-121410-215156/unrestricted/Bomberos_2010IQP_Final_Report.pdf

- Bustamante-Rúa, M. O., Daza-Aragón, A. J., Bustamante-Baena, P.** (2019). A study of fire propagation in coal seam with numerical simulation of heat transfer and chemical reaction rate in mining field. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. **29** (6): 873-879.
- Bustamante-Rúa, M. O., Daza-Aragón, A. J., Bustamante-Baena, P., Osorio-Botero, J. D.** (2019). Determinación de la influencia del sodio superficial en la susceptibilidad de los mantos de carbón a combustión espontánea en una mina a cielo abierto. *Investigación e Innovación en Ingenierías*. **7** (1): 60-71.
- Bustamante-Rúa, M. O., Daza-Aragón, A. J., Bustamante-Baena, P., Osorio-Botero, J. D.** (2019). Statistical analysis to establish an ignition scenario based on extrinsic and intrinsic variables of coal seams that affect spontaneous combustion. *International Journal of Mining Science and Technology*. **29** (5): 731-737.
- Cadena, J. E. & Muñoz, F. G.** (2013). The Link between Fire Research and Process Safety: An Evolution from Specific Needs to General Concern. *Chemical Engineering Transactions*. **31**: 679-684.
- Castro-Marín, W. & Martínez-G, C. P.** (1997). Spontaneous combustion in coal massif. *Dyna*. **123**: 43-50.
- Centers for Disease Control and Prevention- CDC.** (2021). MFIRE 4.0 Enhances Fire Modeling Capabilities. CDC. <https://www.cdc.gov/niosh/mining/content/MFIRETechNews.html>
- COMSOL INC.** (2021). COMSOL: Multiphysics Software for Optimizing Designs. COMSOL. <https://www.comsol.com/>
- DNV.** (2021). Process hazard analysis software - Phast - DNV. DNV. <https://www.dnv.com/software/services/phast/index.html>
- Drysdale, D.** (2011). *An Introduction to Fire Dynamics*. Wiley. West Sussex, Reino Unido.
- Faraday, M.** (1861). *A Course of Six Lectures on the Chemical History of a Candle: To which is Added a Lecture on Platinum*. Harper & Brothers. New York, EE.UU.
- Fuentes, R., Molina, J., Blandón, A.** (2018). Explosive Parameters for Coal Samples (Antioquia, Colombia). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. **17** (33): 19-38.
- García-Torrent, J., Fernández-Añez, N., Medic-Pejic, L., Blandón-Montes, A., Molina-Escobar, J. M.** (2016). Ignition and explosion parameters of Colombian coals. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. **43**: 706-713.
- Garzón-Serrano, A. Y., Sierra, C. A., Rodríguez-Bejarano, O., Sinuco, D.** (2020). Volatile Organic Compounds, Spectral Characterization and Morphology of Ammonium Nitrate Fuel Oil (ANFO) Samples. *Journal of Forensic Sciences*. **65** (4): 1085-1093.
- Gavelli, F.** (2021). The effect of barriers on reducing thermal heat fluxes from a hydrocarbon pool fire. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. **72**: 104554.
- GexCon US.** (2019). Flacs Software Modules. GexCon Us. <https://www.gexcon.com/us/products-services/FLACS-Software-Modules/25/en>
- Gheorghe, G. C.** (2020). Emergencias mineras mortales en Colombia (2005-2020): investigación con modelo jerárquico de causalidad de 100 eventos. Idrovo Velandia, Alvaro Javier Hernández Herrera, Gilma Norela (eds.) *Maestría en Salud Ocupacional y Ambiental*, Universidad del Rosario. <https://repository.urosario.edu.co/handle/10336/30813>
- Gheorghe, G. C., Manrique-Hernández, E. F., Idrovo, A. J.** (2021). Injuries and fatalities in Colombian mining emergencies (2005 - 2018). medRxiv. 2021.04.04.21254888.
- González-Tolosa, N. E., Blandón-Rodríguez, A. M., Díaz-Gómez, A. del P., Marcela-Huguett, C., Buitrago-Puentes, A., Forero-González, M. L., Casallas-Bedoya, V. E., Sanabria-Merchán, Y. A., Quijada-Bonilla, H., Prieto-Alvarado, F. E., et al.** (2018). Results of the intensified surveillance of injuries caused by pyrotechnic powder. Colombia, 1 December 2017-13 January 2018. *Informe Quincenal-Epidemiológico Nacional*. **23** (5): 48-58.
- Gutiérrez, G. A., Cotes, D. A., Bastidas, M. J.** (2018). Estudio de la Combustión Espontánea del Carbón durante el Acopio en la Mina El Hatillo, ubicada en Cesar, Colombia. *Información Tecnológica*. **29** (6): 287-294.
- Llamas, I., Wolfschoon, A., Rodríguez-Reyes, R. E.** (2007). Incendio de un tubo endotraqueal durante traqueostomía. *Colombian journal of anesthesiology*. **35** (1): 75-77.
- Magnusson, S. E., Drysdale, D. D., Fitzgerald, R. W., Motevalli, V., Mowrer, F., Quintiere, J., Williamson, R. B., Zalosh, R. G.** (1995). A Proposal for a Model Curriculum in Fire Safety Engineering. *Fire Safety Journal*. **1** (25): 1-88.
- Majdalani, A. H., Cadena, J. E., Cowlard, A., Muñoz, F., Torero, J. L.** (2016). Experimental characterisation of two fully-developed enclosure fire regimes. *Fire Safety Journal*. **79**: 10-19.

- Mariño, O., Muñoz, F., Jahn, W.** (2020). Soot production modelling for operational computational fluid dynamics fire simulations. *Journal of Fire Sciences*. **38** (3): 284-308.
- Mariño-Sánchez, O. A.** (2016). Implementación de modelos de producción hollín para simulaciones de incendio en FDS. F. Muñoz Giraldo, P. Ortiz, & O. D. López Mejía (eds.) *Chemical engineering*, Uniandes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/13253>
- McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanella, M.** (2021, May). FDS-SMV. FDS-SMV Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview (SMV). <https://pages.nist.gov/fds-smv/>
- Mena, J., Vera, S., Correal, J. F., López, M.** (2012). Assessment of fire reaction and fire resistance of *Guadua angustifolia* Kunth bamboo. *Construction and Building Materials*. **27**(1): 60-65.
- Michelsen, H. A.** (2017). Probing soot formation, chemical and physical evolution, and oxidation: A review of in situ diagnostic techniques and needs. *Proceedings of the Combustion Institute*. **36** (1): 717-735.
- Miranda, D., Betancur, A. M., Gutiérrez, G.** (2003). Master Plans, a New Approach for Contingency Planning in the Colombian Oil Industry. *International Oil Spill Conference Proceedings*. 2003 (1): 1189-1198.
- Molina, A., Schefer, R. W., Houf, W. G.** (2007). Radiative fraction and optical thickness in large-scale hydrogen-jet fires. *Proceedings of the Combustion Institute*. **31** (2): 2565-2572.
- Moreno-Sader, K., Alarcón-Suesca, C., González-Delgado, A. D.** (2020). Application of environmental and hazard assessment methodologies towards the sustainable production of crude palm oil in North-Colombia. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. **15**: 100221.
- Moya-Forero, D. S.** (2013). Numerical study on the interaction of sprinklers and heat vents. B. Merci (ed.) *International Master of Science in Fire Safety Engineering*, Ghent University. <http://www.cervantesvirtual.com/obra/numerical-study-on-the-interaction-of-sprinklers-and-heat-vents-858647>
- Murillo, C., Amín, M., Bardin-Monnier, N., Muñoz, F., Pinilla, A., Ratkovich, N., Torrado, D., Vizcaya, D., Dufaud, O.** (2018). Proposal of a new injection nozzle to improve the experimental reproducibility of dust explosion tests. *Powder Technology*. **328**: 54-74.
- Murillo, C., Bardin-Monnier, N., Blanchard, C., Funfschilling, D., Muñoz-Giraldo, F., Ratkovich, N., Vizcaya, D., Dufaud, O.** (2016). CFD to improve the repeatability and accuracy of dust explosion tests in the 20-liters sphere. *Chemical Engineering Transactions*. **48**: 115-120.
- Murillo, C., Dufaud, O., Bardin-Monnier, N., López, O., Muñoz, F., Perrin, L.** (2013). Dust explosions: CFD modeling as a tool to characterize the relevant parameters of the dust dispersion. *Chemical Engineering Science*. **104**: 103-116.
- Navarrete, N. & Rodríguez, N.** (2016). Epidemiologic characteristics of death by burn injury from 2000 to 2009 in Colombia, South America: a population-based study. *Burns & Trauma*. **4**: 8.
- Oran, E. S.** (2015). Understanding explosions – From catastrophic accidents to creation of the universe. *Proceedings of the Combustion Institute*. **35** (1): 1-35.
- Ortega-Ramos, C. A., Franco-Bonfante, T. M., Blandón-Montes, A., Molina-Escobar, J. M.** (2018). Evaluación del riesgo de explosividad del gas metano en minería subterránea de carbón, caso de la cuenca del Sinifaná, Colombia. *Revista Boletín de Geología*. **40** (1): 83-91.
- Perrin, L., Muñoz-Giraldo, F., Dufaud, O., Laurent, A.** (2012). Normative barriers improvement through the MADS/MOSAR methodology. *Safety Science*. **50** (7): 1502-1512.
- Pico, P., Ratkovich, N., Muñoz, F., Dufaud, O.** (2020a). CFD-DPM and experimental study of the dynamics of wheat starch powder/pyrolysis gases hybrid mixtures in the 20-L Sphere. *Powder Technology*. **372**: 638-658.
- Pico, P., Ratkovich, N., Muñoz, F., Dufaud, O.** (2020b). Analysis of the explosion behaviour of wheat starch/pyrolysis gases hybrid mixtures through experimentation and CFD-DPM simulations. *Powder Technology*. **374**: 330-347.
- Pinilla, A., Amín, M., Murillo, C., Torrado, D., Bardin-Monnier, N., Muñoz, F., Dufaud, O.** (2019). CFD Study of the Dust Dispersion in the 20L Explosion Sphere: Influence of the Nozzle Design. *Chemical Engineering Transactions*. **77**: 121-126.
- Prichard, S., Larkin, N. S., Ottmar, R., French, N. H. F., Baker, K., Brown, T., Clements, C., Dickinson, M., Hudak, A., Kochanski, A., Linn, R., Liu, Y., Potter, B., Mell, W., Tanzer, D., Urbanski, S., Watts, A.** (2019). The Fire and Smoke Model Evaluation Experiment-A Plan for Integrated, Large Fire-Atmosphere Field Campaigns. *Atmosphere*. **10** (2): 66.
- Ramírez-Camacho, J. G., Pastor, E., Casal, J., Amaya-Gómez, R., Muñoz-Giraldo, F.** (2015). Analysis of domino effect in pipelines. *Journal of Hazardous Materials*. **298**: 210-220.

- Ramírez-Rosas, C. H. & González-Sierra, M. A.** (2016). Diagnóstico de la accidentalidad en la pequeña y mediana minería subterránea de la provincia del Sugamuxi. L. A. Lara-González & Y. B. Benavides-Infante (eds.) Escuela de Ingeniería de Minas. <https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/1610/1/TGT-345.pdf>
- Romero-Ruiz, M. H.** (2011). Influence of land use, climate and topography on the fire regime in the Eastern Savannas of Colombia. K. Tansey & J. C. Berrio (eds.) University of Leicester. https://leicester.figshare.com/articles/thesis/Influence_of_land_use_climate_and_topography_on_the_fire_regime_in_the_Eastern_Savannas_of_Colombia/10102670/1
- Salamanca, J., Rodríguez, H., Fernández, A., Nino-Merchan, J. J., Rojas, V.** (2017). Modernisation of the underground coal mining sector in Colombia – a proposal from the academy. Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology. First International Conference on Underground Mining Technology. https://doi.org/10.36487/acg_rep/1710_42_salamanca
- Sapko, M. J., Weiss, E. S., Cashdollar, K. L., Zlochower, I. A.** (2000). Experimental mine and laboratory dust explosion research at NIOSH. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. **13** (3): 229-242.
- Sedano, C. A., López, O. D., Ladino, A., Muñoz, F.** (2017). Prediction of a Small-Scale Pool Fire with FireFoam. *International Journal of Chemical Engineering*. Vol. 2017, 12 pag. Doi: 10.1155/2017/4934956
- Serrano, J., Pico, P., Amín, M., Pinilla, A., Torrado, D.** (2020). Experimental and CFD-DEM study of the dispersion and combustion of wheat starch and carbon-black particles during the standard 20L sphere test. *Journal of Loss*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423019305662>
- Sierra, C., Pérez, L. D., Garzón, A., Sinuco, D., Hinestroza, J. P.** (2020). Detección de minas antipersonal que contienen explosivos tipo ANFO: una revisión. *Revista Colombiana de Química*. **49** (3): 47-57.
- Torrado, D.** (2017). Effect of carbon black nanoparticles on the explosion severity of gas mixtures. Université de Lorraine, Nancy, France (PhD Thesis). http://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC_T_2017_0199_TORRADO.pdf
- Verbeek, A., Debackere, K., Luwel, M., Zimmermann, E.** (2002). Measuring progress and evolution in science and technology – I: The multiple uses of bibliometric indicators. *International Journal of Management Reviews*. **4** (2): 179-211.
- Vignes, A., Muñoz, F., Bouillard, J., Dufaud, O., Perrin, L., Laurent, A., Thomas, D.** (2012). Risk assessment of the ignitability and explosivity of aluminum nanopowders. *Process Safety and Environmental Protection*. **90** (4): 304-310.
- Vizcaya, D., Pinilla, A., Amín, M., Ratkovich, N., Muñoz, F., Murillo, C., Bardin-Monnier, N., Dufaud, O.** (2018). CFD as an approach to understand flammable dust 20 L standard test: Effect of the ignition time on the fluid flow. *AIChE Journal*. **64** (1): 42-54.
- Wiki.** (2021, April). FireFoam - OpenFOAMWiki. Transient Solver for Fires and Turbulent Diffusion Flames with Reacting Particle Clouds, Surface Film and Pyrolysis Modelling. <https://openfoamwiki.net/index.php/FireFoam>
- William, C. M. & Martínez G, C. P.** (1998). Potential risk of explosions of combustible powder in underground mines of coal. *Dyna*. **124**: 37-53.
- Woodrow, M.** (2013). Educating engineers for a holistic approach to fire safety. J. Torero (ed.) The University of Edinburgh. <https://era.ed.ac.uk/handle/1842/8224>
- Woodrow, M., Bisby, L., Torero, J. L.** (2013). A nascent educational framework for fire safety engineering. *Fire Safety Journal*. **58**: 180-194. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711213000374>
- Woodrow, M., Gillen, A. L., Woodrow, R., Torero, J.** (2020). Investigating Varied Pedagogical Approaches for Problem-Based Learning in a Fire Safety Engineering Course. *International Journal of Engineering Education*. **36** (5): 1605-1614.
- Xi, X., Torero, J. L., Jahn, W.** (2021). Data driven forecast of droplet combustion. Proceedings of the Combustion Institute. **38** (3): 4785-4793.
- Zhang, W., Olenick, S. M., Klassen, M. S., Carpenter, D. J., Roby, R. J., Torero, J. L.** (2008). A smoke detector activation algorithm for large eddy simulation fire modeling. *Fire Safety Journal*. **43** (2): 96-107.