RIESGOS QUÍMICOS EN LA ELABORACIÓN DE PIROTECNIA

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES
DIRECCIÓN DE ANÁLISIS Y GESTIÓN DE RIESGOS
SUBDIRECCIÓN DE RIESGOS QUÍMICOS

Seguridad
Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana
CNPC
COORDINACIÓN NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL
CENAPRED
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

SECRETARÍA DE SEGURIDAD Y PROTECCIÓN CIUDADANA

Omar H. García Harfuch
Secretario de Seguridad y Protección Ciudadana

Laura Velázquez Alzúa
Coordinadora Nacional de Protección Civil

Enrique Guevara Ortiz
Director General del Centro Nacional de Prevención

D. R. Versión electrónica, junio de 2025
Ciudad de México

© SECRETARÍA DE SEGURIDAD Y PROTECCIÓN CIUDADANA
Av. Constituyentes 947, edificio B, planta alta
Col. Belén de las Flores, Álvaro Obregón, C. P. 01110, Ciudad de México
Teléfono: 55 1103 6000
www.gob.mx/sspc

© CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES
Av. Delfín Madrigal 665
Col. Pedregal de Santo Domingo, Coyoacán
C. P. 04360, Ciudad de México
Teléfono: 55 5424 6100
www.gob.mx/cenapred

Autores
Juan Alberto Reyes Rodríguez
Rubén Darío Rivera Balboa

Diseño editorial: Maricela Rojas Vázquez
Comentarios: editor@cenapred.unam.mx

Este documento tiene como objetivo proporcionar información preventiva sobre las características peligrosas de las sustancias empleadas en la elaboración de artificios pirotécnicos y orientar en el desarrollo de medidas que mejoren la seguridad en la elaboración y el manejo de estos productos. Su contenido no sustituye el cumplimiento de las normativas legales existentes ni de las prácticas técnicas especializadas. El Cenapred no asume responsabilidad alguna por el uso indebido, inapropiado o fuera de contexto que cualquier lector pudiera dar a la información contenida en este documento.

Índice

Introducción 5

1. Conceptos básicos de química **6**
1.1 El átomo 6
1.2 La molécula 8
1.3 Sustancia química 8
1.4 Enlace químico 10
1.5 Reacciones químicas 10

2. Combustión, ignición y efecto de la temperatura **12**
2.1 Combustión 12
2.2 Ignición 14
2.3 Efecto de la temperatura en las composiciones pirotécnicas 15

3. Reactividad con el agua y sensibilidad de las composiciones pirotécnicas **18**
3.1 Reactividad con el agua 18
3.2 Sensibilidad electrostática 19
3.3 Sensibilidad a la fricción 21
3.4 Sensibilidad al impacto 22
3.5 Sensibilidad térmica 24

4. Sustancias empleadas en composiciones pirotécnicas **27**
4.1 Oxidantes 27
4.1.1 Nitrato de potasio 27
4.1.2 Clorato de potasio 29
4.1.3 Perclorato de potasio 29
4.2 Combustibles 30
4.2.1 Combustibles metálicos 30
4.2.1.1 Aluminio 30
4.2.1.2 Magnesio 31
4.2.1.3 Magnalio 32
4.2.1.4 Limadura de hierro 34
4.2.2 Combustibles no metálicos 34
4.2.2.1 Fósforo 34
4.2.2.2 Azufre 35
4.2.3 Combustibles orgánicos 36
4.2.3.1 Carbón 37
4.3 Aglutinantes 37
4.4 Sustancias productoras de color 38
4.5 Combinaciones químicas peligrosas 40

5. Gestión de riesgos en la elaboración y manejo de pirotecnia **44**
5.1 Peligros de la pirotecnia 44
5.2 Medidas de seguridad 48

6. Conclusiones y recomendaciones **53**

Glosario **55**

Bibliografía consultada **61**

Introducción

Por pirotecnia (del griego *piros*: fuego y *techne*: técnica) se entiende a la técnica para la preparación de mezclas de sustancias con características combustibles y/o explosivas, y su empleo para elaborar dispositivos o productos destinados para producir luz, humo, *color* y sonido; asimismo, se usa para nombrar a estos dispositivos o productos.

En México la Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos regula las actividades y operaciones industriales y comerciales que se realizan con armas, municiones, explosivos, artificios y substancias químicas. En el caso particular de la pirotecnia, esta ley regula a las pólvoras en todas sus composiciones, los artificios pirotécnicos y, las sustancias químicas relacionadas con explosivos y todas aquellas que por sí solas o combinadas sean susceptibles de emplearse como explosivos. Asimismo, la ley clasifica como artificios pirotécnicos a los dispositivos o productos destinados para producir luz, humo, color y sonido, incluyendo desde pequeños productos (por ejemplo: luces de bengala, ollitas de luz, brujas) hasta grandes dispositivos (o *fuegos artificiales*) usados en quemas (por ejemplo: castillos, toritos, cascadas, crisantemos, canastillas voladoras, etcétera), y los considera como explosivos.

En la fabricación de pirotecnia se emplean diversas sustancias con propiedades que les hacen corrosivas, reactivas, explosivas, toxicas o inflamables por lo que es necesario y conveniente que las personas que las utilizan conozcan las características de estas, de las mezclas elaboradas y de los productos terminados; también deben conocer las medidas de seguridad necesarias para un manejo adecuado.

En el presente documento se abordan temas relativos a los riesgos químicos en la elaboración de pirotecnia, tratando de hacerlo de manera breve y procurando su fácil comprensión para sus productores. Se entiende como *riesgo* químico, a la posibilidad de que la presencia o el manejo de sustancias químicas causen efectos perjudiciales a la integridad y salud de las personas, daños al ambiente o pérdidas económicas.

En la primera sección se tratan algunos conceptos básicos de química como son: la manera en que están formadas las sustancias que se utilizan en la pirotecnia, las reacciones químicas que se producen para conseguir los efectos deseados y algunas de las características que presentan las sustancias y las mezclas usadas en la elaboración de artificios pirotécnicos.

En la segunda sección se describe la combustión de las *composiciones o mezclas pirotécnicas*, su ignición y efectos de la temperatura. En la tercera sección se describe la reactividad de las mezclas con el agua y los diferentes tipos de sensibilidad a diferentes agentes (impacto, fricción, temperatura, etcétera). En la cuarta sección se describen algunas sustancias empleadas en las composiciones pirotécnicas y sus características. En la quinta sección se incluyen recomendaciones para la gestión de los riesgos en el almacenamiento, elaboración, manejo y transporte de pirotecnia. Finalmente, la sexta sección contiene las principales conclusiones, también se incluye un glosario de los términos utilizados para una mejor comprensión, y la bibliografía consultada.

Es importante resaltar que el contenido de este documento busca advertir acerca de los principales riesgos asociados a la pirotecnia, para que sea utilidad en el desarrollo y aplicación de medidas preventivas, con la finalidad de lograr una mayor seguridad durante la producción, transporte, comercialización y uso de los artificios pirotécnicos. La falta de precaución y el manejo inadecuado de las sustancias, de las mezclas y de los productos terminados representan un riesgo para la vida y la salud de las personas involucradas en estas actividades.

1. Conceptos básicos de química

La pirotecnia es una técnica en la que se aplican diferentes conocimientos sobre química y de otras ciencias. Por ello es importante que quien se dedica a este oficio, tenga el conocimiento técnico y científico que permita una práctica segura; no sólo para quien la elabora, sino para el público que la consuma o la disfrute en un espectáculo.

Se utilizan sustancias que están constituidas, ya sea por átomos de un mismo elemento (por ejemplo: azufre, magnesio y aluminio) o por átomos de diferentes elementos en una composición fija (por ejemplo: el nitrato de potasio, cuya fórmula química es KNO_3). Las reacciones para producir calor, luz, color, gases y sonido, y por tanto su comportamiento inflamable y explosivo, están determinadas por sus propiedades químicas, y de manera particular por la tendencia de los elementos que las constituyen para ganar o perder electrones.

A continuación se presentan algunos conceptos sobre cómo están compuestas las sustancias y las reacciones mediante las cuales éstas se combinan. Estos conceptos proporcionan una base para comprender los procesos naturales, industriales y de manufactura, y en particular nos permiten entender el comportamiento de las sustancias usadas en la pirotecnia.

1.1 El átomo

Es la partícula más pequeña que aún posee las características de un *elemento químico*, está compuesto por partículas llamadas electrones, protones y neutrones. Los electrones tienen carga negativa y orbitan alrededor de un núcleo que contiene protones y neutrones; los protones tienen carga positiva y los neutrones no tienen carga.

El átomo de un elemento químico posee el mismo número de protones y electrones; sin embargo, la cantidad de neutrones es variable; ejemplo de lo anterior son el átomo de oxígeno que tiene 8 protones, 8 electrones y 8 neutrones, el átomo de hidrógeno que posee un protón, un electrón y no posee neutrones, o el átomo de sodio el cual posee 11 protones, 12 neutrones y 11 electrones. En la figura 1 se muestra la representación de un átomo de sodio, de acuerdo con el *modelo atómico de Bohr*.

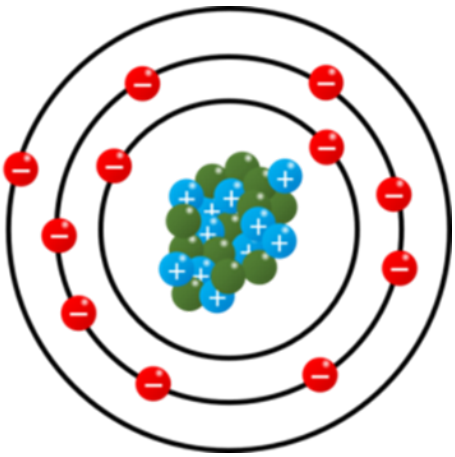


Imagen tomada de: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sodium_Atom.png

Figura 1. Representación de un átomo de sodio

La *identidad química* de un átomo está determinada por la cantidad de protones que se encuentran en su núcleo y su ubicación en la *tabla periódica* de los elementos; asimismo, el comportamiento químico de cada átomo está determinado principalmente por los electrones en el nivel más externo.

En la tabla periódica de los elementos, que se muestra en la figura 2, los elementos están ordenados en columnas o grupos. Los elementos en cada columna poseen el mismo número de electrones en su nivel más externo. Por ejemplo, los átomos de cada uno de los elementos en el grupo 1 (grupo de los metales alcalinos: litio, sodio, potasio, rubidio, cesio y francio) poseen un electrón en su nivel más externo, razón por la cual tienen un comportamiento químico similar. Los metales alcalinos se caracterizan por reaccionar vigorosamente con el agua, formando hidróxidos (como el hidróxido de sodio) y liberando gas hidrógeno.

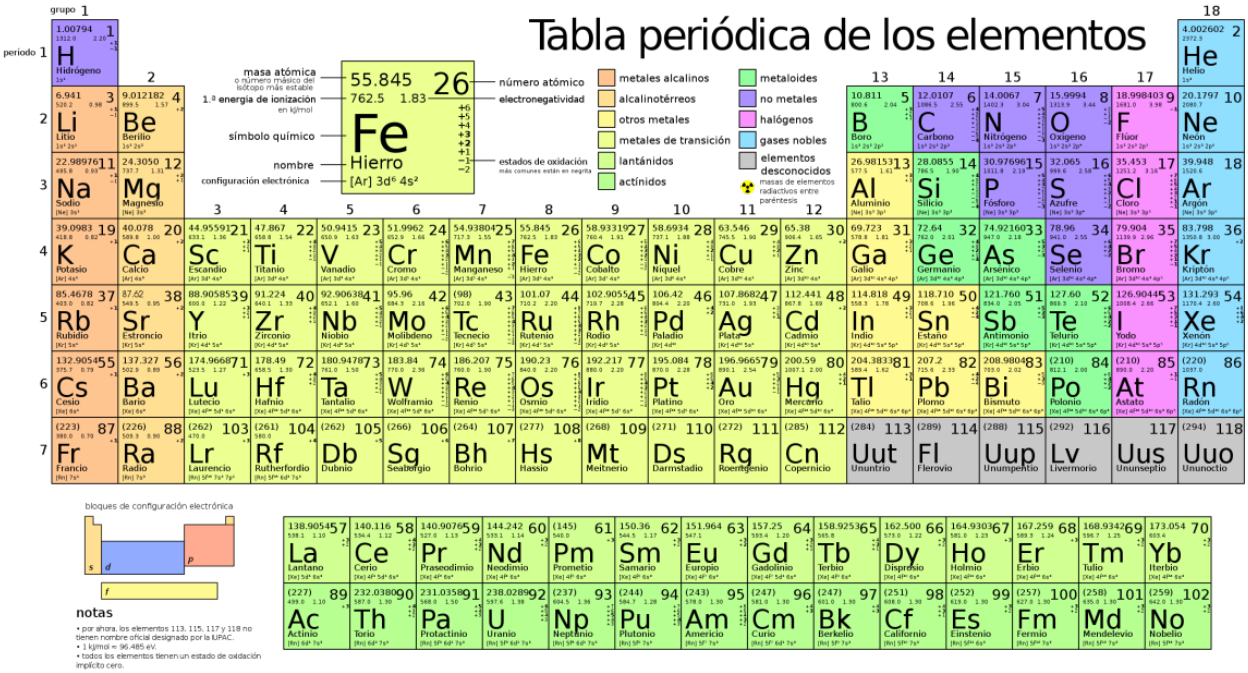


Imagen tomada de: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Periodic_table_large-es.svg
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/fe/Periodic_table_large-es.svg/2560px-Periodic_table_large-es.svg.png

Figura 2: Tabla periódica de los elementos

Cuando los átomos de un elemento se unen entre sí o con átomos de otros elementos se forma una molécula (por ejemplo, el oxígeno, O_2; y el agua, H_2O) o una *estructura cristalina* (el cloruro de sodio, azufre o otros metales presentan este tipo de estructura). Las uniones que se originan cuando los átomos se unen se les llama “enlace químico” y dependiendo del tipo de enlace serán sus propiedades.

Conocer la estructura y propiedades de los átomos es importante, ya que son necesarias para entender las reacciones químicas que se producen en la pirotecnia.

1.2 La molécula

Existen diversas definiciones de molécula, de manera general se define como la partícula más pequeña de una sustancia que mantiene todas sus propiedades físicas y químicas.

La molécula está compuesta por al menos dos átomos, ya sean iguales o diferentes, que están unidos por medio de enlaces químicos. Un ejemplo es el oxígeno (O_2), una molécula que contiene dos átomos de este mismo elemento. Otro ejemplo, pero de una molécula compuesta por átomos de diferentes elementos es el metano (CH_4) integrada por un átomo de carbono y cuatro átomos de hidrógeno unidos cada uno al átomo de carbono.

La molécula también se define como la mínima unidad que puede existir y que representa las características de una sustancia o compuesto, se representa por medio de una fórmula que es su estructura fundamental; por ejemplo: $BaCl_2$ (cloruro de bario) y FeS (sulfuro de hierro II o sulfuro ferroso).

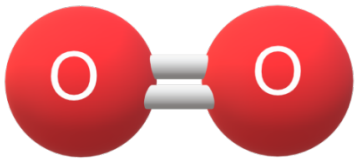


Imagen tomada de: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oxygen_O2.png
Figura 3. Representación de una molécula de oxígeno

La mayoría de las moléculas pueden someterse a procedimientos de ruptura de sus enlaces químicos, transformándose en moléculas más simples o en elementos químicos puros.

Las moléculas se diferencian de los *iones*, por ejemplo el ion perclorato ClO_4^-, principalmente en que estos últimos constituyen unidades químicas cargadas eléctricamente, mientras que las moléculas son neutras.

Los iones se forman cuando un átomo gana o pierde electrones, de esta manera los iones adquieren una carga eléctrica permanente positiva si los átomos pierden electrones (cationes) o negativa si ganan electrones (*aniones*). Por ejemplo, el *catión* sodio (Na^+) y el anión cloruro (Cl^-) que se obtienen al disolver el cloruro de sodio o *sal* común en agua. También existen iones poliatómicos, que son varios átomos unidos mediante *enlaces covalentes*, pero que en conjunto poseen una carga eléctrica. Por ejemplo, los aniones nitrato (NO_3^-) y clorato (ClO_3^-) que tienen una carga negativa; el catión hidronio (H_3O^+) y el catión amonio (NH_4^+) que tienen una carga positiva. Debido a su carga eléctrica, la manera en que reaccionan los iones es muy distinta a como lo hacen las moléculas.

1.3 Sustancia química

Una sustancia química es un material que tiene una composición fija y químicamente definida, cuyas propiedades físicas y químicas son únicas, y no es posible separar mediante métodos físicos (como son la decantación, filtración, destilación o evaporación).

Se clasifican en simples o compuestas; las sustancias simples compuestas por átomos iguales, por ejemplo: cobre (Cu), oxígeno (O_2), tetrafósforo o fósforo blanco (P_4) y sodio (Na). Las sustancias compuestas, también llamadas “compuestos”, están constituidas por átomos de

elementos diferentes enlazados unos con otros en una proporción definida; por ejemplo: agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), ácido fosfórico (H_3PO_4) o sulfato de calcio ($CaSO_4$).

Los átomos que constituyen a una sustancia, no están simplemente mezclados, sino que están unidos entre sí de una manera específica. La presencia de diferentes tipos de átomos, su número, distribución y la forma en que se enlazan, originan sus propiedades distintivas (como son la *temperatura de fusión* y la temperatura ebullición).

Asimismo, de acuerdo con los elementos que las constituyen y sus propiedades, se clasifican como: moleculares, iónicas, atómicas y metálicas. Hay algunas que se ajustan exclusivamente a una de las categorías anteriores, aunque la gran mayoría tiene características de varias de ellas. En la tabla 1 se presentan algunas de sus características y ejemplos de las sustancias usadas en la pirotecnia.

Tabla 1. Clasificación de las sustancias químicas de acuerdo con los elementos que las constituyen y sus propiedades

	Sustancias moleculares	Sustancias iónicas	Sustancias metálicas	Sustancias atómicas
Elementos químicos constituyentes	No metal[1] y no metal[1], por lo menos uno de baja capacidad de enlace	Metal[2] y no metal[1]. (hay excepciones)	Metal[2]	No metales[1] de alta capacidad de enlace (Ejemplos: C, Si, N, B)
Unidades estructurales	Moléculas	Cationes y aniones	Iones positivos (en un “mar de electrones")	Átomos
Tipo de enlace	*Enlace covalente* entre los átomos que forman la molécula	*Enlace iónico* entre los cationes y los aniones	*Enlace metálico*	Enlace covalente
Estados físicos a temperatura ambiente	Gaseoso Líquido Sólido	Sólido	Sólido Líquido	Sólido
Ejemplos	Cloro (Cl_2), dióxido de carbono (CO_2), amoniaco (NH_3), monóxido de nitrógeno (NO), metano (CH_4), agua (H_2O), benceno (C_6H_6), fósforo blanco (P_4), azufre (*octaazufre*, S_8)	Nitrato de potasio (KNO_3), óxido de magnesio (MgO), óxido de hierro (FeO), perclorato de potasio ($KClO_4$), clorato de potasio ($KClO_3$), sulfato de potasio (K_2SO_4)	Mercurio (Hg), sodio (Na), magnesio (Mg), aluminio (Al), hierro (Fe), aleaciones como el magnalium	Carburo de silicio (CSi), carburo de boro (B_4C), grafito, diamante

[1] Los no metales son elementos de la tabla periódica que no son buenos conductores de la corriente eléctrica y el calor, por ejemplo: hidrógeno, carbono, nitrógeno, oxígeno, fósforo y azufre.

[2] Los metales o metálicos son elementos de la tabla periódica que se caracterizan por ser buenos conductores de la electricidad y del calor. Dentro de los metales se encuentran los metales alcalinos (como el sodio) y los metales alcalinotérreos (como el magnesio).
Elaborado con información de: Universidad Nacional del Litoral (2014). "Química. Conceptos fundamentales".

1.4 Enlace químico

Cuando los átomos se unen entre sí o con átomos diferentes para crear compuestos químicos, ocurre un proceso llamado enlace químico, en el que los electrones se comparten o transfieren debido a la atracción entre los electrones cargados negativamente y los núcleos cargados positivamente. Generalmente, los electrones más externos del átomo son los que participan en los enlaces químicos.

Los átomos con estructuras de electrones similares también tienen propiedades químicas similares. Por ejemplo, el litio, sodio, potasio, rubidio y cesio tienen en su último *nivel de energía* un electrón y son muy reactivos, perdiendo con facilidad este electrón para formar cationes con carga +1 y reaccionan con el agua para producir bases fuertes como es el hidróxido de sodio (NaOH), esta reacción es violenta por lo que deben manipularse con mucho cuidado.

Existen distintos tipos de enlaces químicos: iónicos, covalentes y metálicos, los cuales permiten que los átomos adquieran una mayor estabilidad.

Los enlaces son muy importantes ya que al reaccionar químicamente las diferentes sustancias de una composición o mezcla pirotécnica, se rompen y se crean nuevos enlaces entre los elementos liberándose energía, que se manifiesta como calor, luz y sonido. En las siguientes ecuaciones se indica la cantidad de energía térmica (calor) producida por cada gramo de la mezcla que reacciona.

$$Zn + S \rightarrow ZnS + \text{energía}$$

La energía producida en la reacción es: 8 kJ/g **= 1.91 kcal/g**

$$4\ KNO_3 + 5\ C \rightarrow 2\ K_2O + 2\ N_2 + 5\ CO_2 + \text{energía}$$

La energía producida en la reacción es: 1.548 kJ/g **= 0.37 kcal/g**

1.5 Reacciones químicas

Las reacciones químicas ocurren cuando los átomos se combinan en proporciones específicas (por ejemplo, un átomo de potasio y uno de cloro), para crear compuestos químicos, como es el cloruro de potasio (KCl).

En los espectáculos pirotécnicos, se utilizan diferentes sustancias para crear efectos visuales y sonoros. Entre las que se incluyen a los combustibles y oxidantes. El combustible, que puede ser un compuesto orgánico o un metal, ayuda a iniciar la reacción mientras que el oxidante proporciona el oxígeno necesario para que la reacción continúe. Cuando ambos se combinan en las condiciones adecuadas, ocurre una reacción llamada reacción de oxidación-reducción (Redox). Durante esta, el combustible pierde electrones (se oxida) y el oxidante los gana (se reduce), provocando la liberación de energía en forma de calor, luz y sonido, creando así los fuegos artificiales que vemos y escuchamos.

En la tabla 2 se presenta la reacción de combustión de una pólvora a base de nitrato de potasio, donde el nitrógeno y el azufre se reducen (ganan electrones, pasando de +5 a 0 y de 0 a -2, respectivamente) y el carbono se oxida (pierde electrones, pasando de 0 a +4,). El total de electrones intercambiados en la reacción es de 12 y se produce energía en forma de calor y gases (dióxido de carbono y nitrógeno).

Tabla 2. Reacción de combustión de la pólvora negra y estados de oxidación de los átomos

	Estado de oxidación de los átomos
	+1 +5 -2 0 0 +1 -2 +4 -2 0
Ecuación de la reacción	$2\ KNO_3 + 3\ C + S \rightarrow K_2S + 3\ CO_2 + N_2$ + Energía

En las ecuaciones de oxidación-reducción se indica el número de átomos o moléculas que reaccionan (reactivos) y que se producen (productos). Esto nos permite determinar mediante cálculos matemáticos la cantidad en peso o en porcentaje de cada sustancia que se requiere (por ejemplo, para una composición pirotécnica) y la cantidad de los productos de la reacción (por ejemplo, la cantidad de gases producidos). También se emplea para evitar agregar en exceso alguna sustancia y desperdiciarla al consumirse la aquella con la cual debería reaccionar.

2. Combustión, ignición y efecto de la temperatura

La combustión es una reacción química entre el oxígeno y un material oxidable, que se acompaña del desprendimiento de energía y habitualmente se manifiesta con incandescencia o llama. La combustión pirotécnica es diferente a una combustión normal, debido a que la fuente de oxígeno no proviene del aire, sino que proviene de sustancias inorgánicas que contienen al oxígeno.

La ignición es el proceso que pone en marcha la combustión de una composición pirotécnica, la cual es posible usando diferentes tipos de energía. Asimismo, la temperatura ambiental a que está expuesta es un factor que influye en la ignición, ya que causa cambios físicos y químicos en sus constituyentes.

El desempeño exitoso de un artificio pirotécnico depende de su capacidad para iniciar la combustión mediante un estímulo externo (llama, impacto, etc.), su capacidad de mantener o propagar la combustión por el resto de la composición, así como su estabilidad en ausencia de estos estímulos y con la temperatura.

2.1. Combustión

Se define como la acción y efecto de arder o quemar, o como la reacción química entre el oxígeno y un material oxidable (combustible), acompañada de desprendimiento de energía y que normalmente se manifiesta con incandescencia o llama. Por ejemplo, la reacción de combustión del metano (gas natural) es la siguiente:

$$CH_4 + 2\,O_2 \rightarrow CO_2 + 2\,H_2O + \text{Calor}$$

$$\text{Metano (combustible)} + \text{Oxígeno (oxidante)} \rightarrow \text{productos} + \text{Calor}$$

Las composiciones pirotécnicas son una mezcla de materiales constituidas principalmente por un combustible y un oxidante. Por ejemplo, la pólvora negra está compuesta de las siguientes sustancias y su porcentaje en peso: KNO_3, 75 %; C, 15 %; S, 10 %. Estas composiciones debido a que contienen un oxidante (por ejemplo, KNO_3, $KCIO_4$) son capaces de producir una reacción autosostenida (que se mantiene por sí misma) cuando se calienta a una temperatura determinada (llamada *temperatura de ignición*), produciendo un efecto visible o audible (llamas, *chispas*, humos o sonido). Por ejemplo, la reacción de combustión de una pólvora a base de perclorato de potasio (65.8 %) y aluminio (34.2 %), es la siguiente:

$$3\,KCIO_4 + 8\,AI \rightarrow 3KCI + 4\,AI_2O_3 + \text{Calor}$$

$$\text{Perclorato de potasio (oxidante)} + \text{Aluminio (combustible)} \rightarrow \text{productos} + \text{Calor}$$

En la reacción anterior el cloro del perclorato de potasio se reduce (gana electrones, pasando de + 7 a -1) y el aluminio se oxida (pierde electrones, pasando de 0 a + 3).

En la pirotecnia las reacciones de combustión además de proporcionar efectos visuales y sonoros, los gases producidos se emplean para dar movimiento o impulsar en el aire a los fuegos artificiales. Los cohetes pirotécnicos experimentan reacciones de oxidación-reducción para producir gases calientes a alta presión que los impulsan y permiten se eleven del suelo. Por ejemplo, la combustión de un gramo de pólvora negra produce aproximadamente de 1.6 a 1.87 litros de gases calientes (la temperatura de combustión de la pólvora es

aproximadamente 1400 °C) que impulsa al cohete; esta cantidad de gases equivale a un volumen de 0.270 a 0.313 litros, a una temperatura de 25 °C y una atmósfera de presión. En este ejemplo se observa que el volumen de los gases calientes es casi seis veces mayor que el volumen considerado a 25 °C.

Imagen tomada de: Instituto Mexiquense de la Pirotecnia (IMEPI, 2019).

Figura 4. Salida de gases de un cohete

En la tabla 3 se muestran las ecuaciones de reacción y la cantidad de energía que producen dos tipos de pólvora. La manera en que se calcula la energías producida va más allá del propósito de esta guía; sin embargo, se observa que la combustión de la pólvora con clorato de potasio se genera casi tres veces más energía por gramo que la generada por la pólvora a base de nitrato de potasio (pólvora negra), esta característica es muy importante.

Tabla 3: Ecuaciones de reacción y cantidad de energía liberada por dos tipos de pólvora

La pólvora negra elaborada con 75 % de nitrato de potasio, 15 % de carbón vegetal y 10 % de azufre, tendría la siguiente ecuación de reacción: $2\ KNO_3 + 3\ C + S \rightarrow K_2S + N_2 + 3\ CO_2$ Un gramo de pólvora negra produce una energía de 1300 *Joule* (310.50 *calorías*) en forma de calor.
Una pólvora elaborada con 78.8 % clorato de potasio, 5.8 % carbón vegetal y 15.4 % azufre, tendría la siguiente ecuación de reacción: $4\ KClO_3 + 3\ C + 3\ S \rightarrow 4\ KCl + 3\ CO_2 + 3\ SO_2$ Un gramo de esta pólvora produce una energía de 3600 Joule (859.85 calorías) en forma de calor.

Elaborado a partir de: Fernando Ignacio de Prada Pérez de Azpeitia (2014). Petardos, cohetes y mucha química.

2.2 Ignición

La ignición de las composiciones pirotecnias es muy particular, ya que el oxígeno necesario para iniciar la combustión no proviene del aire, sino de ciertas sustancias que contienen oxígeno llamadas oxidantes (como es el nitrato de potasio, KNO_3).

Para que se produzca la ignición, una porción de la composición pirotécnica tiene que calentarse a su temperatura de ignición. Esta temperatura se define como la temperatura mínima requerida para que inicie una *reacción exotérmica* rápida y que se propague por sí misma. Después de la ignición, la reacción continúa por sí sola, propagándose a través del resto de la composición, en ausencia de cualquier aporte adicional de energía o del oxígeno en la atmósfera.

En la Tabla 4 se presentan las temperaturas de fusión y las temperaturas de ignición para algunas composiciones pirotécnicas.

Tabla 4. Temperaturas de fusión y de ignición para diferentes composiciones pirotécnicas.

Componente	Punto de fusión, en °C	Temperatura de ignición, en °C
$KClO_3$ **Azufre (S)**	356 119	150
$KClO_3$ **Lactosa**	356 202	195
$KClO_3$ **Magnesio (Mg)**	356 649	540
KNO_3 **Azufre(S)**	334 119	340
KNO_3 **Lactosa**	334 202	390
KNO_3 **Magnesio (Mg)**	334 649	565
Pólvora negra **(KNO_3, S, Carbón)**	334 (KNO_3) 119 (S)	340 (350)[a]
Pólvora flash **($KClO_4$, S, Al)**	610 ($KClO_4$) 114 (S) 660 (Al)	450
Petardo chino **($KClO_3$, S, Al)**	356 ($KClO_3$) 114 (S) 660 (Al)	150

a: 350° C, según referencia en Kosanke K. (2004)

Elaborada a partir de: Conkling J.A. y Mocella C.J. (2010), Chemistry of pyrotechnics; Kosanke K., (2004), Lecture Notes for Pyrotechnic Chemistry. Pyrotechnic Reference Series No. 2.

La ignición de una composición pirotécnica se logra usando una variedad de tipos de energía. Los métodos tradicionales, como la llama, la chispa, el impacto y la fricción, siguen siendo los más utilizados para lograr la ignición; también se emplea el encendido mediante corriente

eléctrica. Asimismo, la manera más común de encendido es por medio de la energía en forma de calor proporcionada a través de una mecha, en la figura 5 se muestra este proceso.

Imagen tomada de: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Smoke_bomb_with_burning_fuse.jpg

Figura 5. Ignición de artificio pirotécnico mediante una mecha

Las composiciones pirotécnicas deben tener la capacidad de encender fácilmente al aplicarles una fuente de energía; sin embargo, es fundamental que éstas sean seguras, estables y capaces de producir los efectos deseados cuando se requiera y no de manera espontánea o por descuido durante su preparación o manejo. Estas características son muy importantes durante su elaboración, almacenamiento, transporte y uso, ya que permite evitar que ocurra un incendio o una *explosión*.

2.3 Efecto de la temperatura en las composiciones pirotécnicas

La temperatura está relacionada con la cantidad de energía que poseen los átomos, y esta energía aumentará a medida que aumenta la temperatura a la que se encuentra la composición pirotécnica. Para que los átomos de una sustancia reaccionen con los átomos de otra se requiere que estén en contacto y que posean una cantidad mínima de energía a la que se denomina “energía de activación”.

En una composición en la cual el combustible y el oxidante son partículas sólidas, existen muy pocos átomos del combustible y del oxidante que en sus superficies tengan la energía suficiente y que estén en contacto para poder reaccionar.

Kosante K. (2004) estima que a temperatura ambiente, el número de átomos del combustible y oxidante con energía suficiente para reaccionar y que se encuentren en contacto es aproximadamente de uno en 600 000 billones. A medida que aumenta la temperatura, la cantidad de átomos con energías suficientes para reaccionar se incrementa; aunque no necesariamente serán los suficientes para que ocurra una ignición.

Imagen tomada de: Kosanke K., (2004). Lecture Notes for Pyrotechnic Chemistry. Pyrotechnic Reference Series No. 2

Figura 6. Representación del contacto entre las superficies del combustible y el oxidante en una composición pirotécnica

En la figura 7 se presenta un esquema sobre el efecto del aumento en la temperatura de una composición pirotécnica.

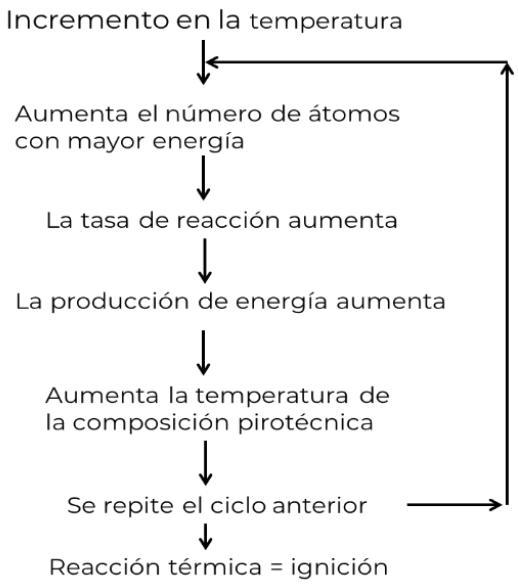


Imagen tomada de: Kosanke K., Kosanke B. (2013). Lecture Notes for Pyrotechnic Chemistry. Pyrotechnic Reference Series No. 4

Figura 7. Efecto de la temperatura en una composición pirotécnica

En la figura 7 se muestra que el calentamiento de una composición pirotécnica es un ciclo en el cual la temperatura se incrementa progresivamente hasta alcanzar la temperatura de ignición. Sin embargo, como se observa cotidianamente un ligero aumento de temperatura no suele provocar su ignición, ya que en esta figura sólo se ha considerado cómo se produce el calor, y falta considerar cómo el calor se transmite al ambiente. La ganancia de calor de una composición pirotécnica no es afectada por su tamaño (cantidad de la composición), pero la tasa de pérdida de calor (cantidad de calor que se transmite al ambiente en un determinado

tiempo) sí depende del tamaño de la muestra, debido a un efecto de *aislamiento térmico*; es decir el calor se acumular en el interior de la mezcla y la parte externa actúa como aislante. En el caso de los artificios pirotécnicos el efecto de aislamiento térmico se vería incrementado debido, por ejemplo, al producido por el cilindro de papel o cartón de un cohete, o por el papel que recubre una paloma, así como las envolturas, caja o recipiente que impidan o dificulten que el calor se transmita al ambiente.

Hay que tener presente que la temperatura necesaria para que la reacción de combustión inicie y se propague de manera espontánea depende de factores como son: la temperatura ambiente, el tamaño o cantidad de la composición pirotécnica, los componentes (por ejemplo: la adición de azufre o de algunos aglutinantes afectan la temperatura de ignición) y el aislamiento térmico producido por la propia composición, así como del recipiente que la contiene.

En diversas investigaciones se ha observado que la temperatura a que están expuestas las composiciones pirotécnicas, y en general los artificios pirotécnicos, es un factor muy importante que afecta su seguridad. Debido a esto se recomienda que la pirotecnia no se exponga a temperaturas elevadas (por ejemplo, en la cajuela o dentro de vehículos que estén expuestos al sol), manteniéndola almacenada a temperaturas moderadas o frescas y con ventilación suficiente.

3. Reactividad con el agua y sensibilidad de las composiciones pirotécnicas

Durante el proceso de elaboración de las composiciones pirotécnicas, se mezclan diferentes sustancias para crear una mezcla uniforme de oxidante, combustible, aglutinante y otros componentes. Para realizar esta actividad de manera más segura, es importante que los fabricantes conozcan cómo reaccionan y qué tan sensibles son a los diferentes estímulos de encendido.

De manera general la reactividad es la tendencia de una sustancia a reaccionar con otra; en esta sección se tratará en particular, la reactividad con el agua en las composiciones pirotécnicas. Asimismo, se entiende por sensibilidad, al nivel del estímulo necesario para provocar la ignición de una composición pirotécnica, en donde el estímulo es la energía proporcionada, ya sea por fricción, impacto (golpe), calor o chispas.

La sensibilidad a la ignición accidental se clasifica en cuatro clases o tipos: electrostática, a la fricción, al impacto y térmica.

Todas las mezclas empleadas en la pirotecnia se elaboran para quemarse rápidamente y liberar energía, por lo que es necesario conocer su sensibilidad a los diferentes estímulos de encendido. Determinar esta característica es esencial para garantizar su ignición segura y solo cuando sea necesario; asimismo, debido a que depende de las sustancias utilizadas en las composiciones y de las cantidades o proporciones usadas, es importante que los fabricantes la evalúen para los diferentes estímulos.

3.1 Reactividad con el agua

La reactividad con el agua o reactividad al agua, es una expresión de la posibilidad de que se produzcan reacciones químicas que generen calor, gases u otras reacciones no deseadas, debido a la presencia de agua. Una composición pirotécnica que contiene agua (por ejemplo, debido a que una sustancia es higroscópica o al empleo de un aglutinante acuoso), puede producir reacciones químicas no deseadas generando calor y gases, por ejemplo:

- La producción de gas hidrógeno, que no tiene un olor pero es un gas altamente inflamable y produce *atmósferas explosivas*:

$$Mg + 2\,H_2O \longrightarrow Mg(OH)_2 + H_2(g)$$

- La producción de gas amoniaco, que es detectable por su olor:

$$6\,KNO_3 + 16\,AI + 9\,H_2O \longrightarrow 6\,KAIO_2 + 5\,AI_2O_3 + 6\,NH_3(g)$$

- La producción de gas amoniaco y de hidrógeno:

$$Mg + 2\,NH_4^+ \longrightarrow Mg^{2+} + 2\,NH_3(g) + H_2(g)$$

El ion amonio (NH_4^+) es lo suficientemente ácido como para reaccionar con el magnesio; asimismo, el nitrato de amonio (NH_4NO_3) y el perclorato de amonio (NH_4ClO_4), usadas comúnmente son sustancias higroscópicas.

Algunas mezclas con las que se debe tener especial cuidado son:

- Las mezclas que contienen nitratos, cloratos o percloratos y magnesio pueden reaccionar violentamente y encenderse, especialmente cuando están húmedas.
- Las mezclas que contienen nitratos y polvo de aluminio tienden a calentarse espontáneamente y encenderse, especialmente cuando están húmedas. En estas el nitrato reacciona con el aluminio, formando compuestos de aluminio y amoniaco. Estos compuestos reaccionan a su vez con el polvo de aluminio en una reacción exotérmica y es posible la ignición.
- El polvo de zinc en presencia de nitrato de amonio puede calentarse espontáneamente en condiciones de alta humedad. En la práctica, las mezclas de nitrato y zinc se pueden usar con un aglutinante acuoso sólo si no hay ingredientes ácidos o alcalinos presentes para que inicien su descomposición. Sin embargo, es bueno ser consciente de este problema potencial.

3.2 Sensibilidad electrostática

La sensibilidad electroestática es una medida de la tendencia de un material a encenderse a partir de la energía suministrada por una descarga eléctrica (o *descarga electroestática*) en forma de chispa eléctrica. Se mide en términos de la energía de chispa (en *Joules o Julios*), que provoca una ignición en un porcentaje específico de repeticiones de la prueba.

En la figura 8 se muestra un esquema el equipo empleado para su determinación, y en la figura 9 se muestra un ejemplo del equipo. El medio por el cual se logra la ignición de una muestra de la composición pirotécnica es el calentamiento provocado por la chispa que la atraviesa.

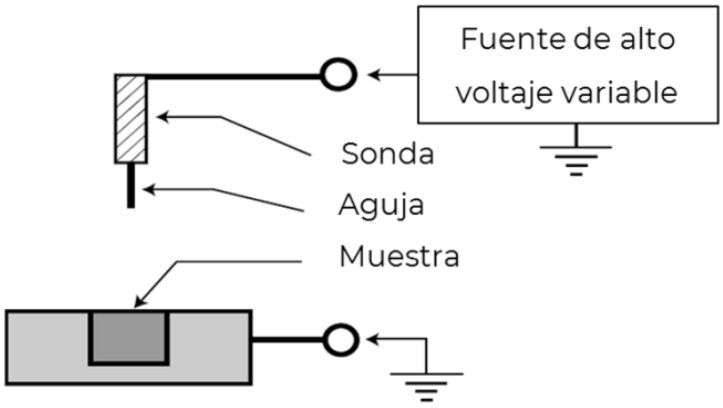


Imagen tomada de: The illustrated dictionary of pyrotechnics. Kosanke B. J.

Figura 8. Representación del equipo empleado para determinar la sensibilidad electroestática

Imagen tomada de: OSM Research. Advanced Testing Instruments for Explosive Materials https://mueller-instruments.de/fileadmin/Bilder/2023/OZM-Product-Catalogue-2023-2024-Energetic-Materials_small.pdf

Figura 9. Equipo para determinar la sensibilidad electroestática

Las composiciones pirotécnicas que contienen metales conductores suelen tener una alta sensibilidad electrostática Asimismo, la presencia de algunas sustancias empleadas como combustibles en las composiciones hace que esta característica sea relevante, especialmente cuando se encuentran en partículas finas, en comparación a cuando se encuentran en granos más gruesos. El fósforo, circonio y boro son conocidos por su sensibilidad electroestática. Los granos finos de magnesio o aluminio aumentan esta sensibilidad, y las mezclas de oxidante y combustible que tenga granos finos son significativamente más sensibles a las chispas que las elaboradas con granos más gruesos.

En la tabla 5 se muestra la sensibilidad electrostática de varios tipos de pólvora, en donde la mezcla 6 es 264 veces más sensible que la mezcla 1. Las mezclas 2 y 4 son utilizadas usualmente en la pirotecnia de trueno y producen esencialmente la misma intensidad de sonido; sin embargo, existe un factor de aproximadamente 4 veces en sus sensibilidades a las descargas electrostáticas.

Tabla 5. Mezclas de pólvora y su sensibilidad electrostática (al 50% del número de pruebas)

Ingredientes	1	2	3	4	5	6
Perclorato de potasio	30	67	--	64	--	67
Clorato de potasio	--	--	--	--	63	--
Nitrato de bario	30	--	--	--	--	--
Pólvora negra	--	--	91	--	--	--
Aluminio	40	--	9	22	--	--
Aluminio (negro)	--	33	--	--	--	--
Sulfuro de antimonio	--	--	--	4	--	--
Azufre	--	--	--	10	--	--
Titanio	--	--	--	--	--	33
Goma arábiga	--	--	--	--	5	--
Sensibilidad electroestática, en Joule (en mJ)	1.32 J (1320 mJ)	0.37 J (370 mJ)	0.22 J (220 mJ)	Menor a 0.1 J (100 mJ)	Menor a 0.05 J (50 mJ)	0.005 J (5 mJ)

Tabla tomada de: Kosanke K., (2004). Lecture Notes for Pyrotechnic Chemistry. Pyrotechnic Reference Series No. 2.

Cuando se usan disolventes orgánicos como son la acetona y el alcohol en las composiciones pirotécnicas, puede formarse una atmósfera explosiva sensible a las chispas, con una sensibilidad a veces por debajo de 1 mJ (0.001 Joules). Esta situación se presenta particularmente durante el secado de la composición, al formarse una capa de vapor del disolvente sobre la superficie de la composición, que podría encender fácilmente por la descarga de la electricidad estática acumulada por una persona (aproximadamente 15 mJ o 0.015 Joules), lo que representa un peligro que se mantendría hasta que todo el disolvente se haya evaporado.

Hay que considerar que la sensibilidad electroestática puede variar mucho para una mezcla dada de oxidante y combustible, debido al tamaño de la partícula del combustible y el estado de oxidación de la superficie del combustible; así como por otros factores como son: la homogeneidad de la composición y la humedad. Por esta razón, el fabricante debe tener mucho cuidado y no confiar plenamente en los resultados obtenidos para composiciones distintas a la que él produce.

También debe considerarse que los fabricantes de pirotecnia generalmente desconocen la sensibilidad electroestática de las diversas composiciones que elaboran, por lo que es muy importante establecer medidas para prevenir la acumulación de electricidad estática y contar con sistemas que permitan su descarga, como son las barras de descarga electroestática y la *red de puesta a tierra*.

3.3 Sensibilidad a la fricción

La sensibilidad a la fricción es una medida de la tendencia de un material a encenderse en respuesta a la energía proporcionada en forma de fricción. Existen diferentes tipos de equipos para determinarla, de manera general en estos equipos una muestra de la composición pirotécnica se coloca entre dos superficies, que se presionan entre sí, en el ensayo se mueven ambas superficies una respecto de la otra. En la figura 10 se presenta de manera esquemática el equipo empleado para su determinación, y en la figura 11 se muestra el equipo utilizado.

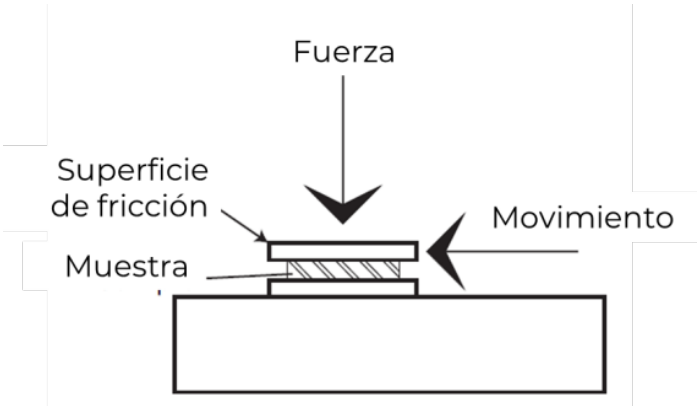


Imagen tomada de: Kosanke K., (2013). Pyrotechnic Chemistry. Pyrotechnic Reference Series No. 4.

Figura 10. Representación del equipo para determinar la sensibilidad a la fricción

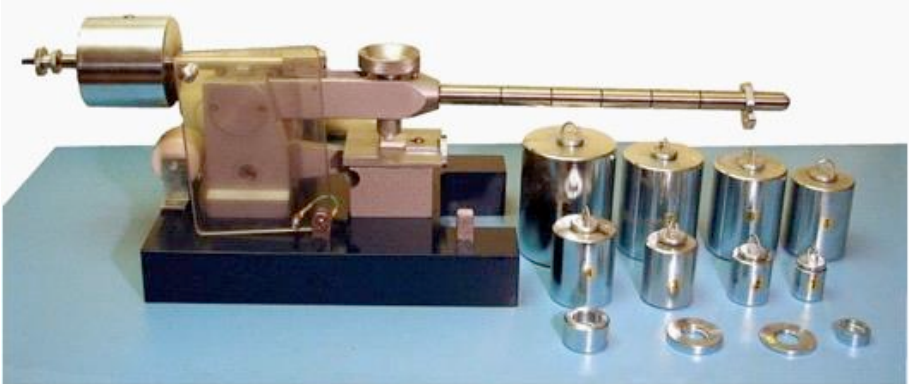


Imagen tomada de: Guía de secaderos en la industria pirotécnica.
https://energia.gob.es/mineria/Explosivos/Guias/Guiadesecaderosenlaindustriapirotecnica.pdf
Figura 11. Equipo para determinar la sensibilidad a la fricción

La fricción es causa de problemas durante el manejo de mezclas pirotécnicas, especialmente en aquellas que contienen partículas ásperas o gruesas. En una mezcla cuando los materiales que la constituyen se frotan, se generan “puntos calientes” que pueden provocar una ignición no deseada. Las partículas metálicas son las de mayor interés debido a su capacidad para generar puntos calientes por fricción. Conkling J., y Mocella C. (2011) mencionan que la adición de titanio a la pólvora negra tiene un efecto significativo sobre la sensibilidad a la fricción, así como en la sensibilidad al impacto. La pólvora negra se vuelve más sensible al impacto a medida que aumenta la proporción de titanio, asimismo es más sensible a la fricción al incrementarse la proporción de titanio, siendo más sensibles a la fricción las composiciones que contiene entre un 20 y 30 % de titanio metálico en peso; si el porcentaje de titanio en las composiciones aumenta por encima del 30 % se vuelven menos sensibles a la fricción, pero su sensibilidad al impacto es aún mayor.

Debido a que la sensibilidad a la fricción varía de acuerdo con el tamaño de las partículas, la rugosidad de su superficie y la presencia de otros materiales, es conveniente determinarla y evaluar cuidadosamente cualquier cambio en las mezclas pirotécnicas que se elaboran. También es importante considerar la fricción al comprimir o compactarlas, por lo que se recomienda que los equipos y herramientas utilizadas estén alineados adecuadamente para evitar problemas.

Una alternativa de disminuir la sensibilidad a la fricción es agregar algún lubricante, como cera o aceite; el ácido esteárico es una sustancia que también se emplea con este propósito. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que esto podría afectar otras propiedades, como son la velocidad de combustión y la temperatura de encendido, por lo que es importante que los fabricantes de las mezclas pirotécnicas evalúen los efectos de cualquier cambio en estas, para no alterar sus propiedades, ya que esto podría originar un accidente.

3.4 Sensibilidad al impacto

La sensibilidad al impacto es una medida de la tendencia de un material a encenderse como resultado de la energía suministrada en forma de impacto. Cuando una composición pirotécnica se somete a un impacto, se produce fricción entre los granos que la componen al frotarse entre sí a medida que se comprime rápidamente; adicionalmente, los gases atrapados también se calientan debido a la *compresión*, lo que produce "puntos calientes". Si la

temperatura de los “puntos calientes” es suficientemente alta y combinada con los efectos de la fricción es posible que la muestra impactada se encienda.

En la figura12 se presenta de manera esquemática el efecto que produce el impacto en una composición, y en la figura 13 se muestran equipos empleados para determinarla.

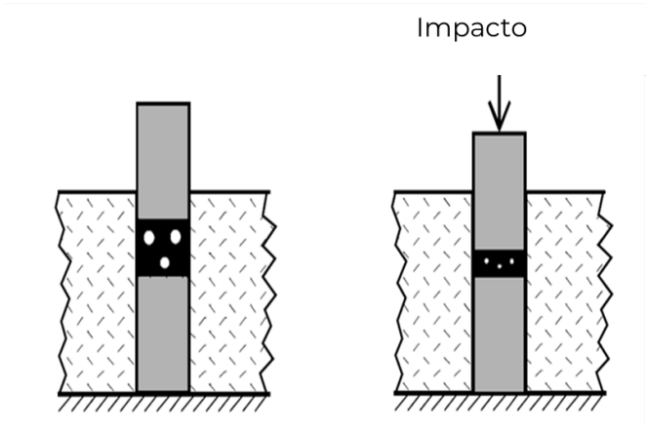
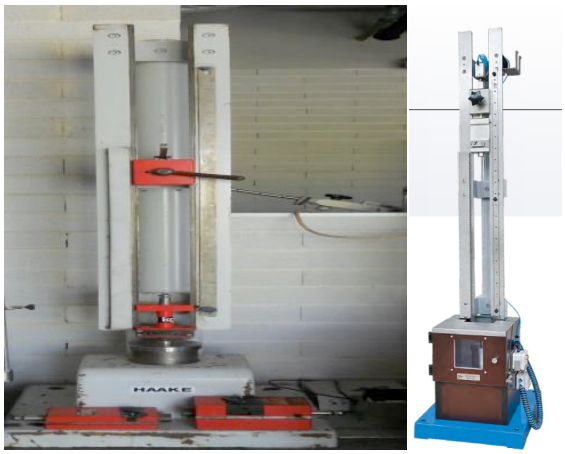


Imagen tomada de: The illustrated dictionary of pyrotechnics. Kosanke B. J.

Figura 12. Efecto del impacto en una composición pirotécnica



Imágenes tomadas de: Guía de secaderos en la industria pirotécnica y OSM Research. Advanced Testing Instruments for Explosive Materials https://energia.gob.es/mineria/Explosivos/Guias/Guiadesecaderosenlaindustriapirotecnica.pdf; https://mueller-instruments.de/fileadmin/Bilder/2023/OZM-Product-Catalogue-2023-2024-Energetic-Materials_small.pdf

Figura 13. Equipos para determinar la sensibilidad al impacto

En ocasiones, durante el proceso de la compactación de las composiciones pirotécnicas, el aumento de la temperatura probablemente sea imperceptible debido a la cantidad de material o a que el calor generado es aislado por el recipiente, impidiendo que sea detectable al simple tacto; no obstante, el incremento de la temperatura provocado por el impacto podría ser suficiente para que se produzca una ignición no deseada.

3.5 Sensibilidad térmica

La sensibilidad térmica es la respuesta de una sustancia a los cambios en la temperatura (estímulo térmico). Hay dos componentes de la sensibilidad térmica de un material: la temperatura de ignición y la estabilidad térmica. La temperatura de ignición es la temperatura mínima a la que un material comienza a reaccionar rápidamente incendiándose; y la estabilidad térmica es una medida de la respuesta de un material a la exposición a temperaturas relativamente altas durante un período de tiempo determinado.

En la tabla 6 se muestran las temperaturas de ignición de varias mezclas pirotécnicas se observa que algunas tienen temperaturas de ignición relativamente bajas.

Tabla 6. Temperaturas de ignición de la pólvora negra, pólvora flash y de algunas de las sustancias empleadas en la pirotecnia.

Composición	Temperatura de ignición (en °C)
$KClO_3$ + azufre [a]	220
$KClO_3$ + carbón [a]	335
$KClO_3$ + lactosa [a]	195
$KClO_3$ + magnesio [a]	540
$KClO_4$ + azufre [a]	560
$KClO_4$ + carbón [a]	460
$KClO_4$ + lactosa [a]	315
$KClO_4$ + magnesio [a]	460
Pólvora negra (KNO_3, azufre, carbón)	340
Pólvora flash ($KClO_4$, azufre, aluminio)	450
Mezcla para humos de colores (Perclorato de potasio 42 %, azúcar 28 %, carbonato de magnesio 30 %, aglutinante de nitrocelulosa +3.4 %) [b]	193
Mezcla de retardo (delay mixture) (Óxido de plomo rojo 73.3 %, silicio 18.4 %, nitrocelulosa 8.3 %) [b]	200
Mezcla de ignición (Nitrato de potasio 10 %, clorato de bario 65 %, boro 21 %, aglutinante de resina de vinil alcohol acetato 4 %) [b]	334

$KClO_3$: clorato de potasio
$KClO_4$: perclorato de potasio
a: combinación estequiométrica de oxidantes comunes y combustibles.
b: porcentaje en peso.

Elaborada de: Conkling J., Mocella C.(2011), páginas 124 y 153; Kosanke K., Kosanke B. (2013), página18-3.

La sensibilidad térmica de una composición pirotécnica depende de las reacciones químicas que se producen cuando se calienta, y es relativamente independiente de factores como son la homogeneidad de la mezcla, el tamaño de las partículas y el porcentaje de composición; sin embargo, hay que considerar la presencia o ausencia de ciertos componentes, especialmente si están involucrados en la reacción exotérmica inicial (reacción en la que se genera calor) que se produce al aumentar la temperatura del material.

Muchos de los oxidantes empleados en composiciones pirotécnicas tienen temperaturas de fusión relativamente bajas (por ejemplo, el nitrato de amonio se funde a 170 °C; el clorato de potasio se funde a 356 °C), y los combustibles metálicos generalmente tienen puntos de fusión mayores que la mayoría de los oxidantes. Asimismo, los compuestos orgánicos utilizados como combustibles y/o como aglutinantes, tienen temperaturas de descomposición (normalmente entre 200° y 350 °C) que son a menudo inferiores a las temperaturas de fusión del oxidante y el combustible. En una composición pirotécnica que contiene compuestos orgánicos, cuando los enlaces químicos de estos compuestos se rompen, se forman fragmentos muy reactivos que son capaces de reaccionar con el oxígeno atmosférico o con el oxígeno producido por la descomposición térmica del oxidante. Una vez que el oxidante comienza reaccionar liberando oxígeno, los fragmentos de los compuestos orgánicos reaccionan con el oxígeno y las reacciones exotérmicas comienzan a ocurrir rápidamente, liberándose calor y elevando la temperatura de la composición. Al elevarse la temperatura se acelera las reacciones de descomposición que están ocurriendo, liberándose aún más calor lo que lleva a la ignición y su propagación.

La sensibilidad térmica proporciona una indicación del peligro potencial de la exposición de una mezcla pirotécnica a temperaturas elevadas, durante las operaciones de mezclado, secado, almacenamiento y transporte. Esto implica que cualquier descuido en el manejo de estos materiales, como es la exposición a fuentes de calor o el almacenamiento inadecuado, posiblemente ocasionen reacciones no deseadas e incluso incendios y explosiones.

A nivel internacional existen diversos estándares para determinar la sensibilidad a los diferentes estímulos de ignición para materiales explosivos y pirotecnia; sin embargo, aún no se ha acordado algún estándar de términos equivalentes de la sensibilidad a los diferentes estímulos de ignición para la pirotécnica. Una propuesta de clasificación conforme a categorías de alta, moderada y comparativamente insensible, se incluye en la tabla 7. Esta tabla fue elaborada por Conkling J. y Mocella C. (2011) para ser empleada como una guía o referencia.

Tabla 7. Propuesta de clasificación para la sensibilidad a diferentes estímulos de ignición.

Sensibilidad	Temperatura de ignición, en °C	Chispa, en milijoule (mJ)	Altura del impacto, en pulgadas (usando aparato BOE)
Alta	Menor a 200	Menor a 100	Menor a 3.75
Moderada	200 a 400	100 a 450	3.75 a 10
Comparativamente insensible	Mayor a 400	Mayor a 450	Mayor a 10

Tomada de: Conkling J., Mocella C. (2011). Chemistry of Pyrotechnics Basic Principles and Theory.

En la tabla 7, el valor de 100 mJ para la categoría alta de sensibilidad por chispa, se consideró para que incluya a cualquier composición que presente niveles de energía de chispa cercanos a los que una persona puede acumular de energía estática, de 10 mJ a 15 mJ, y considerando un factor de seguridad de aproximadamente 6 a 7.

Es importante indicar que en México no existen actualmente alguna norma oficial mexicana, norma mexicana, estándar o disposición que contenga procedimientos y parámetros para

determinar los distintos tipos de sensibilidad de los artificios pirotécnicos; sin embargo, en la normatividad internacional existen diferentes procedimientos y/o estándares con este propósito. El “Manual de pruebas y criterios” elaborado por la Organización de las Naciones Unidas, incluye diferentes métodos para determinar la sensibilidad al impacto, fricción electroestática y estabilidad térmica, los cuales pueden utilizarse.

Asimismo, en relación a la estabilidad térmica, el Departamento de Transporte de los Estados Unidos de América (USDOT) requiere que cualquier dispositivo pirotécnico aprobado para su transporte como explosivo de la división 1.3G o 1.4G sea térmicamente estable; por lo que el material explosivo no debe encenderse espontáneamente ni sufrir una marcada descomposición cuando se somete a una temperatura de 75 °C (167 °F) durante 48 horas consecutivas.

4. Sustancias empleadas en composiciones pirotécnicas.

Las composiciones pirotécnicas son mezclas de dos o más sustancias, en donde los principales componentes son los oxidantes y los combustibles. Otras se agregan con el propósito de producir un efecto particular; por ejemplo algunas se utilizan para proporcionar color a los destellos (sales de estroncio, bario, sodio y cobre), generar el color de los humos (colorantes orgánicos), mejorar la sensibilidad, aumentar la estabilidad, ayudar a que se unan (aglutinantes) o facilitar el prensado (por ejemplo, los lubricantes).

A continuación se describen las características de algunas de las sustancias que se emplean en estas composiciones.

4.1 Oxidantes

En la elaboración de fuegos artificiales los oxidantes desempeñan un papel fundamental. Son responsables de hacer que los artificios pirotécnicos se enciendan al proporcionar el oxígeno necesario para que la reacción de combustión ocurra; su empleo hace que no se necesite del oxígeno presente en el aire para la reacción de combustión.

Algunos de los oxidantes más comunes son el nitrato de potasio, el clorato de potasio y el perclorato de potasio, cada uno aporta una cantidad de oxígeno para que la reacción de combustión se lleve a cabo y se obtengan los efectos deseados.

4.1.1 Nitrato de potasio

El nitrato de potasio, KNO_3, también conocido como salitre, ha sido usado desde hace miles de años. El nitrato de potasio forma cristales transparentes de color blanco incoloro, con un sabor frío-amargo, no es *higroscópico* y, los cristales se disuelven en agua y en glicerina.

El nitrato de potasio libera oxígeno (contiene 39.6 % de oxígeno en peso, cantidad mayor que el 23 % de oxígeno en peso disponible en el aire, o 21 % de oxígeno en volumen en el aire) a temperaturas superiores a 560 °C; a una temperatura aproximada a los 600 °C genera una gran cantidad de oxígeno para convertirse en nitrito de potasio. Cuando se mezcla con carbón y azufre o con magnesio, se descompone y la cantidad máxima de oxígeno que se produce por cada gramo de nitrato es de 0.396 gramos.

Imagen tomada de: https://pyrodata.com/chemicals/Potassium-nitrate

Figura 14. Nitrato de potasio

El nitrato de potasio es un compuesto que no explota por sí solo, aun con un impacto fuerte; aunque cuando se mezcla con fósforo rojo, se vuelve sensible al impacto.

Cuando se utiliza como oxidante al nitrato de potasio, no produce una temperatura lo suficientemente alta para generar un color de llama, excepto cuando se combina con magnesio. Es útil para generar chispas y arde durante horas cuando se mezcla con combustibles (como es el carbón en polvo). Debe tenerse precaución al manejar el nitrato de potasio, ya que el polvo fino de este material en el aire es inflamable.

4.1.2 Clorato de potasio

El clorato de potasio, $KClO_3$, es un sólido cristalino, sin olor, de color blanco o incoloro, que absorbe más humedad que el nitrato de potasio y se disuelve fácilmente en agua.

Imagen tomada de: Chapter 5. Basic chemistry of explosives and hazards of home-made explosives and chemical precursors. Handbook.

Figura 15. Clorato de potasio

El clorato de potasio libera por cada gramo casi la misma cantidad de oxígeno que el nitrato de potasio (39.2 % o 0.392 g por cada gramo de clorato).

Las composiciones pirotécnicas con base en clorato de potasio son muy sensibles a la fricción y al impacto, además de ser explosivas; por lo que estas composiciones no son las más apropiadas para el prensado, y de ser posible se recomienda sustituirlo por otros oxidantes más seguros.

Varios factores contribuyen a la inestabilidad de las composiciones con clorato de potasio. Un factor es su bajo *punto de fusión* (356 °C) y la baja temperatura de descomposición (menor a 400 °C), la cual se presenta poco después de fundirse, formándose cloruro de potasio (KCl) y oxígeno (O_2). La descomposición del clorato de potasio es diferente a la de otros oxidantes, ya que es exotérmica, y este calor producido es capaz de provocar que la reacción se vuelva más rápida y hacer que la composición que contiene clorato de potasio se encienda con un mínimo aporte de energía externa (estímulo de ignición).

Las composiciones que contienen clorato de potasio son propensas a la ignición accidental, especialmente si se mezclan con azufre (punto de fusión del azufre 119 °C; la temperatura de

ignición de una mezcla de clorato de potasio y azufre es de 220 °C), así como con compuestos que contengan azufre, fósforo o ácidos. Las mezclas de clorato de potasio y fósforo son particularmente sensibles y reactivas. El clorato de potasio es un compuesto altamente sensible al fósforo rojo y encenderse fácilmente por fricción.

De igual modo, los ácidos representan un riesgo mayor, ya que pueden provocar una combustión inmediata cuando se agrega una pequeña cantidad de algún ácido, como es el ácido sulfúrico o el ácido clorhídrico. Para reducir la sensibilidad a impurezas ácidas, se recomienda la presencia de neutralizadores básicos como el carbonato de magnesio y el bicarbonato de sodio.

El clorato de potasio, ha estado involucrado en accidentes graves en la fabricación de pirotecnia, en Inglaterra se prohibieron todas las composiciones de clorato-azufre en 1894, y en los Estados Unidos la Asociación Americana de Pirotecnia (American Pyrotechnics Association, APA) ha limitado el uso de clorato de potasio, reemplazándolo por perclorato de potasio, menos sensible, en muchas fórmulas; sin embargo, debido a su alta velocidad de combustión, facilidad de ignición y capacidad de producir sonido con poca cantidad de la composición, ha hecho difícil de sustituir el clorato de potasio, por lo que en caso de utilizarlo es importante tener mucha precaución en su uso y manejo.

4.1.3 Perclorato de potasio

El perclorato de potasio, $KClO_4$, es una sustancia cristalina, incolora o blanca, inodora, no es higroscópico y es poco soluble en agua. El perclorato de potasio es un compuesto utilizado en la pirotecnia debido a sus propiedades oxidantes, siendo éste el que contiene mayor cantidad de oxígeno disponible en comparación con los compuestos antes mencionados; un gramo de perclorato de potasio produce 0.462 gramos de oxígeno, cantidad mayor que el producido por el clorato de potasio.

Imagen tomada de: Chapter 5. Basic chemistry of explosives and hazards of home-made explosives and chemical precursors. Handbook.

Figura 16. Perclorato de potasio

El perclorato de potasio tiene amplio uso, se utiliza para producir llamas de colores (como el rojo cuando se combina con nitrato de estroncio), ruido (con aluminio, en *composiciones flash*) y luz (en composiciones flash con magnesio).

Es importante tener precaución al manejar el perclorato de potasio, ya que se vuelve sensible en contacto con el fósforo rojo y explota al ser golpeado con piezas o herramientas de aluminio o bronce. Su sensibilidad a la fricción no es tan alta como la del clorato de potasio, y el perclorato de potasio no reacciona con el ácido clorhídrico ni con el ácido nítrico.

Debido a sus propiedades químicas las composiciones pirotécnicas con perclorato de potasio son menos sensibles al calor, fricción e impacto en comparación con las mismas formulaciones en las que se usa el clorato de potasio. Por lo que, desde el siglo pasado, el perclorato ha reemplazado gradualmente al clorato de potasio en la fabricación de pirotecnia a causa de su mejor historial de seguridad comparado con el clorato y su mayor estabilidad en general.

4.2 Combustibles

Las composiciones pirotécnicas contienen uno o más combustibles, que reaccionan con el oxígeno liberado por el oxidante, generando calor y formando productos de la combustión. Esta combustión permite que se produzca una variedad de efectos posibles: luz, color, sonido, movimiento o humo. Estos combustibles pueden ser elementos metálicos, elementos no metálicos y sustancias orgánicas.

4.2.1 Combustibles metálicos

Los combustibles metálicos deben ser razonablemente ligeros y producir altos valores de energía en forma de calor por cada gramo utilizado. En su manejo hay que tener cuidado, ya que suelen descomponerse explosivamente cuando se calientan o están involucrados en un incendio. Algunos de los más usados son los siguientes.

4.2.1.1 Aluminio

El aluminio es uno de los más usados en aplicaciones de llama de colores y para crear chispas brillantes en los fuegos artificiales. El aluminio destaca por su costo razonable, ligereza y estabilidad en almacenamiento. Se utiliza en diferentes tipos y tamaños de partículas para lograr diversos efectos visuales, por ejemplo el aluminio en hojuelas se usa ampliamente para producir chispas blancas brillantes. Es importante considerar que un tamaño de partícula muy pequeño puede contribuir a una ignición no deseada ya que aumenta la sensibilidad a factores como son la chispa y el impacto.

Imágenes tomadas de: https://pyrodata.com/chemicals/Aluminium

Figura 17. Aluminio negro y aluminio en hojuelas

El aluminio es químicamente estable en el aire, ya que se oxida fácilmente formándose una capa superficial de óxido de aluminio (Al_2O_3) que protege el metal interno de una mayor oxidación. El aluminio también es estable en agua o en un ácido débil a temperatura ambiente, debido a que la superficie está cubierta por una película de su hidróxido, $Al(OH)_3$; sin embargo, cuando el polvo de aluminio húmedo se mantiene a una temperatura más alta, puede ocurrir una reacción violenta en unas pocas horas, debido a que la película de hidróxido se rompe y disuelve en el agua.

El aluminio reacciona con los nitratos en presencia de agua para producir gases de hidrógeno, amoníaco y óxidos de nitrógeno, excepto con el nitrato de amonio; el hidrógeno producido en la reacción causa una atmósfera explosiva, por lo que las composiciones con nitrato de potasio y aluminio deben almacenarse en condiciones secas.

El aluminio reacciona con el clorato o perclorato de potasio en presencia de humedad generando gas hidrógeno. La reacción ocurre muy lentamente a temperatura ambiente, pero se acelera a más de 85 °C; sin embargo, esta reacción no es tan violenta como la del aluminio y un nitrato.

4.2.1.2 Magnesio

El magnesio es un metal, medianamente fuerte, de color blanco plateado, tiene el mismo punto de fusión que el aluminio y un punto de ebullición más bajo. El magnesio arde bien en combinación con un oxidante, incluso si el contenido de oxígeno no es suficiente para una combustión completa.

Imagen tomada de: https://www.mepco.co.in/products/magnesium-40/magnesium-powder-53

Figura 18. Magnesio en polvo

El magnesio es un metal altamente reactivo que se usa como combustible en ciertas condiciones. La reactividad del magnesio con el agua es muy grande, por lo que generalmente se consideran incompatibles; se ha observado que las reacciones ocurren con magnesio desprotegido y muchas sales en estado húmedo.

Para garantizar la conservación a largo plazo de compuestos que contienen magnesio, es necesario mantenerlos secos. Hay que tener cuidado en su uso, ya que durante el almacenamiento es posible se deteriore a causa de la oxidación provocada por sales de clorato y perclorato en presencia de humedad. Por otro lado, las sales de nitrato ofrecen mayor estabilidad al combinarse con magnesio.

Es importante destacar que el magnesio reacciona violentamente con ácidos (como el ácido acético y bórico), azufre y diversas sales (como el sulfato de cobre) en presencia de humedad o agua. Además, el magnesio puede verse afectado por ciertos ácidos disueltos en alcohol o acetona.

En presencia de humedad el nitrato de amonio o perclorato de amonio también reaccionan violentamente con el magnesio generando gas amoniaco. El magnesio no debe utilizarse con el perclorato de amonio ni otras sales de amonio, a menos que la superficie del metal esté recubierta, debido a que al reaccionar se produce gas hidrógeno que es altamente inflamable y produce con el aire mezclas explosivas.

La resistencia del magnesio a los productos químicos depende del tipo de material usado para su protección o recubrimiento, por lo que debe usarse una proporción adecuada de material y polvo de magnesio, aproximadamente 2 a 5 % de peso adicional del material. Contra el perclorato de amonio generalmente se utiliza únicamente el recubrimiento de dicromato de potasio; este recubrimiento es casi perfectamente resistente a productos químicos (perclorato de potasio, clorato de potasio, y nitratos de bario, potasio y sodio). El aceite de linaza es bastante eficaz para casi todos los productos químicos excepto para el perclorato de amonio; el recubrimiento de parafina también es útil y el poliéster no es tan eficaz como el de parafina. Debido a que el polvo de magnesio es capaz de irritar las membranas mucosas o el tracto respiratorio superior se recomienda usar un respirador contra partículas al manipular el polvo fino.

4.2.1.3 Magnalio

El magnalio (o magnalium) es una aleación de magnesio y aluminio en una proporción de 50/50, y es ampliamente usado debido a su estabilidad.

Imagen tomada de: https://www.fireworkscookbook.com/product/magnalium-mg-al/
Figura 19. Magnalio

El magnalio es considerablemente más estable que el aluminio metálico cuando se combina con sales de nitrato y reacciona mucho más lentamente que el magnesio metálico con ácidos débiles. Sin embargo, el magnalio sigue siendo suficientemente sensible a los ácidos incluso con ácidos débiles como es el ácido bórico. Existen formulaciones que combinan ácido bórico con magnalio o incluso con magnesio; en estas formulaciones casi siempre se utilizan aglutinantes no acuosos, lo que minimiza el peligro, pero con aglutinantes acuosos debe evitarse el uso de ácido bórico.

Las sales de cobre (I) y de cobre (II), deben evitarse con magnalio a menos que la sustancia empleada tenga un ion que produzca una reacción básica; muchas de las sales de cobre

utilizadas en pirotecnia, como el carbonato o el benzoato, tienen esta característica y normalmente no presentan ningún problema.

El magnalio no causa ningún problema particular con el azufre y se comporta de manera similar al aluminio.

El magnalio es atacado por diversas sales en estado húmedo o en presencia de humedad, pero el grado de ataque se sitúa en general entre los del aluminio y el magnesio. La resistencia del magnalio a la corrosión es comparable al aluminio y el magnesio.

El polvo de magnalio produce chispas amarillentas y blancas cuando se mezcla con una composición similar a la pólvora negra, y arde de manera uniforme con clorato o perclorato. Sin embargo, su combustión con nitratos no es uniforme.

Las mezclas que contienen nitratos (por ejemplo, nitrato de potasio) o perclorato de amonio y magnalio a veces se calientan y se encienden de manera espontánea, especialmente cuando están húmedas. Cubrir magnalio con aceite de linaza evitará la reacción con los nitratos, pero este tratamiento no protege al magnalio del perclorato de amonio; sólo tratar el magnalio con dicromato de potasio ayudar a prevenir esta reacción.

Debido a que el polvo de magnalio causa irritación a los pulmones y a la membrana mucosa se recomienda usar un respirador contra partículas al manipular el polvo fino.

En la tabla 8 se presenta un resumen de las reacciones del magnalio, magnesio y aluminio, con algunos oxidantes.

Tabla 8. Reacciones del aluminio, magnalio y magnesio con diversas sales en estado húmedo a temperatura ambiente.

	Aluminio	Magnalio (magnalium)	Magnesio
Agua destilada	0	S	XX
Perclorato de amonio (NH_4ClO_4)	0	X	XXX
Nitrato de potasio (KNO_3)	S (XXX)	X	XX
Nitrato de bario ($Ba(NH_3)_2$)	S (XXX)	X	XX
Nitrato de amonio (NH_4NO_3)	0 (0)	0	XXX
Clorato de potasio ($KClO_3$)	0	X	XXX
Perclorato de potasio ($KClO_4$)	0	S	XXXX
Sulfato de cobre ($CuSO_4$)	S	XXXX	XXXX

Símbolos y notas:

0: No ocurre reacción

S: Reacción muy lenta pero útil en la práctica

X: Reacción ligera, atacado lentamente

XX: Reacción considerable, atacado considerablemente

XXX: Reacción activa, atacado activamente

XXXX: Atacado violentamente

( ): La reacción ocurre cuando la temperatura aumenta aproximadamente a 60°C. Esto también ocurre frecuentemente de manera espontánea a la temperatura de la habitación (cuarto de almacenamiento) en verano

Nota 1: Las mezclas fueron utilizadas en forma de polvo

Nota 2: Se empleó magnalio (50/50, magnesio/aluminio)

Tomado de: Kosanke K., Kosanke B. (2013). Pyrotechnic Chemistry. Pyrotechnic Literature Series No. 4. Página 2-14

4.2.1.4 Limadura de hierro

La limadura de hierro se emplea para obtener uno de los efectos más llamativos dentro de la pirotecnia: las chispas doradas. La manera en que se distribuyen las chispas (o ramificación) es diferente según el contenido de carbono que tenga la limadura de hierro.

Es importante tener en cuenta el efecto de la corrosión sobre las limaduras de hierro; con el tiempo, la producción de chispas disminuye cuando los artificios se almacenan por largos periodos debido a la corrosión del hierro, por lo que un lugar que no tenga presencia de humedad y que no tenga contacto directo con el aire debería ser suficiente para mantener la composición en óptimas condiciones. También es común recubrir las limaduras con un material protector del tipo de la parafina, antes de su uso en la elaboración de pirotecnia.

Imagen tomada de: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/10/Fe_filings.JPG

Figura 20. Limaduras de hierro

El hierro es capaz de producir una buena cantidad de calor cuando se combina con un oxidante fuerte como es el perclorato de potasio.

Las composiciones similares a la pólvora negra (es decir, a base de carbón/azufre/nitrato de potasio) al que se añaden limaduras de hierro, como las utilizadas a menudo en las fuentes, son más sensibles que las composiciones a las que no les fue añadido este metal, por lo que debe tenerse especial precaución, cuando se golpea o presiona con fuerza.

4.2.2 Combustibles no metálicos

En la pirotecnia se emplean ampliamente varios elementos no metálicos debido a la facilidad con la que se oxidan; así como, por su estabilidad al aire y la humedad, por producir una buena cantidad de calor por cada gramo y por su costo. Los materiales de uso más común son el fósforo y el azufre; otros elementos no metálicos usados son el boro y el silicio.

4.2.2.1 Fósforo

Existen varias formas del fósforo, siendo las más comunes el fósforo blanco y el rojo. El fósforo rojo no es tóxico, en cambio el fósforo blanco, es extremadamente tóxico e inflamable. El fósforo blanco se convierte gradualmente en fósforo rojo, por lo que casi siempre el fósforo blanco contiene algo de fósforo rojo que le da una apariencia amarilla; es por esta causa que el fósforo blanco envejecido o impuro también se le nombra fósforo amarillo. El fósforo rojo es un polvo de color marrón rojizo y no tiene olor, pero cuando contiene fósforo amarillo huele a

ozono (olor penetrante muy característico, a veces descrito como blanqueador con cloro, chispas eléctricas, plástico quemado o el olor cerca de los equipos eléctricos).

Imagen tomada de: https://gasex.cl/fosforo/
Figura 21. Fósforo rojo y blanco

El fósforo rojo se enciende fácilmente con una fuente de ignición y continúa ardiendo después de retirarle esta fuente, por lo que el peligro de incendio es alto. Cuanto más finas sean las partículas mayor será el riesgo de ignición, incluido el de una explosión de polvo. Aunque el fósforo rojo no se incendia cuando se expone al aire (su ignición ocurre cerca de 260 °C), es extremadamente sensible al calor, la fricción y a las descargas electrostáticas.

El fósforo rojo es un material altamente reactivo que se enciende fácilmente por impacto y esta característica se potencializa al mezclarse con oxidantes, especialmente con el clorato de potasio, seguido del perclorato de potasio y el perclorato de amonio. Es importante tener precaución al manipularlo, ya que al mezclarlo con compuestos de clorato de potasio y perclorato de potasio reacciona violentamente a la fricción y al impacto.

Las dispersiones de fósforo rojo en el suelo son difíciles de eliminar por completo debido a lo fino de las partículas y a que no es soluble en agua. Por lo tanto, se recomienda contar con un área de trabajo exclusiva y tomar precauciones con las herramientas y la ropa, ya que cualquier residuo es un potencial factor de riesgo; también, es fundamental manipularlo con cuidado y tener un conocimiento adecuado de sus riesgos para evitar accidentes.

4.2.2.2 Azufre

El azufre es de color amarillento intenso, insoluble en agua, en estado puro no tiene olor, arde con una llama de color azul desprendiendo dióxido de azufre; en estado sólido forma estructuras cristalinas constituidas por anillos de ocho átomos de azufre

Imagen tomada de: https://pyrodata.com/chemicals/Sulfur

Figura 22. Azufre en polvo

El azufre es un elemento crucial en la pirotecnia, se usa como combustible desde hace más de mil años. Se emplea debido a su facilidad de encendido, especialmente por su baja temperatura de ignición.

El azufre no conduce la electricidad, pero se carga fácilmente con electricidad estática; su presencia en composiciones pirotécnicas, aun con porcentajes pequeños, tiene un gran impacto en la temperatura de ignición. Al trabajar con azufre en combinación con clorato se debe tener especial cuidado ya que históricamente es la causa más famosa de accidentes en los que ocurre una ignición espontánea, esto posiblemente se deba a la formación de iones ácidos sobre la superficie de los granos de azufre que posteriormente se convierten en ácido sulfúrico que produce la ignición espontanea de combustibles orgánicos; así como, la formación de dióxido de azufre y dióxido de cloro (debido al contacto del azufre con el oxígeno del aire durante el mezclado) al reaccionar con el clorato de potasio.

El azufre se utiliza junto con nitrato de potasio y carbón vegetal en la fabricación de pólvora negra; sin embargo, las composiciones que contienen azufre y oxidantes, son sensibles al impacto y la fricción, siendo con el clorato de potasio la combinación más sensible.

Una composición que contiene azufre y algún oxidante, generalmente es sensible al impacto y la fricción. La mayor sensibilidad se encuentra en la combinación con clorato; seguida de la combinación con perclorato de amonio; en tercer lugar con perclorato de potasio; y la combinación menos sensible es con nitratos. El azufre con cualquier oxidante da una mayor sensibilidad a la ignición que el carbón vegetal.

En formulaciones de pirotecnia de trueno se recomienda evitar el uso de productos químicos (cloratos y azufre o sulfuros) ya que no añaden nada al nivel de sonido producido, pero pueden aumentar considerablemente la sensibilidad de la pólvora flash a una ignición accidental.

4.2.3 Combustibles orgánicos

En las composiciones pirotécnicas se emplea también una variedad de combustibles orgánicos, que contienen carbono. Estos además de proporcionar calor, generan una presión de gas significativa mediante la producción de dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua. Entre los más usados se incluyen al carbón y azúcares como la glucosa, lactosa y sacarosa; también se utiliza a la dextrina como combustible y aglutinante pirotécnico.

4.2.3.1 Carbón

El carbón vegetal es de color negro, no tiene olor, es insoluble en cualquier producto químico y no se derrite. El carbón es inflamable y arder sin generar llama. El carbón vegetal es un valioso combustible orgánico presente en mezclas pirotécnicas desde hace miles de años, se obtiene calentando madera en un ambiente con poco oxígeno, lo que elimina productos volátiles y humedad, dejando como residuo principal el carbono.

Existen diversos tipos de carbón vegetal cada uno con propiedades particulares. El carbón vegetal se prepara sometiendo las maderas a diferentes temperaturas de carbonización. La temperatura de carbonización tiene gran influencia en la temperatura de ignición del carbón, cuando se obtiene el carbón a temperaturas bajas (260° a 280 °C) la temperatura de ignición es baja (340° a 360 °C); cuando se obtiene a temperaturas mayores (aproximadamente 430 °C) la temperatura de ignición es mayor (aproximadamente 400 °C). La pólvora negra elaborada con carbón obtenido a bajas temperaturas se encenderá y arderá a temperaturas bajas. Cada lote de carbón vegetal presenta variaciones, incluso si proviene de la misma fuente de madera. Su manejo adecuado es crucial debido a su inflamabilidad.

Imagen tomada de: https://www.fireworkscookbook.com/product/charcoal-mixed-hardwood-airfloat/

Figura 23. Carbón finamente pulverizado

El carbón se emplea para generar una fuerza explosiva al combinarse con un oxidante, y la cantidad de éste permite regular la velocidad de combustión. El carbón es uno de los ingredientes de la pólvora negra; generalmente se emplea en proporciones de 15 % carbón, 75 % nitrato de potasio (KNO_3) y 10 % azufre, estos ingredientes se muelen por separado para finalmente hacer la mezcla.

4.3 Aglutinantes

Para la fabricación de artificios pirotécnicos se necesita un elemento que mantenga unidas todas las sustancias de la mezcla pirotécnica, siendo éste el propósito de los aglutinantes. Los aglutinantes son comúnmente compuestos orgánicos o polímeros que permiten un mezclado homogéneo, además de ser una fuente de combustible para la reacción.

La presencia de los aglutinantes es fundamental en la elaboración de los gránulos, también conocidos como “pellets”, “bolitas” o “estrellas”, ya que, sin ellos, los gránulos serían muy poco resistentes y susceptibles a desmoronarse.

Un aglutinante para uso en la pirotecnia debe tener, entre otras características: un fuerte poder cohesivo; proporcionar a la composición una fuerte resistencia al agua o a los disolventes cuando se consolide; no interferir con el secado de las composiciones que fueron aglutinadas; ser aproximadamente neutro en una solución acuosa y no reaccionar con otras sustancias en la composición; ser soluble en agua o en el disolvente incluso a temperaturas frías; no causar cavidades o porosidades mientras se seca; no interferir con la ignición o la combustión; no causar deterioro durante el almacenamiento prolongado y no ser higroscópico.

Debido a que cada aglutinante tiene un calor de combustión, una temperatura de fusión, una temperatura de descomposición y un volumen de gas producido por cada gramo únicos, no se pueden reemplazar en una composición pirotécnica sin que al hacerlo no se produzcan diferencias significativas en la reacción de producción de calor, velocidad de combustión, sensibilidad a los estímulos de ignición y en la producción de gases.

Cuando se emplean solventes orgánicos, como la acetona o el alcohol, se crean mezclas con el aire que son inflamables y sensibles a las chispas, lo que representa una condición peligrosa, por lo que se debe tener especial cuidado durante el secado, ya que este peligro persiste hasta que todo el solvente ha sido retirado.

La dextrina es un compuesto natural usado ampliamente como aglutinante, siendo su principal ventaja el no requerir solventes orgánicos para su empleo, evitando los riesgos que éstos representan. No obstante, la dextrina necesita de agua para su activación, por lo tanto hay que tener precaución y no utilizarse si alguno de los componentes de la mezcla reacciona con el agua, como son los mostrados en las tablas 8 y 11.

Otras sustancias usadas como aglutinantes son el aceite de linaza, parafina, carboximetilcelulosa, goma laca, resinato de calcio y cloruro de polivinilo (PVC).

4.4 Sustancias productoras de color

El color es el resultado de las sustancias químicas utilizadas en las composiciones pirotécnicas. Existen diferentes compuestos químicos que se usan para generar colores específicos siendo en la actualidad, las sales metálicas las más comúnmente, ya que tienden a producir los colores más brillantes y duraderos.

El principio químico detrás de la producción del color se deriva de la emisión de *fotones* que tienen lugar cuando se le suministra energía en forma de calor, a un compuesto metálico. Estos fotones son liberados y cada uno tiene una *longitud de onda* específica la cual es percibida por nuestra visión como un color particular. Es decir cuando un artificio pirotécnico (fuegos artificiales) se calienta y/o explota, los electrones de los átomos de los elementos metálicos ganan energía y saltan a niveles de energía más altos; cuando regresan de nuevo a sus niveles de energía originales, liberan la energía como luz visible en una longitud de onda específica asociada a un color. En la tabla 9 se incluyen los colores correspondientes para cada longitud de onda del *espectro visible*.

Tabla 9. Colores del espectro visible

Longitud de onda, en *nanómetros* (nm)	Color emitido
Menor a 380	Ninguno (región ultravioleta
380 a 435	Violeta
435 a 480	Azul
480 a 490	Azul verdoso
490 a 500	Verde azulado
500 a 560	Verde
560 a 580	Verde amarillento
580 a 595	Amarillo
595 a 650	Anaranjado
650 a 780	Rojo
Mayor a 780	Ninguno (región infrarrojo)

Tomada de: Conkling J., Mocella C. (2011). Chemistry of Pyrotechnics Basic. Principles and Theory.

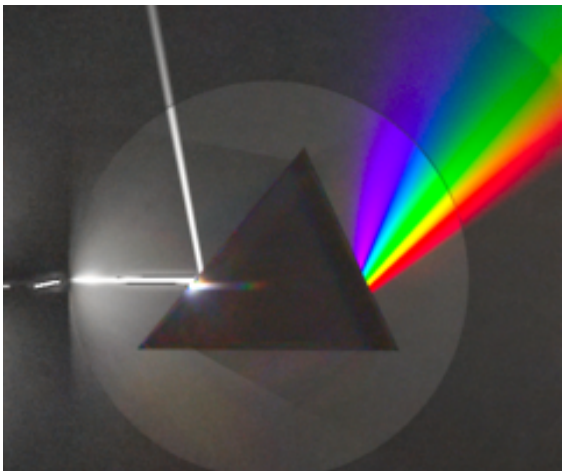


Imagen tomada de: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5c/Prism_by_Godzilla.png

Figura 24. Descomposición de la luz blanca (espectro visible)

En este caso el componente importante de la sal empleada para dar el color a los fuegos artificiales es el ion metálico (catión), ya que el ion no metálico (anión) tiene un mínimo efecto en la reacción, por ejemplo: el estroncio arde de un color rojo intenso, si se usa nitrato de estroncio o carbonato de estroncio, la flama será igualmente roja, por lo que el ser un nitrato (NO_3^-) o un carbonato ($CO_3^=$) no influye en el color. No obstante, se recomienda verificar qué sustancias sean las óptimas para el efecto o reacción deseada, ya que factores, como son el brillo o la intensidad, se ven afectados por el compuesto empleado. De igual forma, el porcentaje recomendado de una sal metálica no debe exceder el 10 % (1/10) de la composición total.

Las partículas metálicas de aluminio, titanio y magnalio, producen buenas chispas de apariencia blanca; el carbón con un tamaño de partícula suficientemente grande produce chispas de color naranja, y las partículas de hierro producen chispas que varían de doradas a blancas, según la temperatura de la reacción. En la tabla 10 se muestran algunas de las sustancias que otorgan el color y que son usadas en las composiciones pirotécnicas:

Tabla 10. Algunas de las sustancias que otorgan color a las composiciones pirotécnicas

Color	Compuesto
Rojo	Carbonato de estroncio ($SrCO_3$)
	Oxalato de estroncio ($SrCO_4$)
	Nitrato de estroncio ($Sr(NO_3)_2$)
Naranja	Carbonato de calcio ($CaCO_3$)
	Oxalato de calcio (CaC_2O_4)
	Sulfato de calcio ($CaSO_4$)
Amarillo	Bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$)
	Carbonato de sodio (Na_2CO_3)
	Cloruro de sodio (NaCl)
	Oxalato de sodio ($Na_2C_2O_4$)
Verde	Carbonato de bario ($BaCO_3$)
	Sulfato de bario ($BaSO_4$)
	Nitrato de bario ($Ba(NO_3)_2$)
Azul	Carbonato de cobre ($CuCO_3$)
	Óxido de cobre (CuO)
	Sulfato de cobre ($CuSO_4$)

Elaborada a partir de: Kosanke K. (2004). Lecture Notes for Pyrotechnic Chemistry. Pyrotechnic Reference Series No. 2, página 1-34; Kosanke K., Kosanke B. (2013). Pyrotechnic Chemistry. Pyrotechnic Literature Series No. 4. Página 9-31

Cada sal produce un efecto de color diferente cuando se calienta. Las sales que tienen electrones de valencia en estados de energía más altos emiten colores azules y morados. Las sales con electrones de valencia en estados de energía más bajos emiten luz con longitudes de onda más largas y se ven de colores rojos, naranjas y amarillos. El uso de combinaciones de diferentes sales de metales es lo que produce la amplia variedad de colores en los fuegos artificiales.

4.5 Combinaciones químicas peligrosas

La fabricación de pirotecnia implica la combinación de diversas sustancias para producir el efecto pirotécnico deseado; sin embargo, algunas combinaciones químicas pueden ser en algunos casos extremadamente peligrosas, ya que las reacciones resultantes suelen encenderse, producir compuestos tóxicos y/o gases inflamables (por ejemplo, hidrógeno) que causen daños graves a los trabajadores y a las instalaciones, por lo que es importante tener conocimiento de estas combinaciones para implementar las medidas de seguridad correspondientes y evitar accidentes.

En la tabla 11 se presentan las combinaciones peligrosas de cloratos, percloratos y algunos metales.

Tabla 11. Combinaciones peligrosas de cloratos, percloratos y algunos metales.

	Cloratos (ClO_3^-)	Percloratos (ClO_4^-)	Aluminio (Al)	Magnesio (Mg)	Zinc (Zn)
ClO_3^-		(1)	X (2, 3)	X (2, 3, 4)	X (2, 3, 4)
ClO_4^-	(1)		? (2)	? (2, 4)	M
Al	X (2, 3)	? (2)		M	M
Mg	X (2, 3, 4)	? (2, 4)	M		M
Zn	X (2, 3, 4)	M	M	M	
Ácidos	X (5)	M	M	X (6)	X (6)
Ion amonio (NH_4^-)	X (8)	M	M	X (8)	X (8)
Agua	M	M	? (7)	X (7)	X (7)
Ion cobre (Cu^{2+})	? (9)	M	? (10)	X (10)	X (10)
Azufre (S)	X (11)	X (11)	M	X (12)	X (12)
Sulfuros (S^{2-})	X (11)	X (11)	M	M	M

X = Combinación generalmente peligrosa.
? = Combinación que puede ser peligrosa dependiendo de las circunstancias.
M = Combinación con peligro mínimo.

Notas de la tabla:

1. La combinación de clorato de potasio y perclorato de amonio puede producir clorato de amonio altamente inestable, si hay humedad.

2. Los oxidantes en combinación con combustibles metálicos producen mezclas altamente energéticas. Si el metal es un polvo fino, las mezclas pueden ser poderosamente explosivas. Además, los combustibles metálicos tienden a hacer que las mezclas sean más sensibles a la electricidad estática.

3. Los cloratos tienen energía de activación particularmente baja, lo que tiende a formar mezclas sensibles a todo tipo de ignición accidental.

4. Los metales activos sin protección (sin cubierta de aceite de linaza, aceite de parafina u otro material) pueden reaccionar con oxidantes para producir calor.

5. La presencia de un ácido tiende a provocar la descomposición de los cloratos, lo que sensibiliza la mezcla y puede provocar una ignición espontánea.

6. Los metales activos sin protección reaccionan violentamente con los ácidos produciendo calor y gas hidrógeno. Esto puede provocar una ignición espontánea y explosiones.

7. Los metales activos sin protección reaccionan lentamente con el agua para producir calor y gas hidrógeno. Al aumentar la temperatura, la reacción puede volverse violenta. Esto puede provocar una ignición espontánea y explosiones.

8. Los iones de amonio son capaces de actuar como un ácido (es decir como donador de protones), lo que podría generar los peligros descritos en las notas 4 y 5.

9. Los iones de cobre (Cu^{2+}) son capaces de catalizar la descomposición de algunos oxidantes. Si el oxidante ya es algo inestable, es posible crear mezclas que sean particularmente sensibles a la ignición accidental.

10. Los metales más activos (electroquímicamente) que el cobre reaccionarán con los iones de cobre para producir cobre metálico e iones metálicos activos. Esta reacción de "desplazamiento" es exotérmica, lo que aumenta la posibilidad de ignición espontáneo por desplazamiento.

11. El azufre y los sulfuros, en combinación con percloratos y particularmente con cloratos, forman mezclas sensibles a la ignición accidental.

12. El azufre puede actuar como oxidante, además de como combustible. Cuando se combina con un combustible metálico activo sin protección, el azufre puede atacarlo y producir calor.

Tomada de: Kosanke K. (2004). Lecture Notes for Pyrotechnic Chemistry. Pyrotechnic Reference Series No. 2. Página 12-20; Kosanke K., Kosanke B. (2013). Pyrotechnic Chemistry. Pyrotechnic Literature Series No. 4. Capítulo 18.

Hay que tener presente que la información contenida en la tabla 11 no es completa y exhaustiva; además los autores indican que algunas de las combinaciones calificadas como “generalmente peligrosas” es posible que sean realizadas por pirotécnicos expertos y con experiencia con un nivel de seguridad razonable, siempre y cuando se tomen medidas de precaución adecuadas; por ejemplo, agregar una sustancia aceitosa para recubrir los metales retardando la reacción con los oxidantes, o agregar una sustancia con características básicas para contrarrestar la formación o acción de ácidos.

Otras combinaciones en las que es necesario poner atención son:

- El fósforo rojo es muy sensible, especialmente a la fricción, y se enciende o explota fácilmente cuando se mezcla con un oxidante. Las mezclas con clorato de potasio, perclorato de potasio y perclorato de amonio son bastante sensibles a la fricción y al impacto. De éstas, la mezcla de fósforo rojo y clorato de potasio se enciende fácilmente por fricción, y la de fósforo rojo con el perclorato de amonio es muy sensible al impacto, pero no tanto a la fricción.
- El fósforo rojo mezclado con nitrato de potasio es muy sensible al impacto.
- El fósforo rojo reacciona con el sulfuro de cobre en presencia de humedad, generando calor, lo que provoca la ignición espontánea.
- El sulfato de cobre (II) ($CuSO_4$), por su naturaleza ácida, no debe utilizarse junto con cloratos o fósforo. No obstante, puede utilizarse con percloratos o nitratos.
- El aluminio y el nitrato de sodio no deben usarse juntos, debido a la alta afinidad por la humedad del nitrato, a menos que el polvo de aluminio esté cubierto con una capa protectora de cera o material similar.
- El aluminio reacciona con los nitratos en presencia de agua para producir amoniaco, hidrógeno y óxidos de nitrógeno, excepto con el nitrato de amonio. La reacción se produce lentamente a temperaturas normales, pero cuando la temperatura sube a unos 80 °C se vuelve muy violenta.
- Las composiciones que contienen azufre y algún oxidante es generalmente sensible al impacto y la fricción. La mayor sensibilidad se presenta con el clorato; después con el perclorato de amonio; en tercer lugar con perclorato de potasio; por último, la combinación con nitratos, es menos sensible que con los anteriores.

Para obtener más información acerca de combinaciones peligrosas se recomienda consultar publicaciones especializadas sobre pirotecnia. Una fuente de información sobre las sustancias químicas empleadas son las hojas de datos de seguridad elaboradas por los fabricantes o proveedores, las cuales están disponibles en diversas páginas electrónicas en internet. Las hojas de datos de seguridad proporcionan información sobre las características y propiedades de las sustancias, sus peligros, primeros auxilios, medidas contra incendios, recomendaciones para el manejo y almacenamiento, entre otras.

5. Gestión de riesgos en la elaboración y manejo de pirotecnia

De manera general, la gestión de riesgos son las acciones dirigidas a identificar, evaluar y controlar los riesgos en un proceso o actividad que puedan afectar a los trabajadores, instalaciones, población y medio ambiente. La gestión de riesgos aplicada a la elaboración y manejo de la pirotecnia permite a partir de la identificación y la evaluación de los peligros y/o riesgos existentes o identificados, establecer y aplicar medidas para su prevención y control con el propósito de mejorar la seguridad.

En el país no existen análisis o estudios publicados sobre los accidentes ocurridos durante la elaboración de pirotecnia, en los que se identifiquen las actividades involucradas dentro del proceso de producción, así como sus causas; sin embargo, los análisis o estudios realizados en otros países nos proporcionan información valiosa que sirve como referencia. Por ejemplo, en estadísticas sobre accidentes ocurridos en la India para el periodo 1994 a 2006, se indica que los accidentes letales ocurren principalmente en las actividades de: llenado (37 %), mezclado (20 %) y almacenamiento (13 %), seguido del corte (11 %), secado (10 %), quema de residuos (5 %) y empacado (4 %); y en cuanto a las causas de los accidentes mortales, se indica que los estímulos de ignición ocasionados por la sensibilidad a la fricción (36 %) y la sensibilidad al impacto (25 %) son las causas principales, seguido de la descomposición química debido a la presencia de humedad o impurezas durante el procesamiento y almacenamiento (20 %), caída de rayo (4 %), electricidad estática (3 %) y otros factores (12 %).

5.1 Peligros de la pirotecnia

La fabricación de pirotecnia implica el manejo de una gran variedad de sustancias y de las propias composiciones pirotécnicas, que tienen características inflamables y/o explosivas lo que la convierte en una actividad productiva de alto riesgo. Estas composiciones tienen el potencial de causar graves lesiones o incluso la muerte a las personas que las elaboran o manejan. Por ejemplo, en la figura 25 se muestra la distancia a la que una bola de fuego producida por diferentes cantidades de pólvora negra (mezcla de azufre, carbón y nitrato de potasio) provocan la muerte en el 50 % de los casos, a personas vestidas de manera normal.

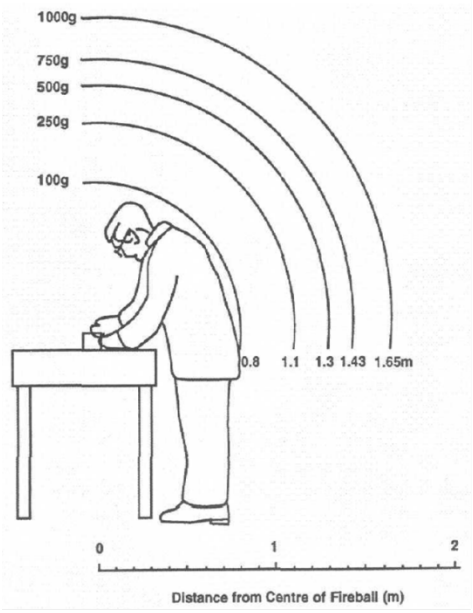


Imagen tomada de: Kosanke K., (2004). Lecture Notes for Pyrotechnic Chemistry. Pyrotechnic Reference Series No. 2

Figura 25. Distancias de afectación de una bola de fuego producida por el incendio de diferentes cantidades de pólvora negra.

A continuación, se presentan algunas acciones o tareas comunes que se realizan durante la elaboración y manejo de pirotecnia, en las cuales puede presentarse un escenario peligroso y potencialmente fatal.

Almacenamiento: Uno de los mayores riesgos en la pirotecnia es el almacenamiento de las sustancias químicas y del producto terminado. Las composiciones pirotécnicas y muchas de las sustancias utilizadas, son altamente inflamables y es posible se enciendan, detonen o deflagren con facilidad si se manipulan y/o almacenan de manera incorrecta. En el almacenamiento es esencial cumplir con las medidas de seguridad para prevenir la ignición accidental y/o explosiones que puedan causar daños materiales, lesiones e incluso la pérdida de vidas humanas. De manera general, se deberá cumplir con las disposiciones para las áreas de almacenamiento (almacenes y polvorines) establecidas en la normatividad aplicable de la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA) y la Secretaría de Trabajo y Previsión Social (STPS), entre las que se incluyen:

- Mantener separadas las sustancias oxidantes (por ejemplo: nitratos, cloratos, percloratos) de las sustancias combustibles (por ejemplo: metales, azufre, carbón).
- Mantener las sustancias en envases cerrados y adecuadamente identificados.
- Evitar la exposición a la humedad y calor.
- Evitar la presencia de fuentes de calor en el almacén.
- Cumplir con las distancias de separación entre polvorines, almacenes y otras instalaciones.
- Contar con barra de descarga de energía electroestática conectada a tierra física en la entrada de cada construcción.

- Contar con letreros visibles elaborados con pintura de color rojo, con las leyendas "No fumar", "Peligro", "Prohibida la entrada", "Área restringida", etcétera
- No rebasar la cantidad de almacenamiento autorizada por SEDENA.
- Mantener el área ordenada y limpia.
- Almacenar las sustancias a una altura lo más baja posible para disminuir el impacto en caso de caída, estibar los productos terminados a una altura y de manera adecuada.
- Restringir el acceso a solo el personal autorizado.
- Mantener las áreas vigiladas permanentemente para evitar vandalismo.
- Evitar arrastrar los recipientes que contengan sustancias o productos terminados.
- Contar con ventilación natural que permita evitar la acumulación de calor.

Preparación de mezclas: La preparación de mezclas o composiciones pirotécnicas incluye tareas o trabajos de pesado de sustancias, molienda, mezclado, tamizado o cernido y secado. En estas tareas es posible se presente una ignición accidental debido a la sensibilidad de las composiciones, contaminación con otras sustancias, acumulación de calor y por electricidad estática. El mezclado de las sustancias puede realizarse manualmente o por tamizado; en general se recomienda no tamizar juntos los combustibles y oxidantes. El empleo de tamices solo debe utilizarse para composiciones que no sean sensibles a la fricción o al impacto; las mezclas de pólvora flash y de silbato no deben tamizarse.

Para prevenir situaciones peligrosas durante la preparación de las mezclas pirotécnicas es necesario aplicar medidas de seguridad, como son:

- Evitar que durante el pesaje las sustancias se mezclen al emplear básculas con residuos de otras sustancias.
- Evitar el uso de básculas de materiales férreos.
- Ubicar el barril de molienda lo más alejado de las áreas de fabricación
- Seleccionar el material de que esté hecho el tamiz de acuerdo con la sensibilidad de la composición.
- Evitar realizar el tamizado rápido y energético para prevenir la producción de electricidad estática
- No realizarlas durante horas de alta temperatura y evitar usar el barril en días calurosos.
- Secar a la sombra los materiales elaborados, usar tarimas o banquillos para secar los materiales y vigilar el tiempo de secado para prevenir el sobrecalentamiento.
- Usar ropa 100 % de algodón, esto se resuelve con un overol de trabajo.

Llenado y ensamblado: El llenado se refiere principalmente a introducir la composición pirotécnica dentro de tubos de papel o de otro material, y el ensamblaje como la unión de las diferentes partes que componen un artificio pirotécnico (por ejemplo, un crisantemo está integrada por la mecha de ignición, carga elevadora, petardo de iniciación, carga explosiva o pólvora de apertura y las “estrellas”; un petardo está formado por mecha, arcilla y pólvora).

Durante el llenado y ensamblado, es fundamental mantener una estricta supervisión y, seguir las medidas y recomendaciones de seguridad, ya que la manipulación inadecuada de los

materiales es posible que provoquen reacciones químicas no deseadas que tengan como resultado incendios y explosiones severas. Para realizar estas tareas los trabajadores deben estar debidamente capacitados en los procedimientos respectivos y, usar las herramientas y el equipo de protección personal (EPP) adecuados para minimizar los riesgos asociados.

En esta parte del proceso de producción se tiene la mayor posibilidad de una explosión; debido a que las composiciones pirotécnicas son en ocasiones altamente sensibles y se encienden o detonar fácilmente por el calor, fricción, impacto y electricidad estática, por lo que es esencial tener mucho cuidado y tomar las precauciones apropiadas para evitar accidentes. De manera general, se recomienda:

- Mantener el área de trabajo limpia y ordenada.
- Usar herramientas adecuadas y en buenas condiciones.
- Limitar la cantidad de composición pirotécnica en el área de trabajo únicamente a la que será utilizada.
- Evitar la generación y acumulación de energía estática.
- No sobrecargar el artificio de pólvora u otro material durante el llenado y
- Comprimir la composición dentro de los tubos de papel, cartón o de otro material, sin presionar de manera excesiva.

Transporte: La pirotecnia debe ser manipulada y transportada con cuidado debido a su naturaleza explosiva. Los vehículos utilizados para su transporte deben cumplir con las regulaciones aplicables y contar con las medidas de seguridad para minimizar los riesgos de un accidente.

De manera general, es indispensable que cumplan con las disposiciones establecidas para el transporte en la normatividad de la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA) y la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte (SICT), entre los que se incluyen:

- Contar con los permisos correspondientes para el transporte conforme a lo establecido por la SEDENA y SICT.
- Identificar el vehículo conforme a la normatividad correspondiente.
- Vehículo en buenas condiciones físicas y mecánicas.
- Las paredes de la caja contenedora deben estar forradas de madera o material aislante. Verificar que en la caja contenedora no existan clavos, tornillos o herrajes que pudieran ocasionar fricciones que produzcan chispas.
- Contar con un conductor eléctrico a tierra entre el armazón metálico del transporte y la carrocería o piso.
- Verificar la ausencia de cargas estáticas en el contenedor.
- Identificar adecuadamente los artificios pirotécnicos, embalar y/o empaquetar los artificios de acuerdo a sus características.
- Apilar y acomodar las cajas con los artificios de manera segura, y no exceder la cantidad de artificios pirotécnicos autorizada para su transporte.

Manejo durante la quema*:* Además de los riesgos directamente relacionados con la fabricación y transporte, también existen riesgos ocasionados por el mal uso o el manejo inadecuado. Cuando los artificios pirotécnicos se utilizan de manera descuidada o irresponsable, son capaces de causar lesiones graves e incluso la muerte, por lo que es fundamental capacitar a las personas responsables de la quema sobre su uso seguro y promover prácticas responsables para minimizar los riesgos asociados con su manipulación; también es importante que otros usuarios, por ejemplo en procesiones o festividades, estén capacitados para utilizarlos de manera segura y responsable.

La quema de artificios pirotécnicos, como son los castillos, toritos, bombas y/o crisantemos, cohetones pirotécnicos y otros artificios, son considerados de uso profesional, por lo cual es obligatorio que sea realizada exclusivamente por personal autorizado y capacitado; además de cumplir con las disposiciones, recomendaciones y medidas de seguridad establecidas por las autoridades (Protección Civil, Bomberos, IMEPI, etc.), entre las que se incluyen:

- Mantener la distancia de seguridad recomendada entre el lugar de lanzamiento o quema de los artificios y los espectadores.
- Acordonar o delimitar el área de seguridad alrededor de la quema.
- Evitar quemar cualquier tipo de pirotecnia, material combustible o inflamable cerca de donde se encuentren los artificios para la quema.
- Los “toritos” no deben estar cargados con “buscapiés”.
- La distancia de seguridad para los castillos debe ser como mínimo la altura del castillo más cinco metros, y estar alejados de árboles y líneas de alta tensión.
- Colocar las bombas y/o crisantemos de manera individual en un mortero, los morteros no deben estar agrietados o remachados y estar enterrados dos terceras partes de su longitud o adecuadamente sujetados con costales de arena.
- Los artificios que se emplearán en la quema deben almacenarse en un contenedor móvil o en el vehículo utilizado para su transporte.
- Para el caso particular de cohetones, el lanzamiento es necesario que se realice por tres personas (lanzador, auxiliar y cargador) respetando las distancias entre ellos (mínimo 5 metros) y la distancia de separación a los espectadores (el IMEPI recomienda que sea mayor a 100 metros).

De manera complementaria se recomienda que las personas que realizan la quema de artificios pirotécnicos estén certificados en el estándar de competencia EC 1046 Instalación de fuegos artificiales para la presentación de espectáculos aéreos; y conozcan los requerimientos, procedimientos y medidas de seguridad dirigidas a evitar riesgos, reducir el impacto de accidentes y salvaguardar a los espectadores y participantes en la quema, que se establezcan en el Programa de Protección Civil correspondiente.

5.2 Medidas de seguridad

Aunque en cualquier actividad, incluida la actividad pirotécnica, no es posible tener un nivel de riesgo cero o inexistente, pueden tomarse diversas medidas que orientadas a mejorar la seguridad reduzcan el nivel de riesgo presente. La aplicación de medidas basadas en los principios de orden, limpieza, disciplina y estandarización de las tareas mejoran las condiciones de trabajo, permiten reducir accidentes y mejoran la calidad de los productos, además

proporcionan un ambiente de trabajo más seguro para los trabajadores pirotécnicos. A continuación, se incluyen algunos aspectos o elementos que requieren cumplirse para mejorar la seguridad en la elaboración de pirotecnia.

Capacitación: La capacitación mejora sustantivamente la seguridad en la fabricación de pirotecnia, permitiendo que los trabajadores modifiquen sus hábitos y adquieran un compromiso con la seguridad, lo que resultará en la reducción de los riesgos y una disminución de los accidentes.

En los talleres es posible que las personas responsables de las áreas de fabricación hayan recibido alguna capacitación, ya sea formal o por una persona con experiencia, mientras que las personas que realizan trabajos más "simples" o monótonos no hayan recibido ninguna capacitación ya que se considera que no requieren ninguna habilidad para el desempeño de ese trabajo. Sin embargo, es fundamental que los trabajadores reciban una capacitación por parte de expertos y/o instituciones especializadas (por ejemplo, el Instituto Mexiquense de la Pirotecnia, IMEPI) sobre: las características, propiedades y peligros de las sustancias y mezclas utilizadas en la pirotecnia; los procedimientos de fabricación, manejo, almacenamiento y transporte; las medidas de seguridad que deben seguirse en las área y/o en las tareas que realicen; el uso adecuado de equipos y herramientas; uso de equipos de protección personal y procedimientos de respuesta a emergencias. También, es conveniente en caso de la ausencia de un trabajador calificado, evitar sustituirlo o remplazarlo por otro trabajador con poca o sin la capacitación correspondiente.

Área de trabajo: Para garantizar la seguridad en la elaboración de pirotecnia, es muy importante contar con áreas de trabajo específicas, por ejemplo, área para molienda y área para fabricación, que cumplan con los requisitos de seguridad. Hay que mantener las áreas ordenadas, limpias, alejadas de fuentes de ignición, que dispongan de una buena ventilación y cuenten con sistemas de seguridad adecuados, como son los extintores de incendios y las barras para descarga de energía estática. Además, es importante utilizar herramientas y equipos específicos para prevenir la contaminación de las mezclas pirotécnicas y minimizar el riesgo de reacciones no deseadas durante el proceso de fabricación. Además, es pertinente para cada área de trabajo, contar con los procedimientos para las tareas o actividades que se realicen y efectuar periódicamente revisiones de seguridad para identificar los peligros y riesgos existentes, ya sea debido a las condiciones de las áreas de trabajo o a las prácticas de los trabajadores.

Almacenamiento y manejo de materiales: El almacenamiento y manejo adecuado de los materiales pirotécnicos es fundamental para garantizar la seguridad de los trabajadores y la integridad de las instalaciones. Se considera como causa principal de los incendios y explosiones la sensibilidad de los materiales pirotécnicos al impacto y/o a la fricción; otros factores como es la acumulación de calor y la presencia de humedad, también es necesario tomarlos en cuenta tanto en el almacenamiento como en el manejo. En el almacenamiento de materiales pirotécnicos (sustancias químicas, metales, mezclas, etc.) es básico usar contenedores apropiados y asegurarse de que estén etiquetados correctamente; durante su manipulación, es importante evitar golpes o fricciones excesivas que puedan ocasionar su ignición. De manera general se debe cumplir con las disposiciones establecidas por las autoridades para el almacenamiento y manejo de los productos, elaborar lineamientos o indicaciones de seguridad, difundirlas entre los trabajadores y supervisar que sean cumplidas.

Equipo de protección personal (EPP): Las sustancias empleadas en la pirotecnia tienen diferentes características y algunas son peligrosas, por lo que la exposición prolongada a éstas tendrá un impacto en la salud de los trabajadores, un ejemplo particular son los polvos que ocasionan dolor de cabeza y fiebre, o problemas en ojos, vías respiratorias (garganta, pulmones, etc.), o estomacales. El uso del EPP es fundamental para reducir el riesgo de sufrir daños o lesiones durante la manipulación de materiales pirotécnicos. Dependiendo de la tarea o actividad que se realice el EPP incluye: respirador (mascarilla), gafas de seguridad, guantes resistentes a productos químicos, mandiles de protección, calzado de protección, pulsera antiestática, entre otros. Es importante seleccionar y emplear el EPP adecuado para cada tarea específica y asegurarse que se encuentre en buenas condiciones para su uso, esto permite una mayor seguridad para los trabajadores y minimizar el riesgo de daños o lesiones durante la ejecución de las tareas. La Secretaría del Trabajo y Previsión Social establece en su normatividad (NOM-017-STPS-2024, NOM-116-STPS- 2009, NOM-005-STPS-1998, entre otras) el uso de EPP y en los polvorines utilizar de forma general ropa 100 % de algodón, ropa interior 100 % de algodón y calzado de protección con suela conductiva sin partes metálicas (calzado antiestático).

Procedimientos de emergencia: Las medidas de seguridad en las instalaciones (por ejemplo, barras de descarga de electricidad estática, extintores, etc.) y en la realización de las tareas o actividades (por ejemplo, emplear herramientas adecuadas, limitar la cantidad de mezcla pirotécnica en las áreas de producción, etc.) permiten disminuir la probabilidad de que suceda un accidente, así como la magnitud de su impacto; sin embargo, siempre existirá la probabilidad de que éste suceda. La preparación ante emergencias y accidentes es fundamental para garantizar la seguridad e integridad de los trabajadores e instalaciones.

La STPS requiere que los centros de trabajo elaboren un plan de emergencia que contenga los procedimientos en caso de derrames, incendio y de evacuación; asimismo, las autoridades de Protección Civil solicitan se elabore el Programa Interno de Protección Civil el cual incluye los procedimientos de emergencia. Este procedimiento comprende una serie de acciones a seguir en caso de algún accidente, siniestro o emergencia que requiera una actuación rápida y controlada para reducir las consecuencias negativas para las personas y los bienes materiales. Es importante que los trabajadores estén capacitados y familiarizados con los procedimientos o planes para atender situaciones de emergencia, realizar una comunicación rápida con los cuerpos de atención de emergencias (bomberos, hospitales, policía y rescate), conozca los procedimientos de evacuación correspondientes y participe en simulacros periódicos.

Reacciones químicas: Es importante tomar medidas de seguridad para evitar reacciones químicas no deseadas durante la fabricación, almacenamiento y transporte de pirotecnia, y proteger a los trabajadores y a las instalaciones. Algunas combinaciones químicas pueden ser seguras, pero se vuelven peligrosas cuando se introduce un tercer elemento como son el agua, calor, impacto y luz solar, entre otros. En los procedimientos para la elaboración de las composiciones pirotécnicas y de los artificios deben establecerse las precauciones o medidas para prevenir y evitar los riesgos derivados de reacciones no deseadas. En las tareas que realicen los trabajadores debe evitarse el mezclado accidental de productos químicos y manejar cada material de manera individual, seguir las instrucciones pertinentes para cada etapa del proceso de fabricación; revisar la compatibilidad de todos los ingredientes que se usan para elaborar las composiciones pirotécnicas; vigilar que las características (por ejemplo, el tamaño en el caso de metales) y verificar que la calidad o pureza de las materias primas sea la adecuada para su uso, para esto la elección de un proveedor autorizado es lo más recomendable.

También es importante vigilar la humedad en el ambiente y la presencia de humedad en las composiciones (humedad residual), ya que provoca cambios físicos y químicos en las sustancias y la producción de calor, que de acumularse conduzcan a una combustión espontánea o una explosión.

Control de electricidad estática: En la fabricación de materiales pirotécnicos, la electricidad estática es un factor de riesgo significativo para su ignición, por lo que es primordial implementar medidas preventivas para controlar y minimizar su acumulación. Las mezclas pirotécnicas son propensas a encenderse por electricidad estática (descargas electroestáticas), especialmente aquellas que contienen polvos metálicos; también algunas que no contienen ningún metal, como son las mezclas para silbatos.

Existe una fuerte relación entre la humedad ambiental y una descarga electroestática. En condiciones de baja humedad, el aire es un mal conductor de la electricidad, lo que permite que la electricidad estática se acumule en objetos y superficies; en condiciones húmedas, el aire conduce mejor la electricidad, lo que permite que la electricidad estática se disipe de manera más eficiente, reduciendo el riesgo de accidentes debido a una descarga electroestática. Para evitar la acumulación de electricidad estática se recomienda que la humedad relativa sea del 60 %, una regla generalmente sugerida es evitar el contacto con mezclas pirotécnicas cuando la humedad es menor al 50 %.

Adicionalmente, se debe evitar el uso de ropa de material sintético (telas compuestas de poliéster, naylon, acrílico, etc.) utilizar herramientas y equipos adecuados (como pisos y mesas antiestáticas), así como sistemas de puesta a tierra. Estas medidas son básicas para mejorar la seguridad del entorno de trabajo y prevenir la ocurrencia de accidentes o explosiones causadas por la electricidad estática. Asimismo, se deberá contar con sistemas de protección para descargas electroestáticas atmosféricas (pararrayos), que permita salvaguardar los polvorines de adecuadamente, conforme a lo establecido en la Norma Oficial Mexicana “NOM-022-STPS-2015, Electricidad estática en los centros de trabajo-Condiciones de seguridad”.

Prevención de incendios: En la fabricación de pirotecnia existe un riesgo alto de incendios, por lo que es crucial controlarlo o minimizarlo. La prevención de incendios es un conjunto de medidas que tienen como objetivo evitar o disminuir el riesgo de incendios y proteger a los trabajadores y las instalaciones. La prevención de incendios implica la aplicación de medidas, como son: mantener limpia de maleza las áreas exteriores a los talleres y almacenes, el manejo y almacenamiento adecuado de materiales, la prevención de la electricidad estática y la revisión periódica de las instalaciones, equipos, áreas de trabajo y áreas de almacenamiento para asegurar que cumplan con los requisitos técnicos de seguridad indicados en las normas y regulaciones; también incluye contar con extintores de incendios adecuados, en buenas condiciones y en cantidad suficiente, así como la capacitación de los trabajadores sobre su uso correcto. Otros aspectos importantes son: contar con procedimientos de evacuación que se entiendan con facilidad, capacitar al personal sobre cómo reaccionar eficazmente en caso de un incendio, señalizar las áreas y las rutas de evacuación, y realizar los simulacros correspondientes.

Para prevenir incendios la SEDENA establece medidas de seguridad aplicables a las instalaciones donde se elaboran, almacenan y comercializan artificios pirotécnicos. La STPS también las establece en la norma oficial mexicana “NOM-002-STPS-2010 Condiciones de seguridad - Prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo” y en la “NOM-005-STPS-1998, Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo para

el manejo, transporte y almacenamiento de sustancias químicas peligrosas", y la autoridades de Protección Civil requiere planes y procedimientos para la prevención de incendios como parte del Programa Interno de Protección Civil.

Debemos recordar que los accidentes ocurren en cualquier momento y a cualquier hora del día, por lo que es indispensable estar preparados; por lo que tomar en consideración los aspectos o elementos contemplados en esta sección e implementar las medidas correspondientes, permitirá tener un lugar de trabajo más seguro y reducir el riesgo de accidentes en la elaboración y manejo de artificios pirotécnicos.

6. Conclusiones y recomendaciones

- Este documento se basa en el conocimiento de expertos en pirotecnia, contenido en las publicaciones técnicas que fueron consultadas, el cual sumado a la experiencia de los maestros pirotécnicos busca incidir en la implantación de prácticas más seguras en la elaboración y el manejo de la pirotecnia para beneficio de los trabajadores, consumidores y de la propia actividad pirotécnica.
- La pirotecnia es una actividad que implica riesgos significativos debido a que se manejan sustancias inflamables, explosivas y tóxicas, por lo que es necesaria una adecuada gestión con el propósito de prevenir accidentes y minimizar los posibles impactos.
- El manejo inadecuado de las sustancias, mezclas pirotécnicas y de los artificios pirotécnicos, si como la falta de medidas de seguridad son causas importantes de los accidentes durante el proceso de elaboración, transporte, comercialización y uso, lo que representa un peligro potencial para la vida, la salud y la integridad, de todas las personas involucradas.
- La manipulación de sustancias químicas y la posible generación de reacciones peligrosas requieren se aplique un enfoque riguroso en seguridad, lo que implica contar con instalaciones adecuadas, equipo de protección personal, herramientas adecuadas, procedimientos de trabajo y capacitación, entre otras, además del compromiso de los trabajadores con la seguridad.
- En la elaboración de pirotecnia se requiere poner especial atención en la identificación de los peligros y riesgos que presentan cada una de las operaciones o tareas que se realizan, para adoptar las medidas de seguridad pertinentes.
- En la pirotecnia es esencial contar con personal capacitado sobre los peligros y riesgos existentes, así como en las medidas de seguridad que deben considerarse para realizar las diferentes tareas en las que estén involucrados. Una capacitación continua de los trabajadores es fundamental para mantener un entorno de trabajo seguro y prevenir accidentes.
- Es importante vigilar y verificar que los artificios pirotécnicos para la venta al público en general, contengan como máximo 500 miligramos (0.5 gramos) de carga pírica explosiva, como lo dispone la Secretaría de la Defensa Nacional.
- Para la quema de artificios pirotécnicos es indispensable se elabore un programa especial de Protección Civil o programas de emergencias, con el objetivo de prevenir que ocurran accidentes, reducir su impacto y, salvaguardar a los espectadores y participantes en el espectáculo.

- Es responsabilidad de los fabricantes y de las autoridades correspondientes que la producción de artificios pirotécnicos se realice únicamente en instalaciones que cuenten con los permisos y/o autorizaciones y que cumplan con las medidas de seguridad requeridas, evitando que esta actividad se realice de manera ilegal en viviendas o dentro de zonas urbanas.
- Actualmente no se ha establecido en las regulaciones y/o la normatividad nacional una clasificación de los diversos tipos de artificios pirotécnicos y sobre las características que debe cumplir cada tipo de artificios para su elaboración, comercialización y uso;

tampoco se han determinado las pruebas a que deberán someterse. Esta carencia deberá ser subsanada por las autoridades correspondientes con la participación de los fabricantes de pirotecnia e instituciones educativas y de investigación.

- Es imprescindible que los pirotécnicos y la población tomen conciencia sobre los riesgos que representan los artificios pirotécnicos, promoviendo e incitando a que se haga un uso seguro y responsable.

Glosario

Aislamiento térmico: Es la capacidad de un material para evitar o impedir que el calor se transfiera entre dos espacios. Se logra mediante barreras térmicas que impiden o limitan el flujo de calor entre dos medios a diferente temperatura.

Anión: Un anión es un ion con carga eléctrica negativa, es decir, que ha ganado electrones. Los aniones pueden ser monoatómicos (como el anión cloro, Cl^-) o poliatómicos (como el anión clorato, ClO_3^-).

Atmósfera explosiva: Es la mezcla con el aire de sustancias inflamables en forma de gases, vapores, nieblas o polvos; esta mezcla al encontrar un punto de ignición, la combustión se propaga rápidamente a la totalidad de la mezcla.

Caloría: Es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua en un grado centígrado.

Calzado de protección: Aquel al que se le incorporan características especiales para proteger al usuario de lesiones que puedan producirse en el desarrollo de sus actividades y que ha sido especialmente diseñado y fabricado para cumplir las especificaciones y requisitos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-113-STPS-2009, Seguridad-Equipo de protección personal-Calzado de protección-Clasificación, especificaciones y métodos de prueba.

Catión: Un catión es un ion con carga eléctrica positiva, es decir que ha perdido electrones. Los cationes pueden ser monoatómicos (como el catión aluminio, Al^{3+}) o poliatómicos (como el catión amonio, NH_4^+).

Chispa: Partícula encendida o luminosa que se desprende de algo. Las chispas se producen por diferentes causas: un material en combustión (por ejemplo: madera encendida, pirotecnia), la fricción o impacto (entre metales o materiales) o una descarga eléctrica o electroestática.

Chispa electroestática: Chispa producida por una descarga electroestática de corta duración entre dos cuerpos con cargas eléctricas diferentes. Por ejemplo, cuando una persona que camina sobre una alfombra (acumulando una carga eléctrica por fricción) y toca una superficie metálica (como es la manija de una puerta), se descarga la carga eléctrica acumulada produciéndose una chispa. Se estima que una persona al caminar puede acumular una cantidad de electricidad estática aproximada de 15 mJ (0.015 joules).

Color: Es una impresión producida por un tono de luz en los órganos visuales (ojos), y que es interpretada por el cerebro de acuerdo con las distintas longitudes de onda que componen la parte visible del *espectro electromagnético*.

Combinación estequiométrica: En una ecuación química indica la cantidad de cada sustancia (reactivos) que se necesita para obtener una cantidad dada de productos, de manera que la totalidad de los reactivos se combinen para obtener los productos.

Composición o mezcla pirotécnica: Mezcla de materiales constituida esencialmente por un agente oxidante y un combustible. Una composición pirotécnica es capaz de producir una reacción autosostenida cuando se calienta a su temperatura de ignición, produciendo un efecto visible o audible (llamas, chispas, humos o sonido). Por ejemplo, la pólvora negra está constituida comúnmente por 75 % de nitrato de potasio (KNO_3); 15 % de carbono y 10 % de azufre.

Composición flash (composición de destello): Es una composición pirotécnica que arde en forma brillante y rápidamente, y si está confinada produce un sonido fuerte.

Compresión adiabática: Proceso en el cual un gas al comprimirlo, pasa de una presión dada a otra mayor sin que ceda o tome calor del medio (transferencia de calor = 0). En este proceso el gas se calienta ya que la energía suministrada por la compresión se convierte en calor.

Deflagración: Se refiere a un tipo de explosión en la que la velocidad de la llama se desplaza en la mezcla aire-combustible a una velocidad inferior a la del sonido (la velocidad del sonido es aproximadamente 335 metros/segundo). Los explosivos que producen deflagraciones se conocen comúnmente como materiales de baja explosividad, por ejemplo, la pólvora negra. Sin embargo, el daño que pueden ocasionar los materiales de baja explosividad varía ampliamente en función del combustible utilizado y de su confinamiento (empacado).

Descarga electrostática: Es un fenómeno que ocurre cuando se libera la electricidad estática entre dos objetos. La descarga electroestática se produce entre dos objetos con cargas eléctricas diferentes, y habitualmente se manifiesta como una chispa visible. (Ver chispa electroestática)

Detonación: Se refiere a un tipo de explosión en la que la velocidad de la llama se desplaza en la mezcla aire-combustible a una velocidad mayor a la del sonido (la velocidad del sonido es aproximadamente 335 metros/segundo). Las detonaciones son más potentes y de manera general el daño que producen es mayor al de las deflagraciones.

Ecuación química: Expresión simbólica de una reacción química, que indica las cantidades relativas de reactantes y productos. (Diccionario de la Lengua Española)

Electrón de valencia: Los electrones de valencia son los electrones que se encuentran en el nivel de energía más alto en un átomo. Son los electrones más externos de un átomo que pueden ser atraídos por otro átomo cercano o atraer a los electrones de otro átomo, por lo que son los responsables de la interacción entre átomos de distintos elementos o entre los átomos del mismo elemento (formación de enlaces).

Elemento (elemento químico): Es una sustancia que está constituida por el mismo tipo de átomos y que no es posible dividir en sustancias más simples por medios físicos o químicos. La parte básica de un elemento es un átomo, que contiene protones, neutrones y electrones; actualmente se conocen 118 elementos, los cuales están incluidos en la tabla periódica de los elementos.

Enlace covalente: El enlace covalente se forma cuando dos átomos no metálicos comparten electrones. Esto significa que ambos átomos comparten los electrones necesarios para completar sus capas exteriores, lo que da lugar a la formación de una molécula.

Enlace iónico: El enlace iónico es un tipo de unión química en la cual los átomos logran estabilidad al transferir electrones, el átomo dona uno o más electrones para convertirse en un ion positivo (catión), mientras que el otro átomo acepta estos electrones para convertirse en un ion negativo (anión). Estos iones se atraen eléctricamente y se mantienen unidos por fuerzas eléctricas, formando compuestos iónicos.

Enlace metálico: El enlace metálico es un enlace químico que mantiene unidos los átomos de los metales entre sí. Este tipo de enlace se presenta en los metales puros, por ejemplo, el aluminio, y también se presenta en las aleaciones. Un sólido de este tipo está formado por átomos muy juntos. En la mayoría de los casos, la capa electrónica más externa de cada uno de

los átomos metálicos se superpone con una gran cantidad de átomos vecinos, como consecuencia, los electrones se mueven continuamente de un átomo a otro y no están asociados específicamente con ningún átomo.

Enlace químico: Se denomina enlace químico a las fuerzas que mantienen unidos a los átomos de los compuestos. Existen tres tipos principales de enlaces: iónico, covalente y metálico.

Espectro electromagnético: Es el conjunto de todos los tipos de radiación que se desplazan en forma de onda, ordenadas en zonas de acuerdo con su longitud de onda. En el espectro electromagnético las longitudes de onda se ordenan de mayor a menor de la siguiente manera: ondas de radio, microondas, infrarrojos, luz visible, luz ultravioleta, rayos X y rayos gamma.

Espectro visible (luz visible): Es la región del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir. No hay límites exactos en el espectro visible; un típico ojo humano responderá a longitudes de onda desde 400 a 700 nanómetros, aunque algunas personas son capaces de percibir longitudes de onda desde 380 a 780 nanómetros.

Estado de energía: La teoría atómica establece que los electrones que forman parte de un átomo están distribuidos en "capas" o niveles energéticos. De acuerdo con la capa que ocupe un electrón tiene una cantidad de energía determinada. De manera natural los electrones de los átomos se ordenan en niveles de energía llamado el estado fundamental; mientras no se le proporcione energía al átomo, los electrones permanecerán en el estado fundamental; cuando el átomo recibe energía, esta energía es transferida al electrón, cambiando a un nivel de energía superior (estado excitado), y para regresar a su estado fundamental deberá emitir esta energía adicional (en forma de un *fotón*).

Estado de oxidación: En un elemento es la carga hipotética que un átomo tendría si todos sus enlaces con otros elementos fueran completamente iónicos. Se representa por números enteros (0, 1, 2, 3 o 4), los cuales pueden ser positivos o negativos; indica el número de electrones que tiene de más o de menos en comparación con el estado fundamental o base del átomo. El estado base de un átomo o elemento, es aquel que presentaría cuando se encuentra libre o no combinado con otro elemento, y le corresponde el estado de oxidación “cero”.

Estequimetría: Relación numérica entre las *masas* de los elementos que forman una sustancia. Es la proporción en que se combinan los elementos o compuestos en una reacción química.

Estructura cristalina: Es una forma sólida de cómo se ordenan y agrupan los átomos, moléculas, o iones. Estos se encuentran agrupados de manera ordenada y en patrones de repetición que se extienden en las tres dimensiones del espacio.

Explosión: Se refiere a una liberación repentina y rápida de energía que produce presiones potencialmente perjudiciales. Las *deflagraciones* y las *detonaciones* constituyen dos tipos de explosiones.

Fotón: Cada una de las partículas que, según la física cuántica, constituyen la luz y en general la radiación electromagnética. Los fotones viajan a la velocidad de la luz, carecen de *masa*, no tienen carga eléctrica y su energía depende de su longitud de onda.

Fuegos artificiales: Conjunto de luces de colores y detonaciones producido por diferentes dispositivos de pólvora y usado en fiestas públicas. (Diccionario de la Lengua Española)

Identidad química: Son las propiedades que distinguen a una sustancia de otras. Es un concepto empleado en la química para clasificar las sustancias y comprender sus diferencias. También, es el nombre (nombre técnico o conforme a un sistema de nomenclatura química) con el que se designa una sustancia.

Higroscópico: Es la capacidad de una sustancia o material de absorber la humedad del medio en el que se encuentra.

Homogeneidad: se refiere es a la uniformidad o igualdad en las características; es decir que tiene una estructura o composición uniforme en todas partes.

Ion: Átomo o molécula que tiene una carga eléctrica positiva o negativa. Se denomina: anión cuando tiene carga eléctrica negativa y catión cuando tiene carga eléctrica positiva.

Joule o julio: Es una unidad de energía en el Sistema Internacional de Unidades que se define como la cantidad de trabajo realizado al aplicar una fuerza de un newton para desplazar un objeto una distancia de un metro, su símbolo es "J". La energía, el trabajo y el calor se relacionan mediante un fenómeno conocido como "el efecto Joule"; el cual se refiere a la energía disipada en forma de calor cuando una corriente eléctrica fluye a través de un material. Este fenómeno permite la conversión entre la energía, el trabajo y el calor, de manera que la equivalencia de un joule a energía eléctrica y energía calorífica es 1 joule = 1 newton x metro = 1 watt x segundo = 0.238902957 calorías.

Longitud de onda: Es la distancia física entre dos puntos a partir de los cuales la onda se repite. La frecuencia es la medida del número de repeticiones de una onda por unidad de tiempo; por lo que, a mayor frecuencia menor es la longitud de onda y cuando la frecuencia es menor, mayor es la longitud de onda. Asimismo, la frecuencia es directamente proporcional a la energía que transporta una radiación, es decir, a medida que la frecuencia aumenta, la energía de la onda aumenta.

Masa: Es una medida de la cantidad de materia que posee un cuerpo.

Modelo atómico de Bohr: Es un modelo clásico del átomo propuesto por el físico Neils Bohr en 1913, fue el primer modelo atómico en el que se propone que los electrones están dispuestos en órbitas circulares concéntricas alrededor del núcleo y que sólo podían ocupar órbitas específicas, llamadas órbitas estables. Posteriormente se desarrollaron otros modelos para representar de manera gráfica la estructura y funcionamiento de los átomos, hasta llegar al modelo actual que es el modelo atómico cuántico.

Nanómetro: Unidad de longitud que equivale a una mil millonésima parte de un metro, su símbolo es "nm"; un milímetro tiene un millón de nanómetros. Por ejemplo, el diámetro del cabello humano mide de 70 000 a 80 000 nm, es decir de 0.07 a 0.08 milímetros.

Nivel de energía: Los electrones se ubican a diferentes distancias del núcleo de un átomo de acuerdo con el nivel de energía que poseen. Existen siete niveles de energía (K, L, M, N, O, P, Q). Los electrones en el nivel de energía más bajo (nivel de energía K) tienen la menor cantidad de energía, y los electrones en niveles superiores (L, M, N, O, P, Q) tienen más energía, aumentando la energía en cada nivel en una cantidad fija y discreta, a semejanza de los escalones en una escalera. Los electrones pueden saltar de un nivel de energía inferior al nivel superior siguiente si absorben esta cantidad de energía, y cuando los electrones saltan de un nivel de energía superior a uno más bajo, emiten energía, a menudo en forma de luz visible.

Octaazufre: Es un sólido amarillo, inodoro e insípido, y es el principal componente de azufre elemental (99 %). Presenta una estructura cristalina formada por los átomos de azufre con fórmula S_8.

Pellet: Es una denominación genérica utilizada para referirse a pequeñas porciones de material aglomerado en bolas de un cierto tamaño o diámetro.

Pirotecnia: Técnica de la fabricación y utilización de materiales explosivos o fuegos artificiales. (Diccionario de la Lengua Española)

Puntos calientes: Puntos en donde la compresión adiabática de pequeñas burbujas de gas ocluidas genera una temperatura de hasta 400 °C o 500 °C; estos puntos existen durante una fracción de segundo (10^{-5} segundos). (GICHD)

Punto de fusión (Temperatura de fusión): Es la temperatura a la que cambia la materia del estado sólido a líquido.

Reacción exotérmica: Es cualquier reacción química que desprenda o libere energía, ya sea como calor o luz.

Red de puesta a tierra (Sistema de puesta a tierra): El conjunto de conductores y conexiones, electrodo o electrodos, accesorios y otros elementos metálicos enterrados que interconectados entre sí tienen por objeto drenar a tierra las corrientes de un rayo y las generadas por las cargas eléctricas estáticas. (NOM-022-STPS-2015)

Respirador: Es un equipo de protección personal de presión positiva o negativa que purifica o suministra aire, para proteger las vías respiratorias del usuario contra contaminantes que se encuentran en el medio ambiente laboral. (NOM-116-STPS-2009)

Respirador purificador de aire de presión negativa contra partículas: En donde los respiradores purificadores de aire de presión negativa contra partículas, son aquellos que retienen las p contaminantes del aire al pasar a través del filtro, por medio de la acción respiratoria (inhalación-exhalación) (NOM-116-STPS-2009). Es decir retienen las partículas del aire ambiente a través de los elementos filtrantes, introducidos mediante la inhalación del usuario.

Respirador purificador de aire de presión positiva: Se denominan respiradores purificadores de aire de presión positiva, a los equipos en los cuales el aire pasa a través del filtro (material filtrante) y fluye apoyado por un motor-ventilador (ventilación asistida). (ISPCH, 2018)

Riesgo: Existen diversas definiciones del riesgo, de manera general para el caso de la actividad pirotécnica, el riesgo es el resultado de la combinación de tres factores: la peligrosidad que posee una sustancia (o composición pirotécnica), la exposición a esta sustancia y la vulnerabilidad o susceptibilidad de la persona expuesta a sufrir un daño.

Sal: Una sal es un compuesto químico formado por cationes (iones con carga positiva) enlazados a aniones (iones con carga negativa) mediante un enlace iónico. Por ejemplo: nitrato de potasio (KNO_3), carbonato de calcio ($CaCO_3$) y sulfato de cobre ($CuSO_4$). Las sales se producen principalmente mediante la reacción de un ácido con una base, otras maneras de obtenerlas son la reacción de un ácido con un metal, la combinación de un no metal con un metal, la reacción de dos sales y la reacción de un óxido con una base o un ácido. Por ejemplo, la obtención del carbonato de sodio se realiza mediante dos reacciones: 1. Reacción de sal común

con ácido sulfúrico: 2 NaCl + H_2SO_4 → Na_2SO_4 + 2 HCl; 2. Reacción de calcinación de Na_2SO_4 con caliza y carbón: Na_2SO_4 + $CaCO_3$ + 2 C → Na_2CO_3 + CaS + 2 CO_2

Sensibilidad: se refiere al nivel del estímulo necesario para provocar la ignición de una composición pirotécnica, en donde el estímulo es la energía proporcionada a la composición, ya sea por fricción, impacto (golpe), calor (térmica) o chispas (electroestática).

Temperatura de fusión: También conocida como punto de fusión, es la temperatura a la que un material cambia de estado sólido a líquido a una presión atmosférica determinada.

Temperatura de ignición: Es la temperatura mínima requerida para que inicie una reacción exotérmica rápida y que se propague por sí misma. Es decir, la temperatura mínima requerida para lograr la ignición y que ésta se propague.

Tabla periódica: Es una estructura en la cual los elementos se ordenan de acuerdo con su número atómico, es decir cuántos protones tiene el átomo del elemento; organizada en columnas (grupos) y filas (periodos), de manera que la posición de un elemento en la tabla periódica proporciona información sobre cómo están dispuestos sus electrones y sobre sus propiedades. Estas propiedades determinan el estado físico de un elemento a temperatura ambiente (gas, sólido o líquido), reactividad química y la capacidad de formar enlaces químicos con otros átomos. La tabla periódica está conformada por siete filas que corresponden a los periodos que vienen dados por las siete capas o niveles de energía K, L, M, N, O, P, Q. El periodo que ocupa un elemento coincide con su última capa electrónica.

Vaporización: la vaporización o evaporación es el proceso físico a través del cual la materia pasa de un estado líquido al estado gaseoso (vapor); también se emplea en algunos casos, para referirse al cambio del estado sólido (que por efecto de la temperatura vuelve líquido) al estado gaseoso.

Bibliografía consultada

American Pyrotechnics Association (2022). Emergency Response for Consumer Fireworks (UN 0336, Fireworks, 1.4G). https://www.americanpyro.com/fire-service

American Pyrotechnics Association (2022). Emergency Response for Display Fireworks (Display Fireworks, 1.1G, UN 0333or Display Fireworks, 1.3G, UN 0335). https://www.americanpyro.com/fire-service

Conkling John (1985). Chemistry of Pyrotechnics Basic Principles and Theory. Marcel Dekker Inc. https://archive.org/details/Chemistry_of_Pyrotechnics-_Basic_Principles_and_Theory_Conkling

Conkling J., Mocella C. (2011). Chemistry of Pyrotechnics Basic Principles and Theory. CRC Press. https://www.sciencemadness.org/whisper/files.php?pid=683421&aid=97986

Consejo de Seguridad Nuclear. ¿Qué es el átomo? https://www.csn.es/documents/10182/914801/FDE-01.05+-+El+%C3%A1tomo/cbe1e729-e612-49d7-a90b-02b511ba75a2?version=1.4#:~:text=El%20n%C3%BAcleo%20del%20%C3%A1tomo%20est%C3%A1,carga%20el%C3%A9ctrica%20negativa%20se%20compensan

Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2020). *Guía para el almacenamiento temporal y el uso de juegos pirotécnicos en exteriores*. https://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/377-GUAPIROTCNICOS.PDF

Consejo Nacional de Normalización y Certificación (CONOCER). Estándar de competencia EC 1046 Instalación de fuegos artificiales para la presentación de espectáculos aéreos. https://conocer.gob.mx/registro-nacional-estandares-competencia/

Geneva International Centre for Humanitarian Demining (GICHD, 2021). Chapter 5. Basic chemistry of explosives and hazards of home-made explosives and chemical precursors. Handbook. Geneva, 2021. https://www.gichd.org/our-response/mine-action-standards/improvised-explosive-device-clearance-good-practice-guide/ https://www.gichd.org/fileadmin/uploads/gichd/migration/fileadmin/GICHD-resources/rec-documents/external-documents/Improvised_Explosive_Device_Clearance_Good_Practice_Guide__2021.pdf

Gobierno del Estado de México (2021, diciembre). Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME). Estudio de mediciones de emisiones por quema de pirotecnia en el Edomex, mejoramiento de la composición y sustitución por tecnología. Informe Final. https://www.gob.mx/comisionambiental/documentos/estudio-de-mediciones-de-emisiones-por-quema-de-pirotecnia-en-el-edomex-mejoramiento-de-la-composicion-y-sustitucion-por-tecnologia

Gobierno del Estado de México (2024, julio). Acuerdo en el que se establece la capacitación de normas oficiales mexicanas aplicables al sector pirotécnico, en el Estado de México. Gaceta de Gobierno, CCXVIII, 11. https://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/pdf/gct/2024/julio/jul151/jul151b.pdf

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (2010). Evaluación de los riesgos específicos derivados de las atmósferas explosivas (ATEX). Notas Técnicas de Prevención número 876. España. https://documentacion.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/es/media/group.do?path=1063989

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (2021). Guía para la evaluación y prevención de los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo. España, 2021. https://www.insst.es/documents/94886/203536/Gu%C3%ADa+T%C3%A9cnica+para+la+evaluaci%C3%B3n+y+prevenci%C3%B3n+de+los+riesgos+derivados+de+atm%C3%B3sferas+explosivas+en+el+lugar+de+trabajo/d54dcb4f-2814-4b12-a591-ba9be3b4b0da

Instituto Mexiquense de la Pirotecnia (IMEPI, 2019). Tríptico cohetón https://imepi.edomex.gob.mx/sites/imepi.edomex.gob.mx/files/files/Tripticos/2020/Triptico_Cohet%C3%B3n%202019%20CURVAS.pdf

Instituto de Salud Pública de Chile (2018). Guía para la selección y control de equipos de protección respiratoria. Versión 2.0. https://www.ispch.cl/sites/default/files/D052-PR-500-02-001%20Guia%20para%20la%20seleccion%20y%20control%20de%20EPR.pdf

Kosanke K., Kosanke B., Jennings C. (2004). Lecture Notes for Pyrotechnic Chemistry. Pyrotechnic Reference Series. 2. *Journal of Pyrotechnics*. https://vdoc.pub/documents/lecture-notes-for-pyrotechnic-chemistry-pyrotechnic-reference-gd0puqd4sj00

Kosanke K., Kosanke B. (2013). Pyrotechnic Chemistry. Pyrotechnic Literature Series No. 4. *Journal of Pyrotechnics*. http://www.jpyro.co.uk/wp-content/uploads/bk2022h.pdf

Mantecón, Alejandro. Manual de seguridad pirotecnia. https://issuu.com/eamantecon/docs/manual_de_seguridad_en_pirotecnia_v6.0

Mantecón, Alejandro. Manual para la implementación sustentable de un sistema de gestión 5S para pirotecnia. https://es.scribd.com/document/400506672/Manual-5S-en-pirotecnia

Mantecón, Alejandro. Manual de seguridad en pirotecnia. Electricidad. https://es.scribd.com/document/400507785/Manual-de-Seguridad-en-Pirotecnia-Electricidad

National Fire Protection Association (2006). NFPA 1123 Code for Fireworks Display (Código para el despliegue de fuegos de artificio). https://atapars.com/wp-content/uploads/2021/01/atapars.com-NFPA-1123-2006.pdf

National Fire Protection Association (2006). NFPA 1124 Code for the Manufacture, Transportation, Storage, and Retail Sales of Fireworks and Pyrotechnic Articles (Código para la Fabricación, Transporte, Almacenamiento y Ventas Minoristas de Fuegos Artificiales y Artículos de Pirotecnia). https://trfireprevention.com/files/2019/08/NFPA_1124_-_2006.pdf

National Fire Protection Association (2011). NFPA 1126 Standard for the Use of Pyrotechnics Before a Proximate Audience. https://trfireprevention.com/files/2019/08/NFPA_1126-11-PDF.pdf

O'Connor, Brian. Explosiones, deflagraciones o detonaciones (2023). https://www.nfpa.org/es/news-blogs-and-articles/blogs/2023/03/27/explosions-vs-deflagrations-vs-detonations

Organización de las Naciones Unidas (2017). Recomendaciones relativas al transporte de mercancías peligrosas. Manual de Pruebas y Criterios (Sexta edición revisada). https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789213622827

Prada Pérez de Azpeitia, Fernando Ignacio. (2014). Petardos, cohetes y mucha química. *Revista Educacio Química EduQ*, 18, 44-51. https://publicacions.iec.cat/repository/pdf/00000216/00000093.pdf

Prada Pérez de Azpeitia, Fernando Ignacio de (2006). El Fuego: química y espectáculo. Anales de Química de la Real Sociedad Española de Química, 102(2), 54-59. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2006399.pdf

Secretaría de la Defensa Nacional. Manual de Servicios al Público de la Dirección General del Registro Federal de Armas de Fuego y Control de Explosivos. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/580723/Manual_de_Serv._Pub.pdf

Secretaría de la Defensa Nacional. Manual de Servicios al Público de la Dirección General del Registro Federal de Armas de Fuego y Control de Explosivos. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/180751/Msp_Dn-27.pdf

Secretaría de Trabajo y Previsión Social (1998). Norma Oficial Mexicana NOM-005-STPS-1998, Relativa a las condiciones de seguridad en los centros de trabajo para el almacenamiento, transporte y manejo de sustancias inflamables y combustibles. DOF, 2 de enero de 1998. https://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/normatividad/normas/nom-005.pdf

Secretaría de Trabajo y Previsión Social. (2024). Norma Oficial Mexicana NOM-017-STPS-2024, Equipo de protección personal-Selección, uso y manejo en los centros de trabajo.

DOF 28 de marzo de 2025.
https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/9496/stps/stps.html

Secretaría de Trabajo y Previsión Social (2015). Norma Oficial Mexicana NOM-022-STPS-2015, Electricidad estática en los centros de trabajo-Condiciones de seguridad (DOF, 1 de abril de 2016)
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5435581&fecha=01/04/2016#gsc.tab=0

Secretaría de Trabajo y Previsión Social. (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-002-STPS-2010, Condiciones de seguridad-Prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo. DOF, 9 de diciembre de 2010.
https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4228/stps/stps.htm

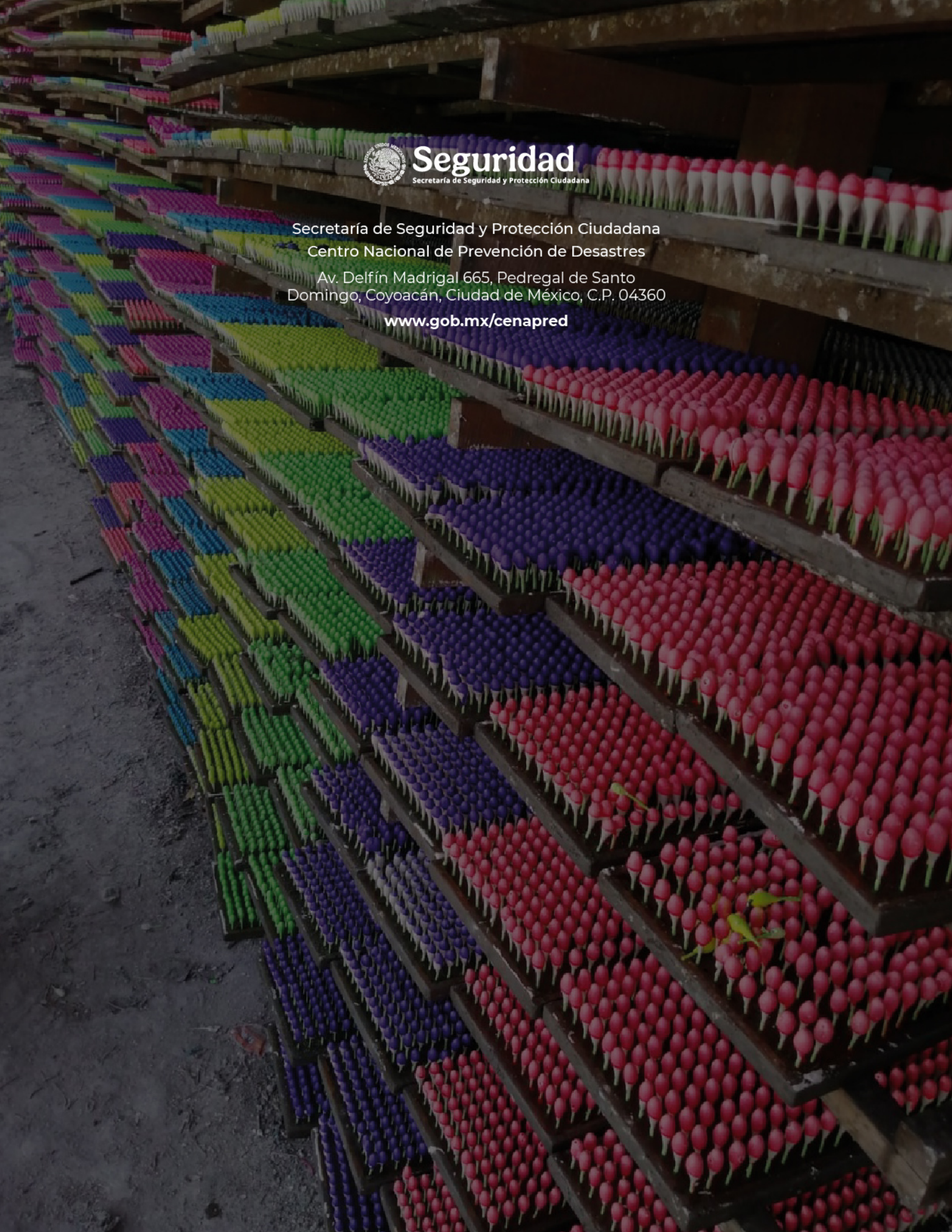
Secretaría de Trabajo y Previsión Social. (2009). Norma Oficial Mexicana NOM-116-STPS-2009, Seguridad-Equipo de protección personal-Respiradores purificadores de aire de presión negativa contra partículas nocivas-Especificaciones y métodos de prueba. (DOF, 22 de diciembre de 2009).
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5125952&fecha=22/12/2009#gsc.tab=0

Shimizu Takeo. (1981). Fireworks The Art Science and Technique. Pyrotechnica Publications. Austin Texas, USA, Third edition. https://vdocuments.mx/fireworks-the-art-science-and-technique-by-takeo-shimizu.html?page=1

Shimizu Takeo. (1998). Pyrotechnic Literature Series No. 6. Selected Pyrotechnic Publications of Dr. Takeo Shimizu, Part 3 Studies on Fireworks Colored-Flame Compositions
http://www.jpyro.co.uk/wp-content/uploads/Sh3_FULL_pl9s.pdf

Surianarayanan M., Sivapirakasam S.P., Swaminathan Govindarajan. (2008). Accident data analysis and hazard assessment in fireworks manufacture. Science and Technology of Energetic Materials, 69(6).

Universidad Nacional del Litoral. “Química. Conceptos fundamentales”. (2014).
https://fiq.unl.edu.ar/vivilafiq/wp-content/uploads/2017/03/Quimica-Ingreso.pdf



Seguridad
Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana

Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana
Centro Nacional de Prevención de Desastres
Av. Delfín Madrigal 665, Pedregal de Santo Domingo, Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04360
www.gob.mx/cenapred