



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA



GUÍA DE ANÁLISIS FORENSE POST-EXPLOSIÓN PARA EXPLOSIVOS DE BAJA POTENCIA

TESINA

Que para obtener el título de Químico Farmacéutico Biólogo

PRESENTA:

Bernal Suárez Ramírez

No. De Cuenta: 9929612-0
Carrera de Química Farmacéutico-Biológica
Año de término de la carrera: 2007
Orientación: Farmacia

Asesor: M. en C. Rodolfo Carreón Sánchez

México D. F.

Enero de 2014

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. Resumen..... | 5 |
| 2. Introducción..... | 6 |
| 3. Objetivos..... | 7 |
| 4. Problema de investigación..... | 8 |
| 5. Importancia del estudio..... | 9 |
| 6. Limitación del estudio..... | 10 |
| 7. Tipo de estudio..... | 10 |
| 8. Marco teórico..... | 11 |
| 8.1. Generalidades sobre explosivos..... | 11 |
| 8.1.1. Definición de explosivo..... | 11 |
| 8.1.2. Clasificación de los explosivos..... | 11 |
| 8.1.3. Proceso explosivo, la deflagración y la detonación..... | 15 |
| 8.1.4. Explosivos de baja potencia..... | 18 |
| 8.1.5. Artefactos explosivos improvisados (IED's) y su relación con el análisis forense de explosivos de baja potencia..... | 20 |
| 8.1.6. Recuperación de IED intactos..... | 25 |
| 8.2. Investigación forense y criminalística de explosivos..... | 26 |
| 8.2.1. Objetivos de la investigación..... | 26 |
| 8.2.2. Recomendaciones generales para el investigador..... | 27 |
| 8.2.3. Manejo de la escena en un incidente explosivo..... | 28 |
| 8.2.4. Amenazas a la seguridad..... | 29 |
| 8.2.5. Recomendaciones para proteger la escena..... | 29 |
| 8.3. Protocolo de respuesta inmediata después de una explosión..... | 31 |

| | |
|---|----|
| 8.3.1. Objetivos perseguidos..... | 31 |
| 8.3.2. Coordinación y control de las actividades..... | 32 |
| 8.3.3. Intercambio de información..... | 32 |
| 8.3.4. Despliegue de personal..... | 33 |
| 8.3.5. Equipamiento..... | 36 |
| 8.4. Investigación externa y el manejo de la escena..... | 37 |
| 8.4.1. Manejo de los testigos..... | 37 |
| 8.4.2. Reconstrucción de la escena..... | 39 |
| 8.4.3. Víctimas..... | 40 |
| 8.4.4. Búsqueda de un sospechoso..... | 40 |
| 8.5. Investigación en el lugar de los hechos..... | 42 |
| 8.5.1. Dirección..... | 42 |
| 8.5.2. Registro..... | 42 |
| 8.5.3. Búsqueda y recolección de indicios..... | 43 |
| 8.5.4. Como prevenir la contaminación de indicios..... | 44 |
| 8.5.5. Identificación y conservación de indicios..... | 45 |
| 8.6. El Análisis de explosivos de baja potencia en el laboratorio Forense..... | 47 |
| 8.6.1. Análisis pre-explosión de explosivos de baja potencia..... | 47 |
| 8.6.2. Análisis microscópico y visual..... | 48 |
| 8.6.3. Separación de mezclas de explosivos..... | 48 |

| | |
|---|----|
| 8.6.4. Técnicas analíticas..... | 49 |
| 8.6.5. Cromatografía en capa fina (CCF)..... | 49 |
| 8.6.6. Espectroscopia de infrarojo (IR)..... | 49 |
| 8.6.7. Difracción de rayos X..... | 51 |
| 8.7. Análisis forense post-explosión de explosivos de baja potencia en el laboratorio forense..... | 52 |
| 8.7.1. Análisis visual y microscópico..... | 54 |
| 8.7.2. Extracción con disolventes..... | 55 |
| 8.8. Procedimientos analíticos particulares para el análisis post-explosión de explosivos de baja potencia..... | 56 |
| 8.8.1. Pólvora..... | 56 |
| 8.8.1.1. Apariencia física de la pólvora..... | 56 |
| 8.8.1.2. Identificación analítica de la pólvora..... | 58 |
| 8.8.1.3. Análisis post-explosión..... | 60 |
| 8.8.1.4. Ensayo in situ..... | 60 |
| 8.8.1.5. Espectroscopia de Infrarojo..... | 61 |
| 8.8.1.6. Cromatografía iónica..... | 63 |
| 8.8.2. Pyrodex..... | 66 |
| 8.8.2.1. Apariencia física del pyrodex..... | 66 |
| 8.8.2.2. Identificación analítica del pyrodex..... | 66 |
| 8.8.2.3. Análisis post-explosión..... | 67 |

| | |
|--|----|
| 8.8.3. Polvo dorado (Golden powder) | 70 |
| 8.8.3.1. Análisis post-explosión | 71 |
| 8.8.4. Pólvora sin humo | 72 |
| 8.8.4.1. Aditivos de la pólvora sin humo | 73 |
| 8.8.4.2. Apariencia física de la pólvora sin humo | 74 |
| 8.4.3.3. Análisis post- explosión | 75 |
| 8.4.3.3.1. Análisis de la nitrocelulosa | 75 |
| 8.4.3.3.2. Análisis de la nitroglicerina | 76 |
| 9. Discusión de resultados | 79 |
| 10. Conclusiones | 81 |
| 11. Referencias | 83 |
| 12. Glosario | 88 |

1. RESUMEN

El estudio de los explosivos en materia forense se puede dividir en dos áreas: la investigación en el lugar de los hechos y la investigación en el laboratorio.

En la presente guía se describen los principales conceptos para introducirse en el campo de los explosivos, describiendo su clasificación y análisis, así como los principales métodos para identificar y cuantificar a los **explosivos de baja potencia** después de que ocurre la explosión, considerando que en el estudio de estos se utilizan técnicas diversas, que pueden ser presuntivas o confirmativas y que además poseen variaciones en especificidad y sensibilidad, factores que influyen directamente en la obtención de resultados de calidad significativa.

2. INTRODUCCIÓN

El análisis forense de explosivos en sus respectivas áreas de estudio puede consumir mucho tiempo y resultar peligroso para los investigadores. Debido a los riesgos implícitos y a la necesidad de indicios de calidad, es necesario contar con metodologías que aseguren dicha calidad en las muestras durante su búsqueda, recolección, embalaje y traslado, hasta el momento de su llegada al laboratorio; ya que si esto no ocurre, los indicios serán de poca utilidad, y más aun si acontece su empleo en el tribunal. En nuestros días existen gran variedad de técnicas que pueden ser utilizadas para la detección, análisis y cuantificación de explosivos, y que se basan en diferentes fundamentos teóricos, prácticos y tecnológicos. Estas técnicas pueden ser instrumentales y no instrumentales, y presentar diferente grado de sensibilidad y precisión en los resultados obtenidos, además de requerimientos económicos que implican su uso y mantenimiento. Entre las principales técnicas encontramos: colorimetría, difracción de rayos x, resonancia magnético nuclear, cromatografía para gases y líquidos, y espectroscopia de infrarrojo, espectroscopia de masas entre otros.^{1,2}

Así el presente trabajo tiene el interés de determinar la metodología más adecuada, aplicable a la identificación de explosivos de baja potencia **post-explosión**.

3. OBJETIVOS

Objetivo General:

- Aportar las bases teóricas para la investigación forense de explosivos de baja potencia en el laboratorio y en el lugar de los hechos.

Objetivos Específicos:

- Describir las características generales de los principales explosivos de baja potencia.
- Clasificar los explosivos de acuerdo a la fuerza de su explosión, mediante la revisión bibliográfica de referencias actuales.
- Determinar cuál es la metodología analítica más apropiada para los explosivos de baja potencia post-exposición y su aplicación en los estudios forenses.

4. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El estudio forense de los explosivos en general es un área poco explorada en México, la información científica sobre este campo en particular suele ser de difícil acceso. Esto se debe en gran medida a que ésta se encuentra dispersa en diversas fuentes de información (electrónicas e impresas), o en su caso pertenece exclusivamente al sector militar; por su parte en las bibliotecas públicas y en universidades no es una temática de uso común. Por lo que uno de los principales problemas del investigador forense es contar con una metodología específica de búsqueda y con material informativo fácil de consultar, que apoye a obtener información útil de manera rápida y efectiva. Este hecho es indispensable cuando se presenta un presunto hecho delictivo que involucra el estudio y análisis de explosivos.

Los especialistas también necesitan contar con información adecuada que les permita solventar problemáticas y prevenir riesgos, que de no resolverse de manera eficaz y un intervalo de tiempo apropiado puede representar el fracaso de la investigación. Cabe mencionar que los explosivos de baja potencia son el grupo más utilizado de los materiales energéticos utilizados en hechos delictivos y con fines terroristas, hecho que determina el interés de recopilar información referente a este tipo de compuesto en la presente guía.

5. IMPORTANCIA DEL ESTUDIO

El presente trabajo tiene carácter informativo y presenta las bases teóricas para el análisis forense de explosivos de baja potencia. Debido al gran número de explosivos disponibles y a la dificultad de su análisis post-exposición, resulta indispensable evaluar y analizar las técnicas que se emplean para su estudio, con el fin de mejorar la calidad de resultados obtenidos durante el transcurso de una investigación relacionada con un presunto hecho delictivo.

6. LIMITACIÓN DEL ESTUDIO

Para el desarrollo de la tesina se obtuvo información bibliográfica de interés científico, la cual se presenta como una guía básica que se limitará al estudio de los explosivos de baja potencia, y principalmente a su análisis post-explosión, del año 1990 al año en curso.

7. TIPO DE ESTUDIO

Es una tesina de carácter informativo en donde el tipo de estudio es bibliográfico, longitudinal, descriptivo y documental de interés científico que permita entender mejor las técnicas de identificación y análisis para explosivos débiles post-explosión.

8. MARCO TEÓRICO

8.1. GENERALIDADES SOBRE EXPLOSIVOS

8.1.1. DEFINICIÓN DE EXPLOSIVO

En términos sencillos un explosivo puede definirse como una sustancia ó mezcla de sustancias, capaces de producir una reacción química rápida, al ser inducida por fricción, impacto, choque, descargas eléctricas o calentamiento, además produce una gran cantidad de energía, en forma de luz, calor, gas, ondas sonoras y ejerce alta presión en los alrededores. En conjunto, los explosivos, propulsores y materiales pirotécnicos se clasifican en un grupo de compuestos llamados materiales energéticos.

Muchos explosivos orgánicos se componen de un núcleo de carbono unido covalentemente a grupos oxidantes tales como el grupo nitro, nitroamina, éster de nitrato, entre otros. Estos grupos presentan enlaces tales como N-N y N-O y tienen dos o más átomos unidos covalentemente, con electrones libres presentes en orbitales p. Esto crea repulsión electrostática entre los átomos y consecuentemente muchos explosivos tienen calor de formación positivo. Durante una explosión ocurre una reacción de óxido reducción interna donde estos enlaces se rompen y forman productos gaseosos, como N_2 y CO_2 , donde los electrones no enlazados forman enlaces pi estables.³

8.1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS EXPLOSIVOS

Los explosivos pueden clasificarse de forma diversa de acuerdo al campo científico de estudio en donde se les catalogue, las características más representativas a considerar son su composición física, química, potencia, sensibilidad, uso y comercio. A continuación se describen cuatro clasificaciones de interés:

1. Según su potencia.

a) Explosivos de baja potencia

Los explosivos de baja potencia también conocidos como propulsores ó **deflagrantes**, contienen el oxígeno suficiente para su **combustión** y producen **deflagración** por un mecanismo de incendio superficial. Este tipo de explosivos pueden explotar bajo condiciones de confinamiento, como consecuencia del incremento de la presión causada por la liberación de productos gaseosos, también pueden detonarse si son activados por el “choque o fricción” con otro explosivo. Los explosivos de baja potencia, incluyen sustancias como la pólvora, la pólvora sin humo, y los propulsores utilizados en pistolas.

b) Explosivos de alta potencia

Estos explosivos no necesitan confinamiento para explotar, sus reacciones químicas son más rápidas y siguen el fenómeno de detonación. En este caso la reacción química es seguida de una onda de choque de alta presión, que se propaga a través de la sustancia explosiva. Estos explosivos suelen detonarse a una velocidad entre 5500 y 9500 m/s, y esta velocidad de detonación se utiliza para comparar el rendimiento de diferentes explosivos. Ejemplos de explosivos de alta potencia son el **TNT** (trinitrotolueno), **RDX** (ciclotrimetilentrinitramina), **NG** (nitrogliclerina) y **HMX** (ciclotetrametilentetramina).^{4, 5}

2. Según su sensibilidad (primarios y secundarios)

a) Explosivos primarios

La sensibilidad de los explosivos a los estímulos tiene un amplio espectro. Los explosivos que se detonan por la luz o por estimulación mecánica modesta son llamados explosivos primarios. Los explosivos primarios también se conocen como iniciadores y son clasificados de acuerdo a la efectividad de causar la detonación de otro explosivo. Algunos explosivos primarios son pobres iniciadores mientras otros son

iniciadores poderosos y pueden ser usados como detonadores.⁶ Los explosivos primarios difieren de los explosivos secundarios porque llevan a cabo una transición rápida del incendio a la detonación y tienen la capacidad de transmitirla a otros explosivos menos sensibles.

b) Explosivos secundarios

Los explosivos secundarios que necesitan el choque de otra explosión o un impulso de alta energía para explotar, son conocidos como secundarios. Estos explosivos en presencia de calor simplemente se incendian en pequeñas cantidades, contrario a los primarios que explotan fácilmente bajo esta condición.

Se han diseñado varios ensayos de sensibilidad para determinar la susceptibilidad de varios explosivos a estímulos mecánicos y térmicos, algunos materiales están muy cerca del punto intermedio, entre un explosivo secundario y un primario.^{6,7,8}

3. Según su composición química.

Acorde a los grupos funcionales que forman el compuesto explosivo Plets dividió a los explosivos en las ocho clases siguientes, dependiendo de los grupos funcionales que contienen, cada grupo es llamado **explosóforo**.^{3,9}

–NO₂ y –ONO₂ en sustancias orgánicas e inorgánicas

–N=N– y –N=N=N– en azidas orgánicas e inorgánicas y en diazocompuestos.

–N₂⁺, X⁻, en diazo compuestos en donde X es un halógeno = Cl.

–N=C como grupo funcional presente en fulminatos.

–OCIO₂ y –OCIO₃ en cloratos y percloratos orgánicos e inorgánicos respectivamente.

–O–O– y –O–O–O– en peróxidos orgánicos e inorgánicos y ozónidos respectivamente.

–C≡C– en acetileno y metales acetilados.

M–C enlaces metálicos unidos a carbono en algunos compuestos organometálicos.

4. Con base al comportamiento explosivo.

Considerando dicho comportamiento se puede aplicar la clasificación propuesta por Agrawal, basada en recientes desarrollos en este campo. Dicha clasificación se presenta en el listado siguiente y agrupa las características más importantes de los explosivos^{3, 9}.

1. Explosivos térmicamente estables o resistentes al calentamiento.
2. Explosivos de alto rendimiento, por ejemplo de alta densidad o alta velocidad de detonación.
3. Explosivos activados por fusión.
4. Explosivos insensibles de alta potencia (IHEs, por sus siglas en inglés Insensitive High Explosives)
5. Plastificantes energéticos aglutinantes para explosivos, y compuestos propulsores.
6. Materiales energéticos sintetizados mediante el uso de pentóxido de dinitrógeno (N_2O_5).

Los términos definidos anteriormente clasifican a los explosivos desde varios puntos de vista, para así facilitar su estudio. Los avances en la tecnología de los **materiales energéticos** ha ido de la mano de aplicaciones cada vez más exigentes y en general se considera que explosivos con alta estabilidad térmica, y con una baja sensibilidad al impacto y a la fricción son los más deseables^{3, 9}.

8.1.3. PROCESO EXPLOSIVO, LA DEFLAGRACIÓN Y LA DETONACIÓN

Una **explosión** ocurre cuando una gran cantidad de energía se libera repentinamente. Esta energía, por ejemplo puede provenir de un exceso de presión generado en una caldera, por los productos de una reacción química que involucra materiales explosivos, o por una reacción nuclear descontrolada.

Para que una explosión ocurra debe haber una acumulación local de energía en el sitio de la explosión, la cual es repentinamente liberada. Esta energía puede ser disipada como ondas de choque, propulsión de los desechos, o por la emisión de radiación térmica o ionizante.

De acuerdo con lo anterior las explosiones pueden clasificarse en tres grupos; explosiones físicas, explosiones químicas y explosiones nucleares.

El calentamiento de un material reactivo trae como resultado la descomposición exotérmica. El calor resultante puede además incrementar la tasa de reacción y puede conducir eventualmente a una reacción auto sostenida conocida como **deflagración**. Las ondas de choque a gran velocidad, también pueden proporcionar la fuente de calor inicial para producir la reacción.

Una sustancia se puede clasificar como un **explosivo deflagrante** cuando una pequeña cantidad de esta, sin estar confinada, se incendia repentinamente al ser expuesta a fricción, altas temperaturas, choque, flama o chispa. Los explosivos deflagrantes se incendian más rápido y más violentamente que los materiales combustibles ordinarios.¹⁰

Bajo ciertas condiciones las reacciones deflagrantes pueden llegar a un grado de reacción supersónico y constante, llamado detonación. En la deflagración los productos de reacción fluyen hacia afuera del material sin reaccionar, por el contrario, en el proceso de detonación los productos se dirigen hacia adentro del material a gran velocidad. Un explosivo detonante es una sustancia explosiva cuya vía inicial de descomposición se da a través de ondas de choque, más que por mecanismos térmicos.

La velocidad de las ondas de choque en explosivos sólidos o líquidos está entre 1500 y 9000 m/s, una magnitud mayor que la que se da en el proceso deflagrante^{11,12}. El grado de la descomposición del material, se rige por la velocidad a la cual transmite la onda de choque, no por el grado de transferencia de calor.

En el proceso de detonación, un frente de choque o zona de choque, se propaga a una velocidad característica, sobre el material sin reaccionar, a temperaturas y presiones altas. Inmediatamente detrás de esta zona de choque, esta la zona de reacción química donde el material original, es convertido rápidamente en productos de reacción.^{11,12}

La amplitud del frente de choque, y la zona de reacción puede ser tan pequeña como unos cuantos milímetros, dependiendo de la naturaleza del explosivo y de las condiciones de frontera. La presión y temperatura en la zona de detonación puede exceder algunos cientos de miles de atmósferas y los 3000°C de temperatura. A continuación se presenta la **Tabla 1**, donde se comparan las características de un material combustible.

Tabla 1. Comparación de las características presentadas por un material combustible no explosivo, un deflagrante y materiales explosivos detonantes.

| Sustancias combustibles no explosivas | Sustancias explosivas deflagrantes | Sustancias explosivas detonantes |
|--|--|---|
| 1.-Iniciado por flama, chispa altas temperaturas | Iniciado por flama, chispa, fricción ,choque temperaturas altas | Muchos capaces de detonar si se inician adecuadamente |
| 2.- No pueden ser iniciados en estado húmedo | No pueden ser iniciados en estado húmedo | Pueden iniciarse en estado húmedo |
| 3.-Se incendian con flama sin ningún sonido | Producen un sonido “sordo” y largo, acompañado de un silbido, y fuego. | Producen un sonido fuerte y estruendoso algunas veces con fuego |
| 4.-Necesita fuentes externas | O ₂ presente en la formulación | O ₂ presente en la formulación |
| 5.-Reacción lenta | Reacción subsónica | Reacción supersónica |
| 6.-Propagación mediante reacciones térmicas | Propagación mediante reacciones térmicas | Propagación a través de ondas de choque |

8.1.4. EXPLOSIVOS DE BAJA POTENCIA

Los explosivos de baja potencia incluyen polvos, **propulsores** y mezclas de químicos que normalmente **deflagran**, es decir se incendian rápidamente con una velocidad de propagación menor que la velocidad del sonido, a diferencia de la detonación donde la velocidad de propagación es mayor que la velocidad del sonido. En los E.U.A del año 1990 a 1994, 44% de todas las explosiones ocurridas, involucraron explosivos débiles, si se excluyen los líquidos flamables de las estadísticas, 64% de todos los sucesos reportados involucraron el uso de este tipo de explosivos.¹³

Estos explosivos generalmente reaccionan por procesos de óxido-reducción. Las formulaciones típicamente consisten en un oxidante como el nitrato, clorato o perclorato, y un combustible como carbón, azúcar, dextrina, goma roja, o metales como aluminio o magnesio. Algunos compuestos orgánicos, como la nitrocelulosa, tienen los ingredientes requeridos internamente, ya que el grupo éster de nitrato oxida al carbono y a los **átomos** de hidrógeno en la misma molécula.

Muchos explosivos débiles también poseen aditivos para varios propósitos, tales como azufre y trisulfato de antimonio (**estibnita**) que pueden agregarse a la fórmula para disminuir la temperatura de ignición o para hacer la composición más reactiva. Otros materiales son usados para estabilizar la mezcla, mantienen los componentes unidos, evitan que se empasten, cambian de color y controlan la cantidad del humo que se despiden.

Algunos componentes pueden tener más de una función, por ejemplo la dextrina, que puede ser usada como combustible, y también para mantener los componentes unidos.

En la **Tabla 2** se describen características relevantes de los principales explosivos de baja potencia relacionados con el análisis forense.

Tabla 2. Principales explosivos de baja potencia relacionados al análisis forense.

| Explosivo | Componentes | Apariencia | Características Importantes |
|--------------------------------------|--|---|--|
| Pólvora | KNO ₃ , S, C | Gránulos cristalinos negros de forma irregular | Velocidad de detonación: 500m/s Sensible al impacto, fricción y "chispas". |
| Pyrodex | KNO ₃ , S, C KClO ₄ , NaC ₆ H ₅ CO ₂ Diciandiamida | Polvo gris, al microscopio aparece como agregados no homogéneos de material cristalino. | Sustituto de pólvora causa un daño similar a la pólvora común. Temperatura de autoignición ≈ 389.4°C, densidad:075 g/cm ³ . |
| Pólvora sin humo | Nitrocelulosa (NC) Nitroglicerina (NG) KNO ₃ , K ₂ SO ₄ NaCl Nitroguanidina | Morfología variada: partículas cilíndricas tubulares, en disco o placa. | Se dividen en tres clases según su composición: 1) Una base; posee NC. 2) Doble base; contiene NC y NG.3) Triple base: contiene NC, NG y nitroguanidina, o nitomanina. Son los compuestos mas energéticos, entre los explosivos debaja potencia. |
| Polvo Fotográfico. (Flash Powder) | KClO ₄ , Azufre, Al | Predomina el color gris del aluminio, el grado de homogeneidad varia. | Es una de las composiciones explosivas de baja potencia más peligrosas. Se produce mezclando oxidantes fuertes con polvos metálicos. Extremadamente susceptible a la ignición por chispas. Temperatura de ignición <200°C. |
| Polvo dorado (Golden Powder) | Ácido ascórbico KNO ₃ | Granúlos homogéneos en diferentes tonos cafés. Olor a "vitamina". | Sustituto de pólvora, los daños producidos por artefactos fabricados con este explosivo, exhiben el mismo daño que la pólvora común. |
| Otras combinaciones relacionadas | KNO ₃ + Azúcar KClO ₄ + Azúcar KClO ₃ + Al HCl + Al NaOH + Al | Varía según la composición. | Utilizados para producir artefactos explosivos y bombas de reacción química.* |

*El término "bombas de reacción química" se utiliza para describir reacciones que producen gas sin una fuente de ignición. La presión de gas aumenta hasta que el contenedor explota y libera su contenido.⁶

8.1.5. ARTEFACTOS EXPLOSIVOS IMPROVISADOS (BOMBAS CASERAS) Y SU RELACIÓN CON EL ANÁLISIS DE EXPLOSIVOS DE BAJA POTENCIA.

Las bombas caseras son comúnmente conocidas como **artefactos explosivos improvisados (IEDs)** por sus siglas en inglés, Improvised Explosive Devices. Muchas de estas bombas caseras están compuestas por explosivos débiles y a menudo están relacionadas con daños a la población ^{14,15}. Dos componentes esenciales para este tipo de IED, son un contenedor para confinar el explosivo y una mecha para encender el mismo. Un explosivo de alta potencia no requiere confinamiento para explotar.

Un IED típico está compuesto por un explosivo, un sistema de inicio y un contenedor. Hay muchos explosivos disponibles para uso ilegal y es importante conocer la disponibilidad de estos en alguna área geográfica determinada. Cada tipo de explosivo causa un daño característico y deja huellas químicas que pueden ser interpretadas por la ciencia forense. Conocer la naturaleza del artefacto explosivo ayuda al investigador a entrar en la mente del responsable. Por ejemplo: un sistema de inicio cronometrado, o un sistema activado por la propia víctima, puede indicar que el atacante conocía perfectamente los movimientos de la víctima y sus patrones de comportamiento.

Los explosivos de baja potencia se incendian rápidamente cuando ocurre la ignición, pero muchos de ellos requieren de un contenedor para generar la presión de gas necesaria para la explosión. Ejemplos comerciales son los cartuchos, balas y tubos plástico y cartón sellados, como los que se usan en los fuegos artificiales y cohetes. El uso de maletas y paquetes para ocultar y fragmentar al explosivo también es común. El estudio de los residuos de IED's es importante ya que se ha observado que los patrones de fragmentación (**Figura 1 a Figura 6**) de los contenedores pueden ser reproducibles para cada explosivo en particular y que en caso de que no se encuentren residuos químicos, este material puede orientar acerca de la naturaleza del material explosivo contenido.¹⁶



Figura 1. Daño producido a una tubería (10 pulgadas de largo por 1.5 de ancho) causado por pólvora.



Figura 2. Daño producido a una tubería (10 pulgadas de largo por 1.5 de diámetro) causado por pólvora sin humo de una base, iniciada una capa detonante.



Figura 3. Daño producido a una tubería (10 pulgadas de largo por 1.5 de diámetro) causado por pólvora sin humo de base doble, iniciada por flama.



Figura 4. Daño producido a una tubería (10 pulgadas de largo por 1.5 de diámetro) causado por pólvora sin humo de doble base, iniciada por una capa detonante.



Figura 5. Daño producido a una tubería (10 pulgadas de largo por 1.5 de diámetro) por un explosivo de alta potencia (RDX: militar C-4).

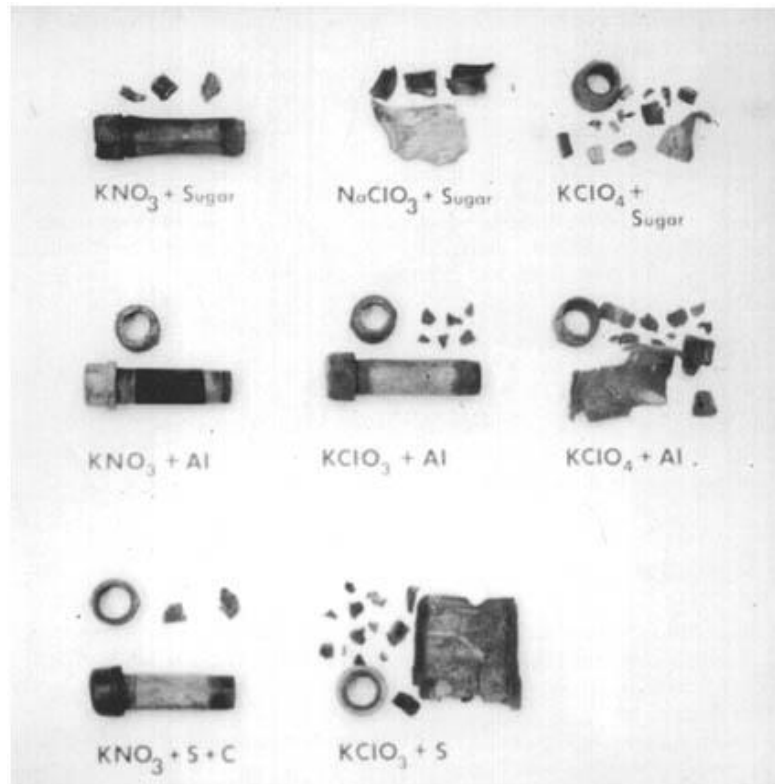


Figura 6. Daño a un tubo de 6 pulgadas de largo por una de diámetro, causado por varias combinaciones explosivas de baja potencia.

Otro aspecto importante para el investigador es conocer los métodos típicos para activar los IED y básicamente existen tres tipos.

- 1. Tiempo de retraso.** Al artefacto se incorpora un mecanismo de sincronización mecánico, eléctrico o químico. Una vez que el artefacto ha sido colocado, éste funcionará después de que transcurra un periodo de tiempo programado.
- 2. Operado por la víctima.** El artefacto (llamado a veces trampa explosiva) se diseña para funcionar cuando la víctima hace algo que dispara el sistema de inicio.
- 3. Controlado por el atacante.** El artefacto se inicia por el atacante mediante un control remoto.

Muchos sistemas de ignición son eléctricos y los fragmentos dañados casi siempre sobreviven a la explosión, por ejemplo:

- Partes del temporizador
- Baterías
- Circuitos electrónicos
- Alambre
- Fragmentos del detonador

El sistema de ignición no eléctrico más simple y el más utilizado es un fusible de seguridad, a base de pólvora que se quema a un intervalo fijo, típicamente de 4 pies/min. También se utilizan químicos que son inflamables al entrar en contacto con el substrato explosivo. Se pueden implementar mecanismos de demora que consisten en hacer fluir un ácido a través de corcho o un metal, antes de tener contacto directo con el material y desencadenar la reacción.

Los sistemas de fusión eléctrica requieren una fuente de energía (batería), el cable, un interruptor (con temporizador, radiocontrol, etc.) y el elemento de ignición (fuente de llama o calor suficiente para encender el explosivo, por ejemplo un alambre de resistencia).¹⁶

Puede decirse que la variedad de los componentes y fusibles en este tipo de artefactos, solo está limitada por la “imaginación” del fabricante, sin embargo cabe mencionar que entre más complejo sea el sistema, mayor será el potencial de evidencia forense que puede permanecer en el lugar de los hechos. En el caso de los explosivos de baja potencia el contenedor ayudará a producir la explosión, en otros casos funcionará como medio de transporte o para ocultar y fragmentar al explosivo. Estos contenedores son una evidencia importante. Por ejemplo se pueden encontrar huellas digitales, DNA, direcciones y nombres, que conectan al responsable con la escena del crimen.¹⁶

8.1.6. RECUPERACIÓN DE ARTEFACTOS INTACTOS

Afortunadamente, algunos artefactos no explotan debido a que no se diseñaron adecuadamente, no son funcionales o porque son desactivados a tiempo.

Cuando el artefacto se recupera intacto, el análisis procede rápidamente, debido a que es fácil identificar los materiales usados, el diseño de la bomba y el investigador puede determinar cómo el responsable tuvo acceso al sitio. El manejo de este tipo de escenas se concentra en tomar evidencia al realizar pruebas de forzamiento de cerraduras, e identificar huellas de pisadas y huellas digitales.^{17,18}

La recuperación de estos artefactos puede ayudar a la identificación temprana del tipo de explosivo utilizado, para los explosivos débiles el uso de contenedores “caseros” que ejercen una gran presión, es muy común.

8.2. INVESTIGACIÓN FORENSE Y CRIMINALÍSTICA DE EXPLOSIVOS

El efecto inmediato cuando ocurre una explosión es el caos. Se libera a gran velocidad una gran cantidad de energía en forma de ondas de choque, materia, gas y calor en el ambiente, causando daños graves que resultan en un alto grado de daño y muerte. En respuesta a estas situaciones se debe contar con un plan de respuesta rápido, sistemático y ordenado de emergencia e investigación para ayudar a las víctimas y para determinar qué es lo que ocurrió.

8.2.1. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación criminal en incidentes explosivos tiene el mismo objetivo que cualquier investigación: identificar a la persona responsable y llevarlo a una corte para ser juzgado. En este sentido es necesario presentar evidencias veraces y convincentes que involucren a la persona como autor del hecho. En estos casos es indispensable que el investigador proporcione rápidamente dos o tres piezas de información que tengan relación con el motivo, la oportunidad y los medios mediante los cuales transcurrió la explosión:

- El objetivo
- La víctima o víctimas
- El diseño y composición del artefacto explosivo

Los motivos más frecuentes que inducen al uso de explosivos son la experimentación, asesinato, suicidio, intimidación, vandalismo y destrucción de evidencia. Cabe mencionar que particularmente en la población rural de México son muy frecuentes los accidentes relacionados con el uso de la pirotecnia.^{19,20,21,22}

Para demostrar que un sospechoso cometió un crimen, el investigador debe ligarlo al artefacto, para establecer su adquisición y/o los componentes usados para culminar su objetivo, esto se puede conseguir analizando los materiales recuperados de la escena.

8.2.2. RECOMENDACIONES GENERALES PARA EL INVESTIGADOR

Las siguientes preguntas básicas^{14,23} deben ser parte integral en la investigación:

- **¿Qué**
 - materiales fueron usados para fabricar el artefacto?
 - grado de experiencia necesita el fabricante?
 - objetivo fue dañado por el artefacto?
 - pasó, un acto accidental o criminal?

- **¿Quién**
 - fue la víctima actual?
 - fue la victima que se quería dañar?
 - hizo el artefacto?
 - colocó el artefacto?

- **¿Por qué**
 - usó ese artefacto?
 - fue el artefacto colocado en ese lugar?
 - el artefacto fue construido como tal?

- **¿Cuándo**

- se fabricó el artefacto?
- fue colocado?
- se activó el dispositivo?
- explotó?

- **¿Dónde**

- se fabricó el artefacto?
- se colocó?
- se obtuvieron los componentes?

- **¿Cómo**

- se colocó el artefacto?
- se hizo?
- se activó?

8.2.3. MANEJO DE LA ESCENA EN UN INCIDENTE EXPLOSIVO

En este tipo de situaciones resulta importante determinar qué acciones se llevarán a cabo en el lugar de los hechos considerando muchas variables: el tipo de blanco, la cantidad de daño, la localización, el clima y las problemáticas personales. Debe realizarse una planeación estratégica y disciplinada para obtener resultados positivos.^{14, 23.}

8.2.4. AMENAZAS A LA SEGURIDAD

El asistir a las víctimas es una buena razón para introducirse en la escena explosiva, sin embargo se recomienda que los oficiales que atienden el hecho no lo hagan y a su vez impidan que otras personas entren, hasta que las personas capacitadas y con experiencia se hagan cargo. Este tipo de escenas son extremadamente inseguras no solo para los bomberos y personal de rescate, sino también para los transeúntes y “curiosos”. Los riesgos incluyen material sin explotar, sustancias químicas, fluidos biológicos, líneas eléctricas derribadas, y estructuras dañadas con mucha facilidad para colapsarse.

8.2.5. RECOMENDACIONES PARA PROTEGER LA ESCENA

La escena donde ocurre la explosión debe acordonarse cubriendo un área extra, correspondiente a un 20% adicional, para así asegurar la recuperación de todos los indicios, y para tomar muestras estándar que indiquen si existe alguna contaminación con explosivos anterior al suceso actual.

Proteger la escena en una explosión puede ser muy complicado, debido al número de personas y agencias que comúnmente acuden. Si no se tiene un rápido control es muy fácil que las escuadras de rescate, los bomberos, las ambulancias, policías etc. Contaminen y destruyan la evidencia física. Existen complicaciones no humanas como lo es el fuego. Mucha evidencia puede ser destruida al momento de combatir el fuego. Si es posible, los bomberos deben ser entrenados, para usar procedimientos de supresión poco destructivos; por ejemplo, rociando y removiendo los artículos para extinguirlos en otra parte.

Por otro lado se recomienda que de ser posible no se usen extinguidores químicos secos, si es necesario que se usen, siempre se debe tomar antes una muestra de material para usarla como control en el laboratorio.²³

Otro tipo de problema ocurre cuando se da una explosión en algún medio de transporte por ejemplo, la explosión de vehículo en una avenida concurrida puede causar muchos conflictos por la gran cantidad de personas afectadas y el proteger la escena del crimen podría quedar en segundo plano.

En muchos casos el área que debe cubrirse es muy grande como en el caso de la explosión de un aeroplano en vuelo, en donde se pueden encontrar residuos con kilómetros de diferencia entre uno y otro, si la explosión ocurre en una zona urbana las partes se encontrarán incrustadas y esparcidas entre los edificios.

Cada incidente presenta problemas peculiares al momento de proteger la escena. Algunas veces mantener la seguridad completa es difícil y se debe dar toda la protección posible y lo más rápido que se pueda, sin embargo no se debe olvidar que el principal objetivo es dar atención y salvaguardar la integridad de las víctimas.^{14, 23.}

8.3. PROTOCOLO DE RESPUESTA INMEDIATA EN UNA EXPLOSIÓN

Las siguientes guías subrayan los principales puntos que deben considerarse cuando se arriba a la escena de la explosión.²³

1. El trabajo de las primeras personas en acudir es atender a los heridos y proteger la escena. La educación avanzada y entrenamiento de la policía y personal de ambulancia en este tipo de eventos da grandes resultados.
2. Se debe asignar inmediatamente una persona que asuma el control de la escena y de la investigación criminal.
3. Se establecen límites: normalmente para cubrir la “tormenta de desechos” y un 20% más.
4. La escena debe ser declarada segura por un técnico en bombas antes de que la investigación física pueda comenzar.
5. La integridad estructural y los riesgos a la seguridad tales como fugas de gas deben ser evaluados por personal calificado.
6. Los testigos se deben identificar y cuestionar antes de que desaparezcan.

8.3.1. OBJETIVOS PERSEGUIDOS

Los objetivos son determinar: ^{14, 23}

-¿Qué ocurrió?

-¿Cómo y por qué pasó?

-¿Quién es el responsable?

Para cumplir estos objetivos los esfuerzos deben ser coordinados, dirigidos y controlados. Tres fases operacionales de soporte son:

-Coordinación y control

-Investigación policiaca normal: investigación externa

-Investigación especializada de la escena: investigación interna

Idealmente, un equipo de respuesta post- explosión debe estar atento a cualquier llamada y debe ser hábil para asistir rápidamente a las autoridades locales.

8.3.2. COORDINACIÓN Y EL CONTROL DE LAS ACTIVIDADES

Sin una coordinación y control apropiados, la investigación puede ayudar, pero los objetivos definitivos nunca se alcanzan, o sencillamente nunca se puede dar seguimiento a la investigación. Si varias agencias están involucradas en la investigación es imposible mantener un solo comando para todas las actividades. Sin embargo las funciones de cada agencia deben ser coordinadas, y la investigación criminal se debe realizar al máximo. Una vez que la escena del crimen ha sido asegurada y una cantidad suficiente de oficiales han llegado para entrevistar a los testigos, la segunda fase de la investigación debe comenzar al recopilar toda la información disponible.^{14,23}

8.3.3. INTERCAMBIO DE INFORMACIÓN

Se debe crear un protocolo para el mutuo intercambio de información para reducir la duplicación no necesaria y evitar conflictos entre las organizaciones. La importancia de la comunicación la investigación externa e interna a través del centro de control es vital. Todos los datos, independientemente de que parezcan intrascendentes, se deben informar, evaluar y registrar. Así mismo se recomienda realizar conferencias frecuentes, formales e informales para intercambio de información y también para aliviar el aburrimiento y elevar la moral.²³

8.3.4. DESPLIEGUE DE PERSONAL

La regla general es asignar personal en las zonas en las cuales sus habilidades sirvan de manera óptima para el objetivo de la investigación. En la búsqueda de evidencia en la escena es esencial que el investigador tenga experiencia y sepa exactamente lo que busca.

El coordinador de la investigación, debe asegurar que la moral y la concentración de los investigadores asignados, permanezcan adecuadas durante toda la búsqueda. La actitud mental de los trabajadores es muy importante para evitar estrés postraumático, como producto de la gran cantidad de trabajo físico realizado para recuperar indicios, el riesgo de derrumbes y la presencia de restos de las víctimas.

Experiencia del investigador. La experiencia necesaria se adquiere realizando ensayos prácticos sobre explosivos y asistiendo a las escenas reales de la explosión, inicialmente como aprendiz y posteriormente como un oficial. La **Figura 7** muestra la explosión de dinamita contenida en un equipaje. La **Figura 8** muestra una bola de fuego producida instantáneamente por un explosivo plástico. Este tipo de prácticas, es una oportunidad óptima, para buscar residuos de material que se sabe han sido expuestos a los efectos de un explosivo conocido.^{14,23}



Figura 7. Detonación de dinamita contenida en una maleta.



Figura 8. Bola de fuego producida por un explosivo plástico.

La **Figura 9** y **Figura 10** muestran los efectos antes y después de una explosión por gas natural en una casa. La naturaleza y distribución de los residuos en este tipo de explosiones es significativamente diferente de las demás y no hay material sólido perteneciente al explosivo. Ensayos similares se llevan a cabo en construcciones, carros y cualquier objeto susceptible de ataque.

Conociendo el artefacto empleado y de qué explosivo está constituido, la eficiencia y efectividad de los procedimientos de búsqueda, trabajo en equipo, la comunicación y los protocolos de análisis químico pueden ser revisados y mejorados^{14, 23}

8.3.5. EQUIPAMIENTO

La planeación para la obtención del equipo especializado necesario debe ser una consideración temprana del centro de control.

La siguiente lista muestra las herramientas que pueden ser utilizadas:

1. **Herramientas de mano:** palas, rastrillos, pinzas, desarmadores, cortadoras de alambre, llaves inglesas, sierras, cuchillos, cintas de medir, etc.
2. **Equipo ligero:** carretillas, botes de basura de metal, sierras eléctricas, sopletes de corte, escaleras de mano, equipos de iluminación portátiles, detectores de metal, equipo de video, cámaras fotográficas, materiales de dibujo, cuerdas, ganchos, poleas, tamices, papel kraft, etc.
3. **Equipo pesado:** camiones, excavadoras, gruas, material de apuntalamiento.
4. **Equipo personal:** cascos, lentes de seguridad, guantes de trabajo, zapatos de trabajo, etc.
5. **Otros equipos:** computadora, equipo de rescate, helicóptero para tomas aéreas y fotogrametría.



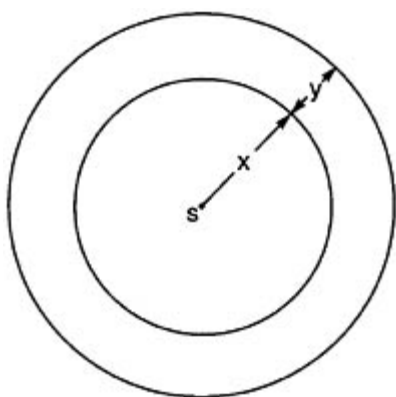
Figura 9. Explosión producida por gas natural



Figura 10. Secuelas de una explosión por gas natural

8.4. INVESTIGACIÓN EXTERNA Y EL ASEGURAMIENTO DE LA ESCENA

El primer paso es asegurar la escena para identificar y entrevistar a los testigos. Si la explosión se lleva a cabo en un espacio abierto, el área donde se encuentran los fragmentos y alrededores se debe asegurar (**Figura 11**). Los desechos producidos pueden ser lanzados a distancias considerables. Los oficiales asignados para asegurar la zona deben garantizar que no queden fragmentos del artefacto fuera de esta.



s- sitio de la explosión

x- mayor distancia desde el sitio en donde se encontraron fragmentos.

y - 20% de x

Área a asegurar = x + y

Figura 11. Perímetro que debe asegurarse en una escena explosiva.

8.4.1. MANEJO DE LOS TESTIGOS

Después de que la escena se ha asegurado, los oficiales deben concentrarse en identificar y entrevistar a los testigos. Muchos testigos en la escena suelen ser transeúntes que son una fuente importante de información y si abandonan la escena, la información se puede perder para siempre.

No siempre es fácil conducir entrevistas detalladas al momento, pero es importante establecer sus identidades y la información suficiente para facilitar un contacto posterior. Esta información incluye: nombre, dirección, teléfono y cualquier tipo de identificación (IFE, número de seguro social o licencia para conducir). En algunos casos el nombre de algún testigo, puede ser identificado como sospechoso después de investigaciones subsecuentes. Si es posible se debe preguntar al testigo acerca de lo

ocurrido y así obtener información que asista con la investigación. A continuación se presentan algunas preguntas adecuadas.^{23,24,25 26}

- ¿Estaba usted presente cuando ocurrió la explosión?
- ¿Cuánto tiempo llevaba usted en el área cuando ocurrió la explosión?
- ¿Dónde estaba usted cuando ocurrió la explosión?
- ¿Vio lo que ocurrió?
- ¿Qué estaba haciendo la víctima?
- ¿De qué color fue el humo o la luz producida?
- ¿Hubo más de una explosión?
- ¿Notó usted algún olor particular?
- ¿Cómo fue el sonido de la explosión?
- ¿Quién llegó dentro o fuera de la explosión?
- ¿Usted notó alguna cosa inusual en el área antes de lo ocurrido?

La unidad de investigación externa en la medida de lo posible también debe identificar los vehículos en el área inmediata, cuando menos registrando el número de placas.

8.4.2. RECONSTRUCCIÓN DE LA ESCENA

Cuando están involucradas construcciones dañadas por explosivos, un investigador debe ser asignado para localizar los planos de piso, para facilitar la entrada del equipo. Representaciones, fotografías y dibujos pueden ser de mucha ayuda al momento de entrar al lugar de la explosión y para reconstruir la escena del crimen. (Figura 12)

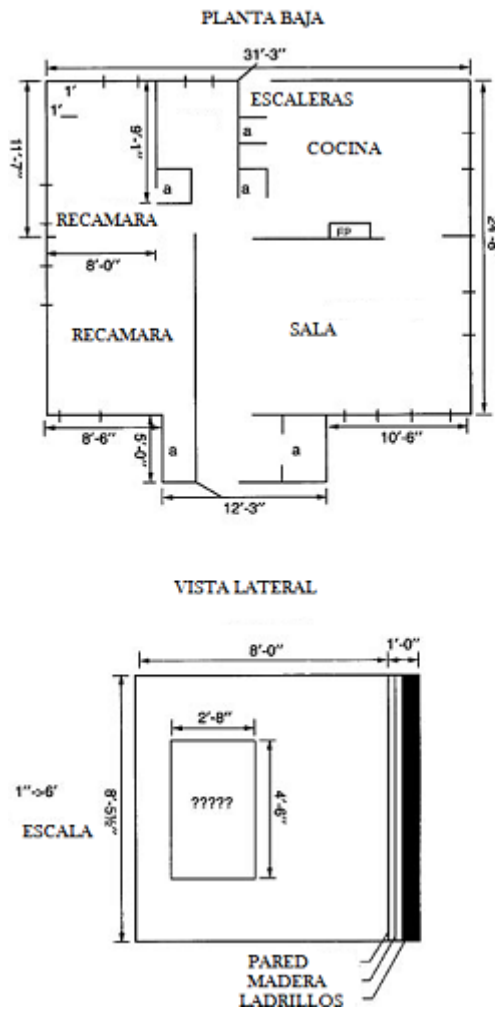


Figura 12. Plano de reconstrucción de la escena (casa), mediante planos.

8.4.3. VÍCTIMAS

Un miembro de la investigación externa debe enviarse al hospital a donde se lleven los heridos, para conservar los artículos pertinentes, como ropa y artículos de vestir que se le quitaran a los cuerpos de las víctimas.^{14,25,26,27}

Si cualquiera de las víctimas fallece como resultado de la explosión, y si la práctica local lo permite, el investigador debe estar presente en la autopsia y deberá recuperar todos los artículos que puedan utilizarse como evidencia.

8.4.4. BUSQUEDA DE UN SOSPECHOSO

La búsqueda puede involucrar: (1) al sospechoso; y (2) su vehículo, casa y lugar de trabajo. Si el sospechoso se identifica rápidamente, es posible que aun existan trazas del explosivo en sus manos, en cuyo caso deben tomarse muestras limpiando la piel y haciendo un raspado de uñas (**Figura 13**). El isopropanol es un disolvente adecuado para extraer las muestras de los compuestos depositados en la piel. La nitroglicerina se degrada en la piel, sin embargo otros explosivos como el RDX son absorbidos y detectables después de varias semanas. Residuos de pólvora y compuestos inorgánicos utilizados en explosivos débiles también puede ser detectados fácilmente en el sospechoso. También se han visto que se pueden encontrar residuos de explosivos en el cabello.^{14,28,29,30} La ropa por su parte también puede ser una fuente mayor de evidencias. Todas las muestras deben ser preservadas en recipientes limpios y herméticos.

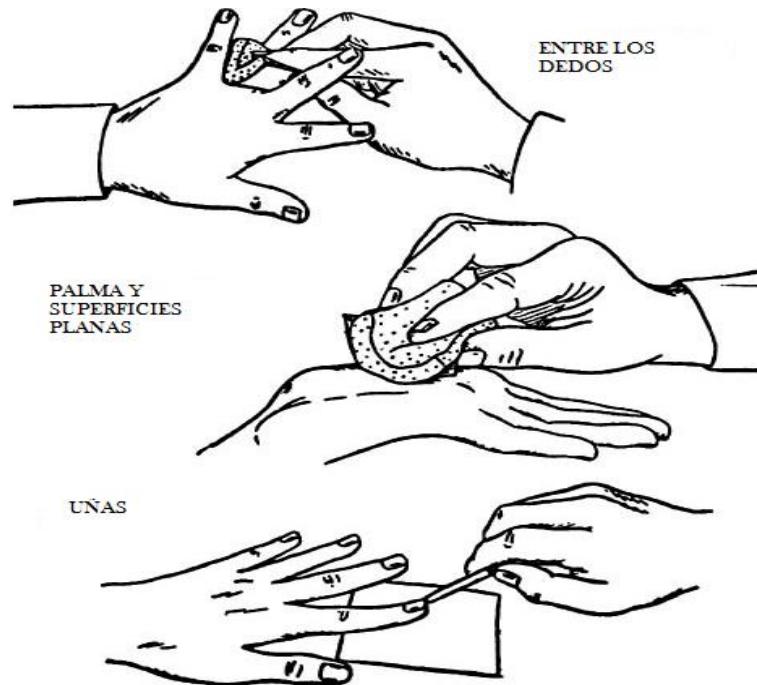


Figura 13. Toma de muestra en búsqueda de explosivos en la mano de un sospechoso, se pueden obtener cantidades traza útiles para identificar el explosivo

El vehículo del sospechoso también es una fuente muy relevante para obtener evidencia, particularmente si este se usó para transportar explosivos a granel antes de la búsqueda. Sin embargo la casa del sospechoso y su área de trabajo brindan la evidencia más importante, principalmente si se recuperan las herramientas usadas para fabricar el artefacto, que se pueden relacionar posteriormente con partes del artefacto recuperadas. La premisa de los investigadores al buscar es estar consciente de recuperar toda la información pertinente en la escena de la explosión: componentes de artefactos explosivos improvisados tales como, contenedores, explosivos y otros compuestos químicos identificados, cronómetros, cables y baterías. Se recomienda que el equipo involucrado en la investigación cuente con una estrecha comunicación entre el técnico en explosivos y el especialista científico forense para obtener mejores resultados.

8.5. INVESTIGACIÓN EN EL LUGAR DE LOS HECHOS

La investigación no debe empezar si antes no se ha formulado un plan y el área no ha sido asegurada, además de estar libre de peligro. Hay cuatro actividades básicas:

- Dirección
- Registro
- Búsqueda y recolección
- Identificación y conservación

8.5.1. DIRECCIÓN

El principal trabajo del líder de la investigación es que los especialistas tengan todo lo necesario para que puedan trabajar ininterrumpidamente. El líder también debe ayudar a reconstruir la escena pre-exposición. Si el blanco fue un automóvil se debe conseguir uno igual para realizar comparaciones. Si la explosión ocurrió dentro de un edificio, se debe conseguir alguna persona, a la que este le sea familiar dicha construcción para así poder aportar elementos para reconstruir la escena.

En determinadas circunstancias el líder puede decidir si es necesario mover la escena por completo, por ejemplo: cuando se detona un artefacto en un área pública que tiene que ser rápidamente limpiada, o en un área externa donde las condiciones climáticas son adversas.

8.5.2. REGISTRO

La escena del crimen siempre debe ser registrada a través de fotografías, videos, planos y notas. Las fotografías no deben sustituir a los planos, ni los planos a las fotografías, mismas que deben ser tomadas, con el fin de tener una perspectiva completa. A menudo esto se consigue con una toma aérea o bien grabando un video.

Por otro lado, las fotografías deben ser tomadas en el área inmediata del suceso y deben abarcar los principales elementos de prueba. El registro de la escena del crimen se hace en coordinación con el perito y las fotografías deben mostrar con detalle el daño específico y las lesiones de las víctimas.

8.5.3. BUSQUEDA Y LA RECOLECCIÓN DE INDICIOS

La recolección de la evidencia involucra la búsqueda y recuperación de artículos evidenciarios, los cuales pueden ser clasificados en artículos relacionados con el explosivo y otros artículos no relacionados.

La búsqueda se debe realizar hasta que toda el área sea cubierta ampliamente. Los métodos de búsqueda dependen del número de peritos, el grado de destrucción causada por el artefacto, y el diseño físico del área (**Figura 14**).

Cuando un material relevante se observa, este se retrata y filma in situ antes de colectarlo. Si hay grandes cantidades de desechos, como cuando se colapsa un edificio, es necesario realizar un tamizaje del material. Esto puede realizarse en el sitio o en un servicio de búsqueda. Los tamices son esenciales para realizar una búsqueda a fondo en el lugar de los hechos.

Se recomienda que el tamizaje se realice por dos equipos diferentes en una misma área para que la búsqueda sea más productiva.

Los materiales más voluminosos como cojines o puertas que pueden contener elementos de prueba deben analizarse con rayos x, para ver si han sido penetrados.

Posteriormente se deben fragmentar para realizar la búsqueda. Cuando se lleva a cabo una búsqueda el perito debe tener cuidado con dos problemas particulares:

- Hacer conclusiones apresuradas que pueden resultar ser incorrectas más tarde (es decir no se debe detener la búsqueda después de la recuperación de pocos elementos de prueba).

- Concentrarse únicamente en evidencia relacionada al artefacto explosivo.

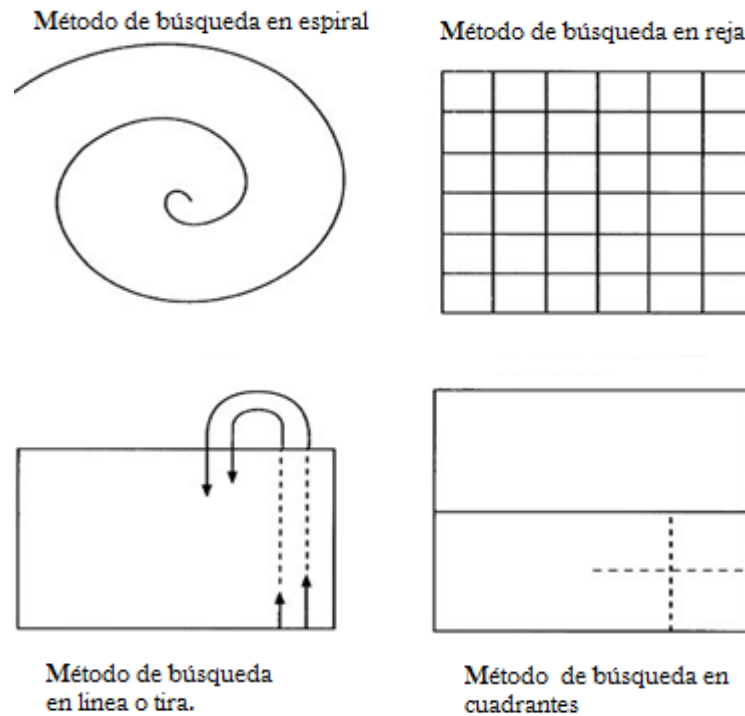


Figura 14. Métodos generales para la búsqueda de indicios en la escena de la explosión.

8.5.4. COMO PREVENIR LA CONTAMINACIÓN DE INDICIOS

Para satisfacer a un tribunal es importante que no se pueda hacer una pregunta acerca de una posible contaminación³¹, sobre todo cuando se trata de trazas de explosivos de alta potencia. En explosivos de baja potencia la contaminación también representa un reto a vencer, debido a que son de uso común y es posible encontrar residuos que pueden ser confundidos con facilidad. Se ha encontrado que la calidad en el muestreo es determinante en el éxito del análisis de laboratorio.^{32, 33} La responsabilidad puede recaer en todos los miembros del equipo, pero particularmente en el líder de la

investigación. Para evitar la contaminación de los elementos de prueba se dan las siguientes recomendaciones:³¹⁻³³

Ni los técnicos en explosivos, ni el personal militar deben manejar elementos de prueba relacionados con trazas de explosivos de alta o baja potencia.

La evidencia no debe ser manipulada con guantes, o herramientas que han sido contenidos en cualquier instalación o vehículo expuesto previamente a explosivos.

El material no debe contenerse en bolsas o latas, etc., que han sido almacenados o transportados en cualquier instalación o vehículo expuesto anteriormente a explosivos.

No se debe usar equipo ni transporte militar para investigaciones sobre explosivos, principalmente si se utilizó para transportar explosivos y si ha estado involucrado en descarga de municiones. Cualquier cosa utilizada para barrer, contener, muestrear, recolectar, tocar o mover la evidencia traza, debe estar limpio y no debe haber sido utilizado anteriormente.^{14, 31-33.}

8.5.5. IDENTIFICACIÓN Y LA PRESERVACIÓN DE INDICOS

El mejor lugar para buscar residuos es en el sitio donde se colocó el explosivo o en los objetos que estaban muy cerca de éste. En ocasiones el relleno del explosivo utilizado puede ser identificado por los materiales de envasado que sobreviven a la explosión. Estos pueden ser envolturas de dinamita, papel de explosivos militares como el C-4 y broches de metal y plástico de explosivos líquidos y emulsificados. En el caso de los explosivos débiles es posible identificarlos por el tipo de daño ocasionado, ya que el efecto es local y las partes del artefacto se encuentran en sitios muy cercanos al de la explosión, además el daño atribuido a la presión por deflagración es mínimo, en comparación con el que se presenta por la detonación de un explosivo de alta potencia. Cuando se toma material para examinar los residuos (plástico, suelo) también deben tomarse muestras estándar del mismo material, con propósitos de comparación. Esto se ilustra en la **Figura 15**. Si bien se puede aprender mucho de la evaluación de los

daños de la bomba en la escena, la determinación final no se debe hacer hasta que se tengan los resultados de los exámenes de laboratorio disponibles. Una vez que se identifique cada indicio, se debe realizar un registro asignando números o claves para documentar cada objeto encontrado.³⁴

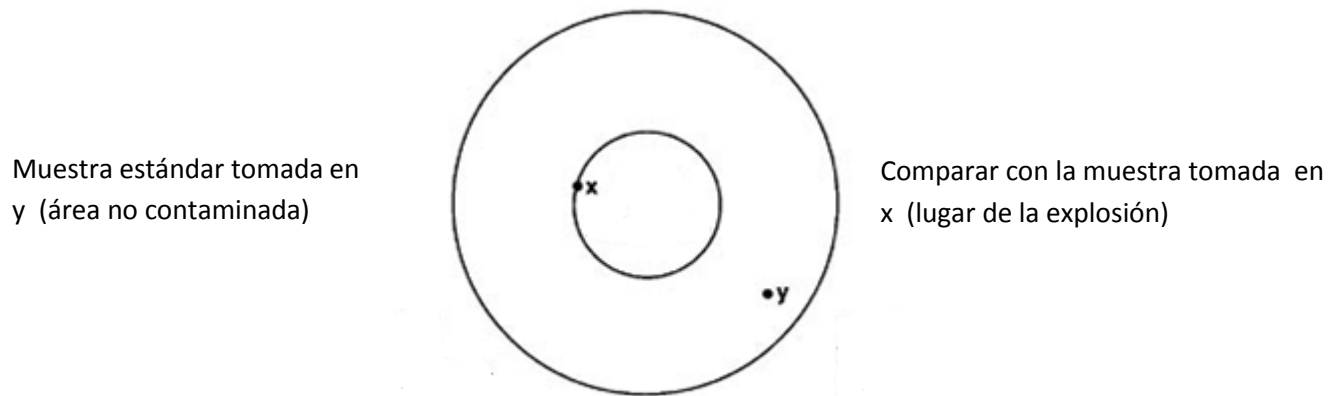


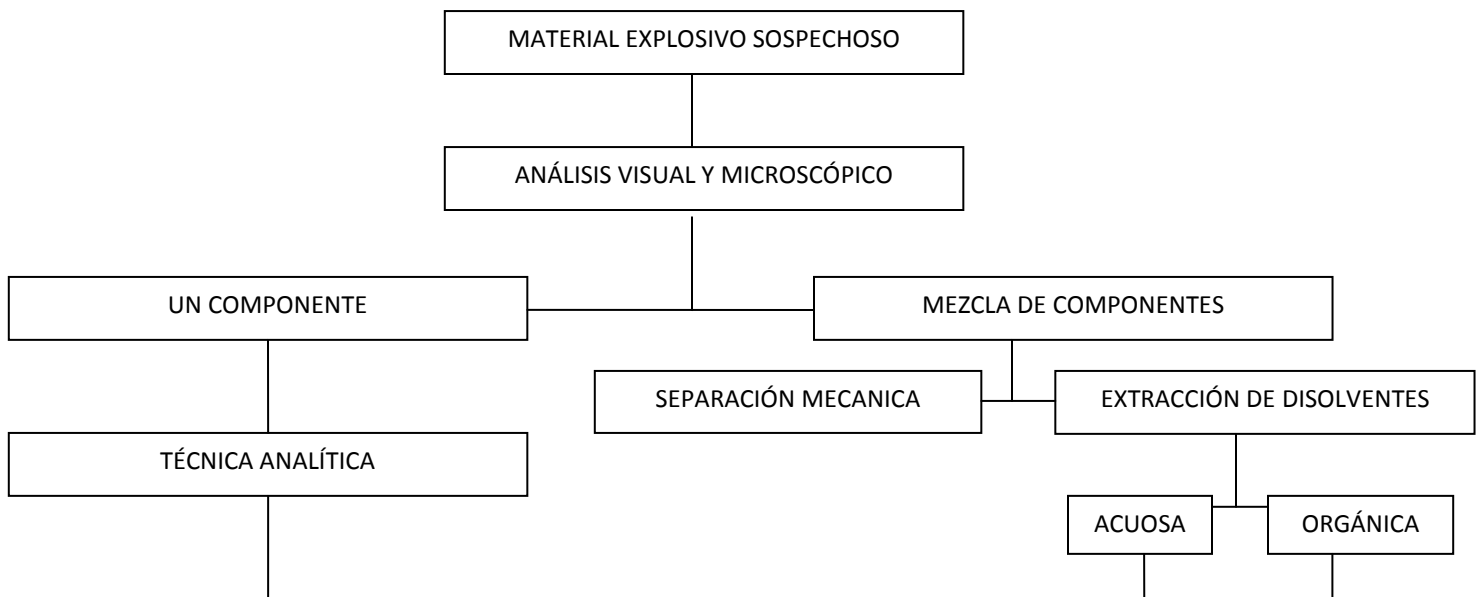
Figura 15. Colección de muestras estándar en la escena del crimen para encontrar posibles fuentes de contaminación en el área.

8.6 ANÁLISIS DE EXPLOSIVOS DE BAJA POTENCIA EN EL LABORATORIO FORENSE.

8.6.1. ANÁLISIS PRE-EXPLOSIÓN DE EXPLOSIVOS DE BAJA POTENCIA

Cuando se sospecha la presencia de un material explosivo de baja potencia se debe hacer un análisis sistemático, para identificar al oxidante y al combustible, para poder determinar con ello, la peligrosidad de la composición.

Se deben seguir rigurosos procedimientos de seguridad, en particular nunca se debe intentar encender el material desconocido, salvo en cantidades muy pequeñas (unos pocos miligramos) y usando lentes de seguridad, escudos y en un área especial y restringida. El **Esquema 1**, denota los pasos generales a seguir para el estudio de un explosivo débil pre-explosión^{1, 13, 14, 35, 36}.



Esquema 1. Pasos generales recomendados a seguir para el análisis forense de explosivos pre-explosión.

8.6.2. ANÁLISIS VISUAL Y MICROSCÓPICO

En este tipo de análisis es conveniente el uso de un estéreo microscopio de bajo poder para determinar la homogeneidad y morfología del material. **Los explosivos comerciales de baja potencia** como el Pyrodex, la pólvora y la pólvora sin humo pueden ser fácilmente reconocidos. Las mezclas de explosivos caseros se pueden distinguir si poseen algún color o morfología en particular y distinguible, si está presente un solo componente se puede realizar el análisis directamente, de lo contrario tendrá que realizarse la separación correspondiente.

8.6.3. SEPARACIÓN DE MEZCLAS DE EXPLOSIVOS

La separación puede conseguirse mecánicamente o por extracción con solventes. Se prefiere la separación mecánica porque la extracción, particularmente con agua, puede cambiar la composición química de los componentes por reacciones de intercambio iónico. Las partículas cristalinas generalmente pueden ser recuperadas de la mezcla usando unas pinzas o un bisturí. La mezcla puede extenderse sobre una hoja de papel o en una caja de petri y la recuperación se lleva a cabo al mismo tiempo que se observa por el estéreo microscopio. Si la separación mecánica no es posible se pueden emplear extracciones con disolventes, el protocolo que se sigue para las extracciones es en el siguiente orden:

- Un disolvente no polar orgánico (ej. Éter o pentano)
- Un disolvente polar orgánico (ej. Acetona, metanol)
- Agua

Se analizan entonces la fase orgánica, acuosa y el material insoluble restante.

8.6.4. LAS TÉCNICAS ANALÍTICAS

Muchas técnicas analíticas pueden ser usadas para analizar los explosivos de baja potencia, a continuación se presentan las principales y el enfoque utilizado con respecto a este tipo de explosivos anterior a su explosión.

8.6.5. CROMATOFRAFÍA DE CAPA FINA (CCF)

La cromatografía en capa fina es ampliamente usada para el análisis de explosivos. Aunque existen métodos mucho más sofisticados como la cromatografía de gases y la cromatografía de líquidos de alta resolución que se realizan rutinariamente en los laboratorios. La **CCF** es mucho más utilizada. Tiene la ventaja de ser simple, rápida y relativamente más barata. Sin embargo la distancia que eluye el compuesto en unidades de **R_f** y la reacción de color usada no se consideran suficientes para una identificación final e independiente. Esto se debe a la posibilidad teórica de que varios compuestos compartan el mismo **R_f** y de que el color producido por el agente cromogénico utilizado también sea similar.

La CCF es un método aceptado de escaneo para explosivos orgánicos, especialmente en residuos post-explosión. Aunque la identificación de un explosivo no debe basarse solamente en esta técnica, en muchos laboratorios, especialmente en los pequeños o poco equipados sirve como un método principal de análisis.

8.6.6. LA ESPECTROSCOPIA DE INFRAROJO (IR)

Esta técnica es muy utilizada para identificar oxidantes inorgánicos sin reaccionar, combustibles orgánicos y compuestos base en mezclas de explosivos de baja potencia. Esta técnica está bien adaptada a esta aplicación ya que la mayoría de los oxidantes dan bandas fuertes de absorción en la región infraroja.¹⁴ Sin embargo algunos otros compuestos de este tipo de explosivos y sus residuos no pueden ser identificados por **IR**. Estos incluyen metales (como el aluminio y el magnesio), el carbono y halogenuros

alcalinos (sodio y cloruro de potasio) que no absorben significativamente radiación infrarroja.

Los halogenuros no son componentes típicos de los explosivos de baja potencia, pero son los principales productos de la reacción de oxidantes clorato y perclorato. Los residuos higroscópicos húmedos como los azúcares o compuestos inorgánicos como el nitrato de calcio son muy difíciles de analizar por IR.^{37 38,39} El agua puede ocultar el espectro de bandas de interés, y si están unidas como agua de hidratación, pueden cambiar las frecuencias de absorción en comparación con muestras secas. Por tal motivo es recomendable complementar la espectroscopia, con el análisis elemental de los componentes y residuos para asegurar que todos los componentes sean identificados.

Los métodos habituales para la preparación de la muestra para el análisis IR son el disco de KBr (bromuro de potasio) y la celda de diamante. Un disco KBr se prepara moliendo una pequeña cantidad del explosivo o residuo con bromuro de potasio presionando con una mano o prensa hidráulica para formar un disco claro.

El disco puede ser colocado en el haz de un instrumento dispersivo **FTIR**²⁸ (Espectroscopia de Infrarojo con Transformada de Fourier) y la transmisión del espectro registrada. El análisis usando celdas de diamante, requiere solo que la muestra sea colocada entre dos diamantes y se presione formando una capa delgada. Las celdas de diamante pueden utilizarse con muestras húmedas, pero el agua dificulta la interpretación, por tal motivo se recomienda que las muestras de explosivos de baja potencia siempre se sequen antes de un análisis IR.

Si la muestra es un compuesto como la nitrocelulosa, la adición de una o dos gotas de algún disolvente como el cloruro de metileno durante la molienda con KBr, facilita que se forme un disco homogéneo. Otro procedimiento posible para obtener una película delgada en disco de cloruro de sodio o de bromuro de potasio es evaporando disolventes tales como la acetona, el tetrahidrofurano o el acetato de etilo que son los más adecuados. Los compuestos amorfos como aceites y petrolatos pueden ser extraídos por un disolvente orgánico no polar como el pentano o éter etílico.

8.6.7. DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Es una de las más valiosas técnicas para la identificación de los componentes cristalinos de mezclas inorgánicas de explosivos de baja potencia. Es no-destructiva y puede llevar a la identificación definitiva, especialmente para los compuestos puros. La preparación de la muestra comienza con la trituración de la mezcla en un polvo fino. La muestra debe estar seca. Con cantidades traza la muestra es colocada en un tubo capilar, el cual se introduce en una cámara de Debye-Scherrer, muestras más grandes pueden ser colocadas sobre un portaobjetos esmerilado, o sobre un portaobjetos recubierto de grasa, expuestos posteriormente al haz de **rayos X**.^{14, 40}

La clave para la preparación de la muestra es la orientación aleatoria de los cristales al haz de rayos X, una orientación preferente puede causar dificultades en la identificación de patrones, pero es una situación común, y con experiencia puede resolverse.

Después de que se genera el patrón de rayos x, se compara con un estándar para tal caso, los algoritmos de búsqueda en un ordenador pueden ahorrar mucho tiempo.⁴⁰

8.7. ANÁLISIS POST-EXPLOSIÓN DE EXPLOSIVOS DE BAJA POTENCIA

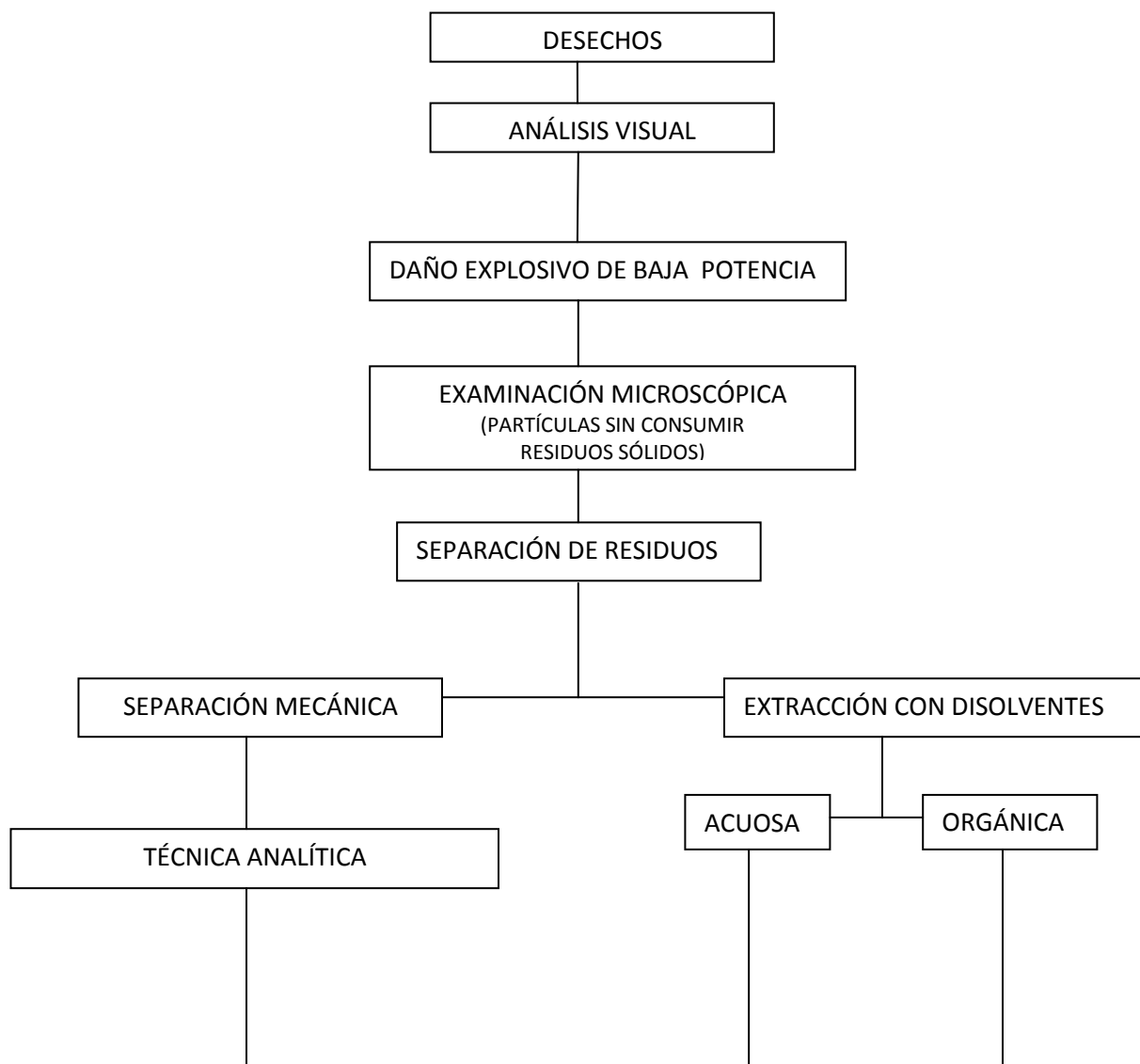
La identificación post-explosión de explosivos de baja potencia puede resultar difícil porque los residuos no solo pueden contener trazas de explosivos sin reaccionar, si no también productos de la combustión y material contaminante del ambiente. Si solo los productos de la combustión son aislados, puede determinarse la reacción que produjo su formación, algunos productos primarios de la reacción y sus posibles fuentes se muestran en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Productos de reacción para componentes de explosivos de baja potencia

| Productos de reacción | Posible componente original |
|--|---|
| Cloruro (Cl^-) | Clorato (ClO_3^-), Perclorato (ClO_4^-) |
| Clorato (ClO_3^-) | Perclorato (ClO_4^-) |
| Nitrito (NO_2^-) | Nitrato (NO_3^-) |
| Carbonato (CO_3^{2-}), Bicarbonato (HCO_3^-) | Sucrosa, Carbón, |
| Óxidos metálico | Metales ej. Al, Mg |
| Sulfato (SO_4^-) | Azufre |

La preservación del lugar de los hechos es muy importante para el análisis forense. El valor de los exámenes de laboratorio está directamente relacionado con lo significativos que sean materiales recuperados, los indicios enviados deben incluir todo el material dañado por el explosivo, o deposito de sustancias extrañas, los desechos que rodean la sede de la explosión y tratar de recuperar todos los componentes del dispositivo. Debido al intenso calor generado en las explosiones se encuentran muy pocos explosivos sin reaccionar en los fragmentos del dispositivo; sin embargo se pueden encontrar productos de la combustión si estos son estables a altas temperaturas.

Una vez que el residuo ha sido recuperado se sigue un procedimiento muy parecido al que se utiliza para el análisis pre-exposición ^{1,14,23} (**Esquema 2**). Los residuos post-exposición incluyen productos de la reacción y trazas de material sin reaccionar. Por lo tanto el material insoluble también debe ser analizado, por un análisis elemental, combinado con IR y **difracción de rayos X**, ya que los productos óxidos metálicos de muchos explosivos de baja potencia no son solubles en agua.



Esquema 2. Pasos generales recomendados a seguir para el análisis forense de explosivos post-exposición.

8.7.1. ANÁLISIS VISUAL Y MICROSCÓPICO

El primer paso, el examen de los escombros producidos por una explosión, es la observación visual, ya que a partir de los elementos adquiridos en la escena y apariencia del daño, se puede inferir si el daño fue hecho por un explosivo de alta o de baja potencia. Las partículas no consumidas de pólvora y pólvora sin humo, con frecuencia sobreviven a la explosión y se puede encontrar cerca de la zona del cráter. Estos restos tienen un alto valor probatorio. Por lo tanto el protocolo en la escena debe incluir barrer o aspirar el área general con instrumentos libres de contaminación para recuperar la evidencia. Los fragmentos de los contenedores rara vez contienen partículas sin reaccionar esto a causa de las llamas y el calor productos de la explosión. Sin embargo dichos contenedores son aptos para buscar productos sólidos de la reacción.

Los restos suelen ser analizados con un estéreo microscopio para encontrar partículas sin reaccionar y estos deben removerse con pinzas o un bisturí, sin adición de disolventes. La apariencia de las partículas comerciales puede ser alterada por el calor de la explosión. Las partículas de la pólvora normalmente tienen bordes redondeados y las pólvoras sin humo generalmente pierden su cubierta de grafito y aparece un color verde o amarillo. Las partículas también pueden fundirse o reducir su tamaño hasta que su forma original se pierde.

8.7.2. EXTRACCIÓN CON DISOLVENTES

Después de una explosión, es posible observar material sin reaccionar mezclado con productos de combustión, mismo que puede separarse mecánicamente y el resto de material utilizando la extracción con disolventes. El agua es uno de los disolventes más útiles, porque la mayoría de los productos de combustión son sólidos iónicos.

Se recomienda realizar un análisis sistemático para la separación de los componentes en forma secuencial, extrayendo residuos orgánicos y acuosos. El proceso a seguir es el mismo que se utiliza para la separación de mezclas explosivas.

Por otra parte, una recomendación particular es el uso de agua fría durante la extracción de compuestos, ya que los compuestos de interés son más solubles en frío, el agua caliente disuelve fácilmente muchos contaminantes comunes, tales como sulfato de calcio y carbonato de calcio. Los extractos acuosos pueden ser analizados directamente por cromatografía iónica o electroforesis capilar. Alternativamente, además, se puede realizar la evaporación del agua y analizar los residuos resultantes por IR o rayos X.⁴⁰

Actualmente se están desarrollando métodos estándar para la extracción, que permiten obtener mayor gama de compuestos a menor tiempo.^{41,42}

8.8. PROCEDIMIENTOS PARTICULARES PARA EL ANÁLISIS POST- EXPLOSIÓN DE EXPLOSIVOS DE BAJA POTENCIA.

8.8.1. PÓLVORA

La pólvora es uno de los más grandes descubrimientos de todos los tiempos y la formulación actual de nitrato de potasio, azufre y carbón de leña, en proporciones de 75:10:15 respectivamente, data del siglo dieciséis.^{13, 26} El índice de combustión es controlado por el tamaño de partícula, la configuración y la composición. Comercialmente la pólvora ha sido sustituida por un propulsor a base de nitrocelulosa llamada, “pólvora sin humo”, y también ha sido reemplazada como agente de excavación y voladura, por explosivos de alta potencia tales como el **ANFO** (nitrato de amonio más aceite combustible). El uso actual se ha reducido a fuegos artificiales, fusibles, “**voladuras**” especiales (mármol, granito), cargas de ignición para calibres grandes y armas de carga primitivas. Aunque sus usos legítimos han disminuido, la pólvora es utilizada en gran número de artefactos explosivos improvisados.

En E.U.A de 1989 a 1993, la pólvora constituyó el 15% de todos los artefactos destructivos, y esto está directamente relacionado con la relativa facilidad con la que se puede conseguir y fabricar, aunque su manufactura es extremadamente peligrosa, ya que la pólvora es muy sensible al calor, flama y fricción.

8.8.1.1. APARIENCIA FÍSICA DE LA POLVORA

La pólvora está compuesta por gránulos cristalinos, negros, de forma irregular. La mezcla del nitrato de potasio, carbón y azufre, es tan completa que los componentes individuales no son visibles a través de un estéreo microscopio. Existe una nomenclatura que describe a la pólvora según su uso y tamaño de partícula:

- a) Se utilizan las letras **FBB** para referirse a la pólvora utilizada con fines destructivos (voladuras, minería) y el tamaño de partícula va de **1FBB** a **4FBB**.

- b) Para referirse a fuegos artificiales se utilizan las letras **FA** y el tamaño de partícula va desde **1FA** hasta **7FA**, además seguido de otros tamaños específicos como el **granular D**, granular fino y granular extrafino.
- c) Se usan las letras **Fg** para referirse a la “pólvora deportiva” y el tamaño de partícula va desde Fg hasta 4Fg (**Figura 16**).

En cada caso el número superior de F, indica un menor tamaño de partícula y por lo tanto un aumento en la rapidez con la que la pólvora se quema.

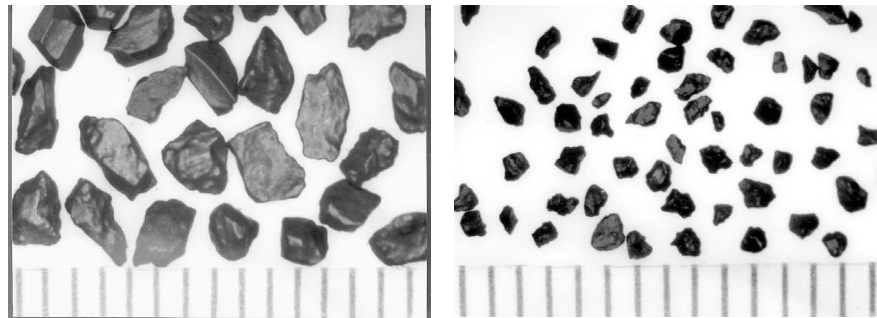


Figura 16. Gránulos de pólvora deportiva clase Fg (izquierda) y 3Fg (derecha).

Los polvos deportivos son los encontrados con mayor frecuencia en la fabricación de **IED's**, debido a su disponibilidad en el mercado. El tamaño granular de la pólvora sin quemar es mejor evaluado mediante la comparación con una muestra auténtica, cuyo tamaño ha sido caracterizado perfectamente.

8.8.1.2. IDENTIFICACIÓN ANALÍTICA DE LA PÓLVORA

Para identificar a la pólvora es necesario identificar sus tres componentes, nitrato de potasio (ocasionalmente nitrato de sodio), azufre y carbón, y se pueden adoptar varios enfoques.

- a) Una pequeña cantidad puede ser retirada del terreno y ser analizada por difracción de rayos X o IR.^{37, 38, 39} El espectro infrarrojo solo muestra que las bandas de absorción son de nitrato de potasio. ($1769, 1383$ y 825 cm^{-1}). La microscopia electrónica de barrido identifica potasio y azufre, el patrón de difracción de rayos X, por su parte, identifica nitrato de potasio y azufre.
- b) El azufre puede ser identificado en una campana de extracción, al extraerlo con éter o disulfuro de carbono (ambos disolventes son muy volátiles e inflamables), obteniendo un sólido amarillo pálido, para su posterior análisis.
- c) La pólvora arde de una forma en particular por lo que si hay suficiente muestra se pueden encender algunas partículas (ensayo de susceptibilidad de ignición).
- d) El azufre puede ser identificado indirectamente de esta manera, ya que un importante producto obtenido de la combustión de la pólvora es el sulfato de potasio, el cual es fácilmente identificado por IR (absorción en 1117 y 620 cm^{-1}), del mismo modo los carbonatos, puede estar presentes en concentraciones suficientes para ser reconocidas, presentando bandas de absorción en 1398 y 880 cm^{-1} (**Figura 17**).
- e) La cromatografía iónica y la electroforesis capilar del extracto acuoso, de pólvora sin reaccionar, muestra la presencia de iones nitrato y potasio.
- f) Un análisis cuantitativo puede conseguirse por una extracción secuencial de una muestra pesada con exactitud, con disulfuro de carbono, para remover el azufre, seguido por extracción acuosa para remover el nitrato de potasio. El residuo es carbón.

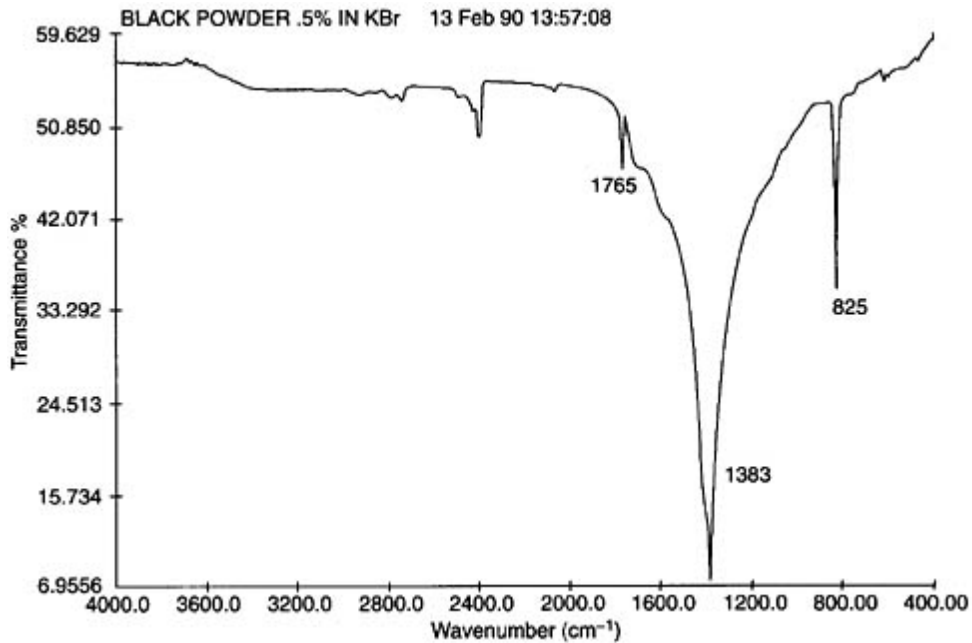


Figura 17. Espectro de infrarojo para la pólvora (nitrato de potasio)

- g)** La difracción de rayos X, permite la identificación de sulfato de potasio y ocasionalmente de carbonato de potasio y sulfato de potasio si es que se encuentran en concentración suficiente (Aproximadamente el 10%). La identificación de los compuestos dependerá de la exposición ambiental de los residuos, por ejemplo el sulfuro de potasio, es rápidamente convertido a sulfato por exposición al aire. El nitrato de potasio y su producto de combustión el nitrito de potasio también son identificables por difracción de rayos X.⁴⁰

La pólvora “hecha en casa” es normalmente fácil de distinguir de los productos comerciales usando solo un estéreo microscopio, ya que sus componentes individuales son distinguibles nitrato blanco/trasparente, azufre amarillo y carbón negro. También las mezclas caseras no se incendian tan rápido como los productos comerciales y algunas veces su ignición se dificulta.^{14, 40}

8.8.1.3. EL ANÁLISIS POST- EXPLOSIÓN

Por lo general quedan residuos considerables cuando la pólvora comercial se quema, el 43% del material se pierde en forma de gases, 56% permanecen como sólidos en peso y el otro 1% en agua.

En ausencia de contaminantes sólidos procedentes del medio ambiente o producidos durante la explosión (por ejemplo óxido de zinc proveniente de tubos galvanizados), residuos de pólvora pueden ser recuperados mecánicamente. En caso contrario, con agua se pueden extraer sales de potasio producto de la reacción.

Los residuos recuperados se analizan comúnmente mediante un protocolo, que puede incluir varias técnicas: pruebas in situ, IR, Microscopia electrónica de barrido, difracción de rayos X, cromatografía iónica y electroforesis capilar.

La composición de los residuos puede ser variable, para ilustrar esto, una muestra comercial de pólvora y una muestra casera se quemaron al aire (esta última se obtuvo realizando una mezcla tradicional de nitrato de potasio, azufre y carbono, en proporciones de 75:15:10, humectando y moliéndola en mortero con un pistilo. Los residuos fueron analizados por varias técnicas, muestran los resultados de **IR** y **Cromatografía iónica**⁴³ (**Figura 18** a **Figura 23**).

Los resultados muestran que el residuo principal de la muestra comercial fue el sulfato de potasio y carbonato, mientras que la muestra casera produjo un alto rendimiento de nitrito de potasio, nitrato y sulfato sin reaccionar. Esto sugiere que diferentes mecanismos de reacción pueden estar involucrados cuando cada tipo de pólvora se incendia.

8.8.1.4. EL ENSAYO IN SITU

Los residuos pueden rápidamente ser seleccionados, para buscar carbonatos, sulfatos, sulfitos, nitratos y nitritos para ensayos in situ. La adición de una solución acuosa de cloruro de bario, a un extracto acuoso de los residuos, produce un precipitado blanco

de sulfato de bario y carbonato. Si se agrega ácido clorhídrico o ácido nítrico diluidos, el carbonato se disuelve liberando dióxido de carbono el cual efervesce. El sulfato de bario no es afectado.

La adición de una solución de nitrato de plata al extracto, forma un precipitado negro de sulfato de plata. También se forma un precipitado blanco de carbonato pero este enmascarado por el sulfuro. El nitrito puede ser identificado por el reactivo modificado de Griess^{14,29,43} cuando se adiciona al residuo la solución se torna rosa si los nitritos están presentes; si no hay cambio de color, se puede agregar una aleación de zinc, la solución se tornará roja.

8.8.1.5. ESPECTROSCOPIA DE INFRAROJO

El mayor producto en la espectroscopia IR de residuos de pólvora es el sulfato de potasio; sin embargo es frecuente encontrar otros productos. La **Figura 18** ilustra las bandas características para el sulfato de potasio (1117 y 619 cm^{-1}) y carbonato de potasio (1398 y 880 cm^{-1}) de pólvora comercial incendiada.

La **Figura 19** muestra el espectro de IR de residuos de pólvora casera en donde la absorción primaria aparte de los sulfatos, nitrato sin reaccionar (1386 y 825 cm^{-1}) y su producto de reacción nitrito de potasio (1271 cm^{-1}).

En la práctica el análisis de un residuo desconocido, por IR, debe ser combinado con un análisis elemental, difracción de rayos x, o técnicas como cromatografía iónica para determinar si están presentes halogenuros alcalinos (por ejemplo NaCl y KCl). Una concentración significativa de cualquiera de estos últimos componentes puede indicar que el residuo probablemente no se originó de pólvora.

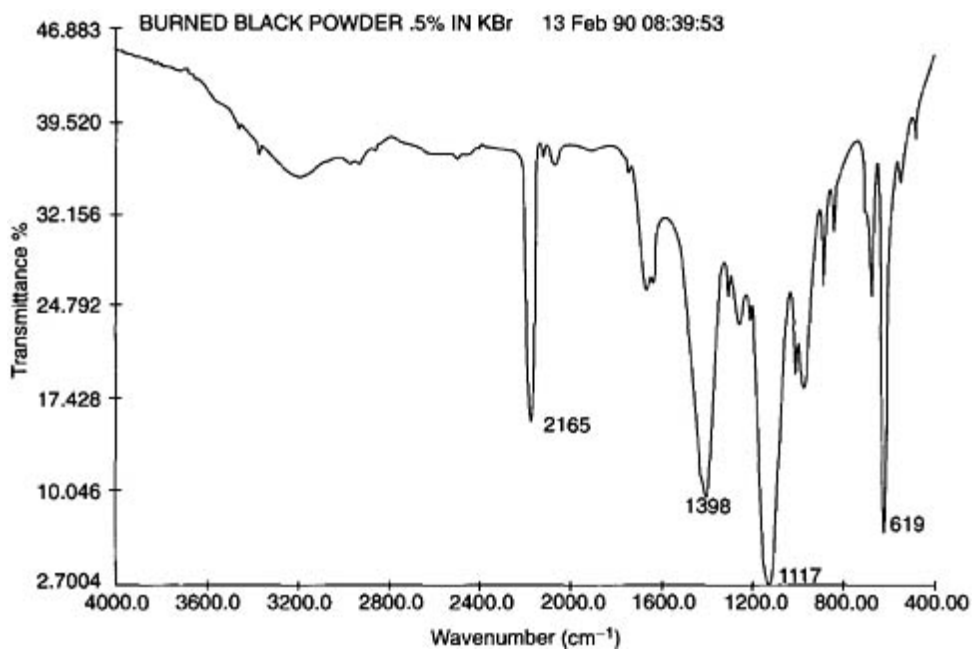


Figura 18. Espectro IR de residuos de pólvora comercial quemada.

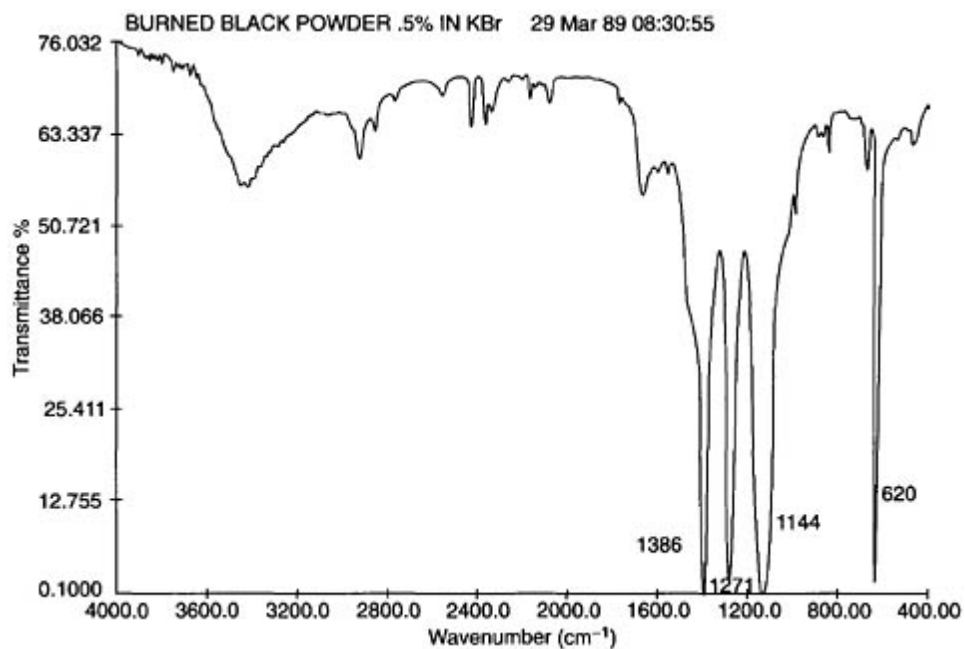


Figura 19. Espectro IR de residuos de pólvora casera quemada.

8.8.1.6. CROMATOGRAFÍA IÓNICA (CI)

La CI es mas sensitiva que el IR o rayos X.⁴⁴ La **Figura 20** muestra el cromatograma iónico de pólvora comercial incendiada. El cromatograma aniónico contiene la mayor cantidad esperada de sulfato, sulfito, nitrato, nitrito, sulfato, cianato y tiocianato. La pequeña cantidad de cloro indicado es contaminación ambiental. Si la muestra proviene de una bomba bien sellada, la concentración del ión tiocianato debe ser menor. Los sistemas suprimidos no identifican carbonato o bicarbonato, porque estos iones son parte del sistema eluyente. La formación de productos también depende de la presión de reacción. Si la pólvora no está bien confinada, el tiocianato se puede observar.^{14,44} Esto es fácilmente visualizado por la cromatografía iónica. La **Figura 21** muestra el cromatograma suprimido para la pólvora casera. Los sistemas no suprimidos permiten la identificación de carbonato. El cromatograma para pólvora incendiada comercial y no comercial se muestra en la **Figura 22** y **Figura 23**.

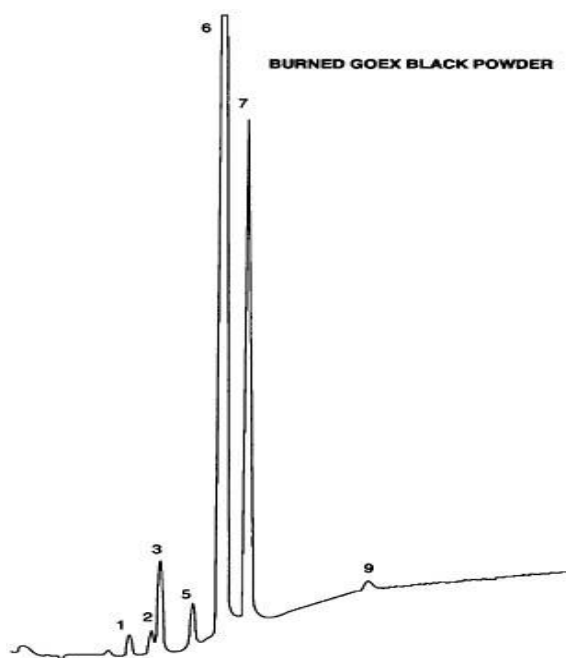


Figura 20. Cromatografía iónica de residuos de pólvora en un sistema suprimido. Los iones son: (1) cloruro; (2) nitrito; (3) cianato; (5) nitrato; (6) sulfato; (7) sulfito; (9) tiocianato.

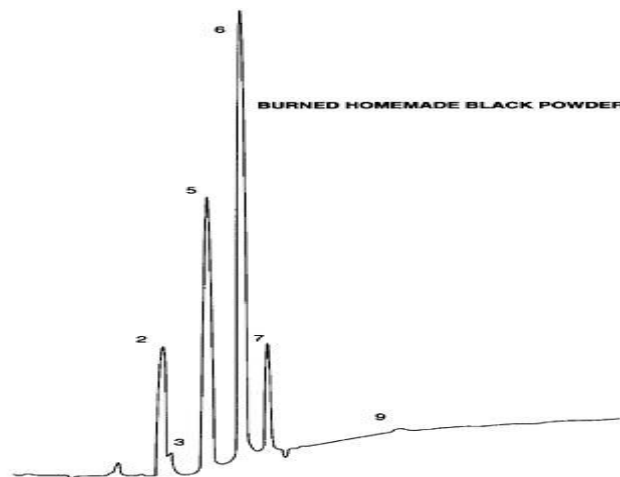


Figura 21. Cromatografía iónica de residuos de pólvora casera en un sistema suprimido. Los lones son: (2) nitrito; (3) cianato; (5) nitrato; (6) sulfato; (7) sulfato; (9) tiocianato.

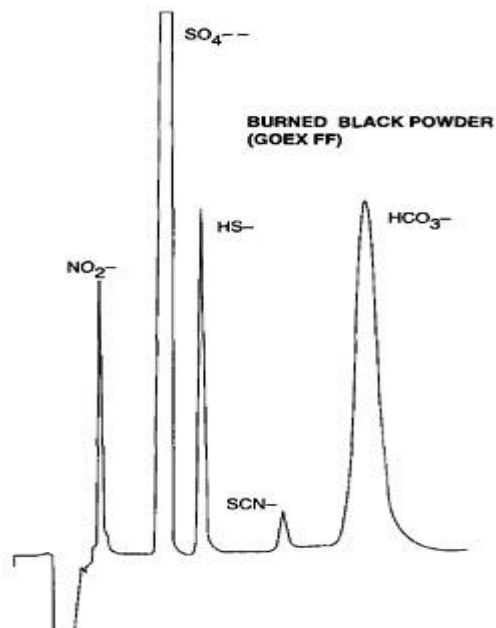


Figura 22. Cromatografía iónica de residuos de pólvora comercial casera para un sistema no suprimido.

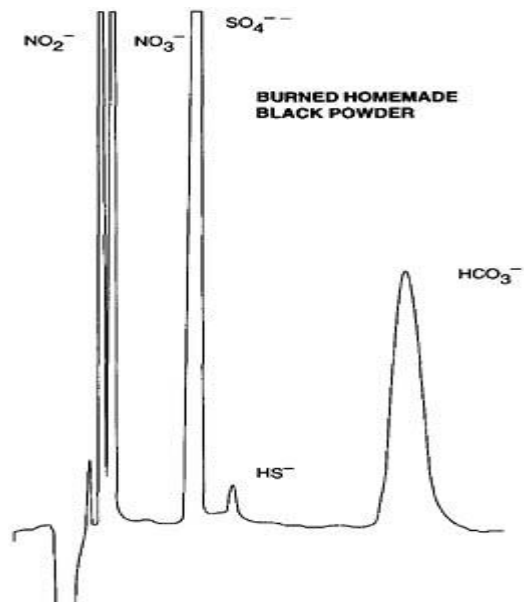


Figura 23. Cromatografía iónica de residuos de pólvora casera un sistema no suprimido.

8.8.2. PYRODEX

El sustituto más ampliamente usado de la pólvora es el **Pyrodex** el cual fue inventado por D.E. Pawlak, y M. Levenson en 1978, y consiste en una mezcla de nitrato de potasio, azufre, carbón, perclorato de potasio dicianidamida (**DCDA**) y benzoato de sodio.

8.8.2.1. APARIENCIA FÍSICA DEL PYRODEX

Es un polvo gris y los gránulos aparecen microscópicamente como agregados no homogéneos de material cristalino.

8.8.2.2. IDENTIFICACIÓN ANALÍTICA DEL PYRODEX

El Pyrodex puede ser fácilmente identificado por IR y difracción de rayos X. El espectro de absorción muestra las bandas, para todos los componentes excepto azufre y carbón: nitrato de potasio (1766, 1384 y 825 cm^{-1}); el perclorato de potasio (1086 y 626 cm^{-1}), DCDA (3338, 3189, 2207 y 2163 cm^{-1}), benzoato de sodio (1597, 1553 y 709 cm^{-1}). La difracción de rayos x consigue una identificación positiva para todos los componentes excepto el carbón.

La microscopía electrónica de barrido identifica Na, K y Cl, y si está equipado con un detector elemental de baja, también puede identificar C, N y O. También se puede usar **CLAR** (Cromatografía líquida de alta resolución) para indicar la presencia de DCDA y benzoato de sodio, este método es particularmente efectivo para residuos post-explosión.⁴⁵

8.8.2.3. ANÁLISIS POST- EXPLOSIÓN

El Pyrodex causa un daño similar al de la pólvora y también produce una gran cantidad de material residual, los productos más abundantes son carbonato de potasio, sulfato de potasio y cloruro de potasio. Sin embargo, la presencia de estos compuestos no siempre significa que el Pyrodex esté presente, se sabe que debido a la combustión de pólvora en tubos de cloruro de polivinilo (**PVC**) se produce cloruro de potasio como un producto de la reacción con el tubo. En tales casos es necesario un nuevo análisis por CLAR para residuos de DCDA y benzoato de sodio es necesario para establecer la fuente de los residuos como Pyrodex.

Al igual que para la identificación de residuos de pólvora para el Pyrodex se pueden seguir varias opciones.

1. Ensayo in situ. A diferencia de la pólvora, los residuos de Pyrodex contienen cloro, por otro lado, los residuos primarios son los mismos. El ensayo de nitrato de plata para cloruros puede ser opacado por un precipitado de sulfato de plata. Para minimizar este efecto, se adiciona ácido cítrico a la solución problema y se calienta para convertir el sulfuro insoluble a sulfato soluble. Cuando el nitrato de plata se agrega a la solución tratada de esta forma, un precipitado blanco de cloruro de plata aparece. La oportunidad de encontrar cualquier perclorato sin reaccionar por análisis in situ es extremadamente remoto.⁴⁶
2. Análisis IR. Debido a que el cloruro de potasio es “transparente” a la radiación infraroja a longitudes de onda comúnmente utilizadas, el espectro IR de los residuos del Pyrodex, puede ser indistinguible del producido por la pólvora común. Sin embargo la combinación de IR con análisis elementales o cromatografía iónica (y/o electroforesis capilar) asegura, mediante la identificación de una gran concentración de cloruro, que el residuo no se está confundiendo con pólvora. La **Figura 24** y **Figura 25**, ilustran el espectro de IR para una muestra sin incendiar y otra incendiada de Pyrodex respectivamente. Los componentes primarios son sulfato (1119 y 620 cm^{-1}), carbonato de potasio (1401 cm^{-1}) y cianato de potasio (2230 cm^{-1}).

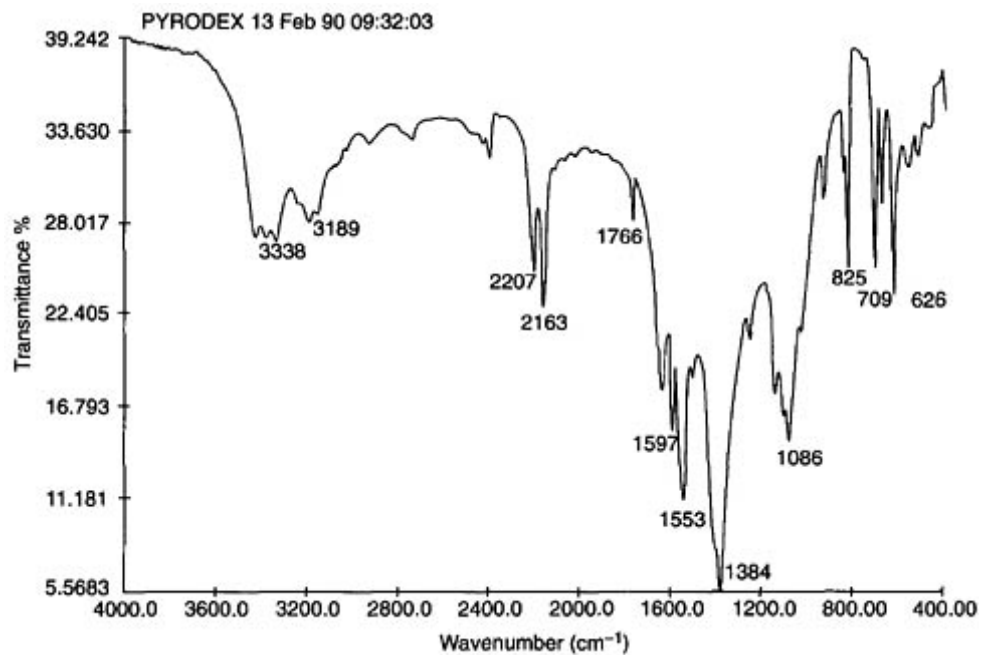


Figura 24. Espectro IR para PyroDEX.

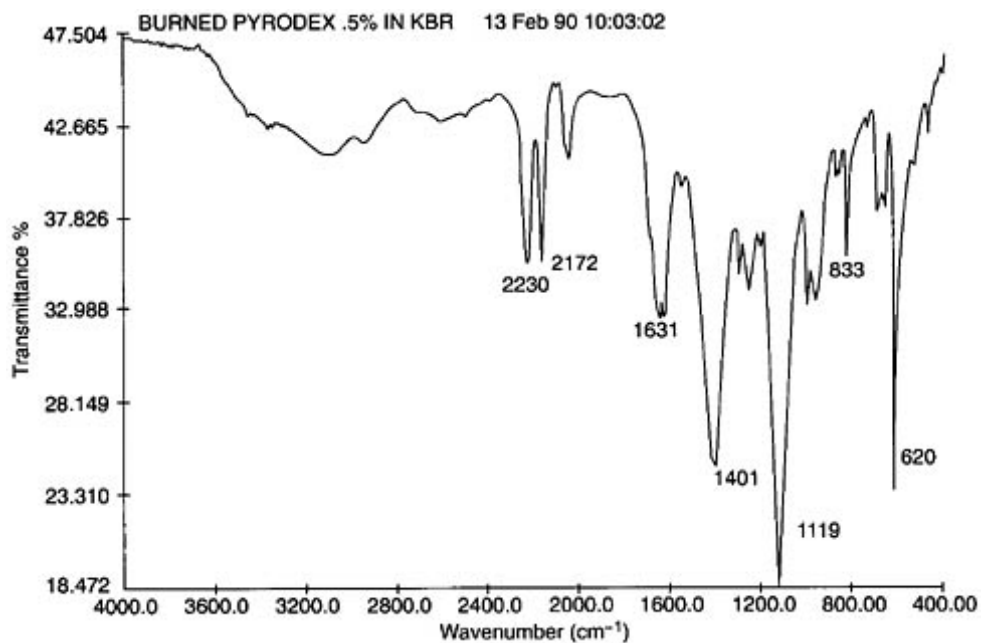


Figura 25. Espectro IR para PyroDEX post- explosión.

3. Difracción de rayos x. Con esta técnica generalmente se identifican cloruro de potasio y sulfato, como los componentes primarios del residuo. Otros componentes están presentes en concentraciones menores al 10% y no pueden ser detectados.
4. Cromatografía iónica. La cromatografía iónica es una técnica muy usada para confirmar la presencia de Pyrodex.⁴⁶

Aunque muchos iones presentes también son encontrados en pólvora, la presencia adicional de cloruros y especialmente perclorato sugiere productos de combustión provenientes del Pyrodex (**Figura 26** y **Figura 27**).

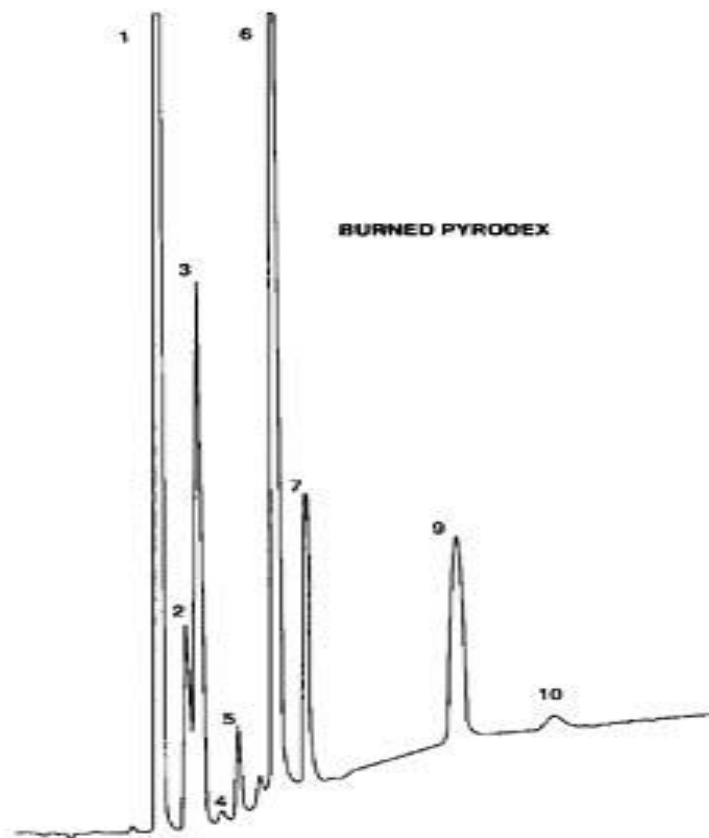


Figura 26. Cromatografía iónica. Cromatograma de Pyrodex, post explosión usando un sistema suprimido. Los picos identificados son: (1) cloruro, (2) nitrito, (3) Cianato, (4) clorato, (5) Nitrato, (6) sulfato, (7) sulfuro, (9) tiocianato y (10) perclorato.

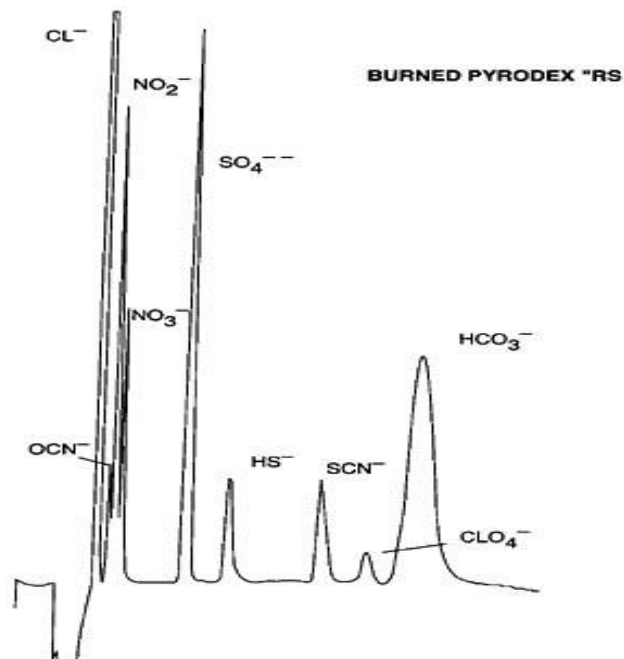


Figura 27. Cromatografía iónica. Cromatograma de PyroDEX, post explosión usando un sistema no suprimido.

8.8.3. POLVO DORADO (GOLDEN POWDER)

La pólvora dorada o “polvo dorado” es un sustituto de la pólvora común, derivado del nitrato de potasio y ácido ascórbico. En la actualidad no existe comercialmente. Este material fue producido como granos homogéneos en varios tonos marrón y con un característico olor a vitamina.

Dado que la mezcla puede ser producida de forma casera, se presenta a continuación una breve descripción de las técnicas utilizadas para su análisis.

Este explosivo es rápidamente identificado por IR o difracción de rayos X. El espectro de IR de este material es dominado por las bandas de absorción del nitrato de potasio a (1384 y 825 cm^{-1}). Las bandas de absorción del ácido ascórbico en (3527,3415, 3318, 1765, 1676, 1140, 1026 y 757 cm^{-1}) confirman la identificación (**Figura 28**).

La difracción de rayos X también identifica estos dos compuestos.

8.8.3.1. ANÁLISIS POST-EXPLOSIÓN

Una bomba hecha con pólvora dorada como carga, exhibe el mismo daño causado por una bomba cargada con pólvora negra común.

Los residuos se componen principalmente de carbonato de potasio y nitrato de potasio según el patrón de difracción de rayos x post-explosión.

El espectro de IR identifica, carbonato de potasio, nitritos y nitratos. La ausencia de azufre, por ejemplo iones SO_4^{2-} , SCN^- , HS^- , distingue la pólvora dorada de los residuos de pólvora negra y Pyrodex. Sin embargo residuos similares pueden ser producidos por nitrato de potasio y azúcar (**Figura 28**).

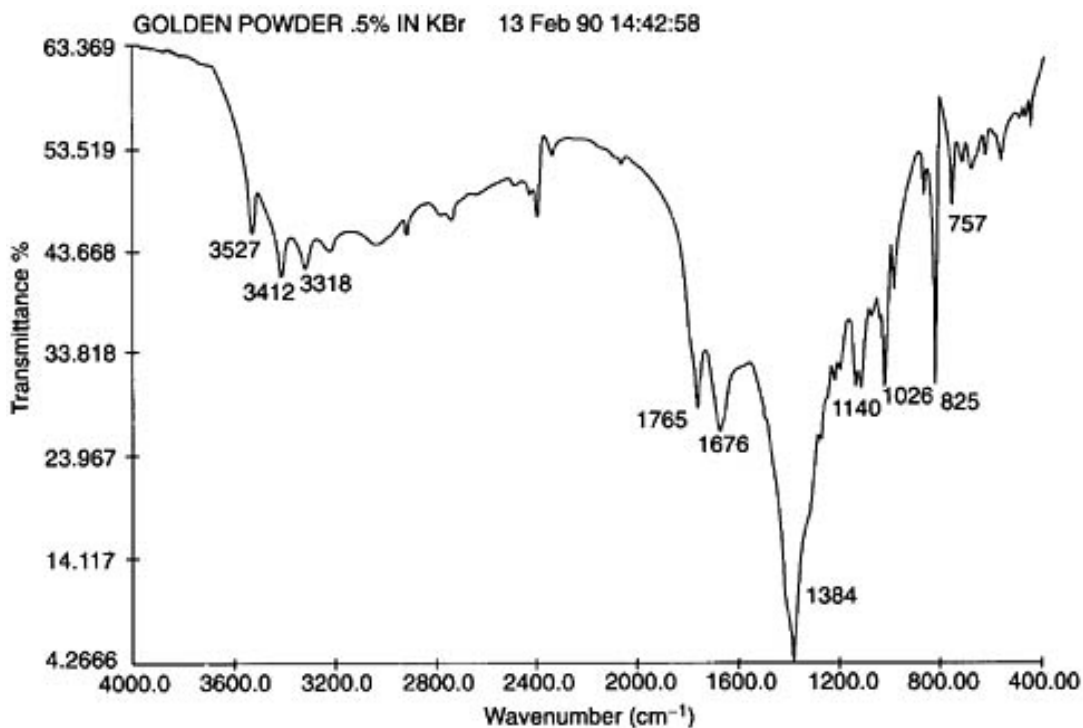


Figura 28. Espectro de IR para el Polvo Dorado (Golden Powder).

8.8.4. POLVORA SIN HUMO

En el siglo XX, la “pólvora sin humo” reemplazó en gran medida a la pólvora negra en las armas de mano, rifles y en armas de calibre grande. La pólvora sin humo no es realmente sin humo, se le dio esta denominación común, porque el humo producido cuando se usa en municiones es mucho más claro que el producido por la pólvora negra.

Este tipo de pólvora probablemente tiene el mayor potencial evidenciario de todos los materiales explosivos encontrados por el químico forense, debido a la variedad de componentes que se pueden analizar. La identificación de la marca del producto puede generar pistas en la investigación, si se puede rastrear el origen del material. Se pueden generar pruebas asociativas potentes mediante la comparación de un polvo procedente de un dispositivo y otro que este en posesión por el sospechoso.^{14, 46, 47.}

Todas las pólvoras sin humo contienen nitrocelulosa, y se dividen en tres clases de acuerdo a la composición química de los ingredientes energéticos primarios:

1. Pólvora sin humo de una sola base, que contiene nitrocelulosa como material energético primario.
2. Pólvora sin humo de doble base, que contiene nitrocelulosa y nitroglicerina como materiales energéticos primarios.
3. Pólvora sin humo de triple base, que contiene nitrocelulosa, nitroglicerina y nitroguanidina como materiales energéticos primarios.

Cuando se relacionan los IED's con este tipo de pólvora, se puede hablar de artefactos que utilizan “pólvora sin humo deportiva a granel”, artefactos con pólvora sin humo de una sola base y artefactos con pólvora sin humo de doble base. La pólvora deportiva a granel se incendia rápidamente para ser usada en rifles, pero no tiene aplicaciones en pistolas ni como relleno en granadas de mano. Esta pólvora está compuesta por gránulos irregulares de fibras congeladas, las cuales se tiñen. Los colores comunes

incluyen rosa y verde. Posee aproximadamente de un 84 a un 89% de nitrocelulosa y puede además contener materiales como la parafina, difenilamina y recubrimientos inorgánicos como bario y/o nitrato de potasio. Los aditivos orgánicos como la difenilamina y los hidrocarburos, pueden ser removidos extrayéndolos con un disolvente como el cloruro de metileno o cloroformo. Los extractos pueden ser analizados por cromatografía de gases, gases/masas o IR. La muestra entonces se puede extraer con acetona, acetato de etilo o **THF** (tetrahidrofurano), para disolver la nitrocelulosa, la cual puede ser analizada por IR o CCF. Las sales inorgánicas residuales aparecerán como una corteza de color blanco insoluble, la cual puede ser filtrada o bien recogida con un bisturí. Estas sales pueden ser analizadas por microscopía electrónica de barrido combinada con IR o por difracción de rayos X.

Las pólvoras comerciales para rifle, pistola y para propulsores, están ampliamente disponibles en la forma deportiva, para uso en cargas manuales. Debido a la disponibilidad de estas pólvoras, es común encontrarlas en artefactos explosivos improvisados. Como se mencionó anteriormente las pólvoras de una sola base contienen nitrocelulosa como único material energético, por su parte las de doble base contienen nitrocelulosa y nitroglicerina. En ambos casos las pólvoras contienen aditivos, cuya identificación puede ayudar a individualizar a cada polvo.⁴⁷

8.8.4.1. LOS ADITIVOS DE LA POLVORA SIN HUMO

En la pólvora sin humo se utilizan varios aditivos con el fin de dar estabilidad, facilitar el manejo y mejorar el desempeño. A continuación se describen los más importantes:

Estabilizadores: Previenen la descomposición de la nitrocelulosa removiendo los ácidos nítrico y nitroso producidos, que actúan como catalizadores de reacciones de degradación. Los más utilizados son difenilamina, N,N-dimetil difenilurea y N,N-dietil difenilurea.

Agentes gelificantes/plastificantes: reducen la cantidad de disolventes volátiles necesarios para el coloide de nitrocelulosa, o en el caso de algunos propulsores de

doble base se consigue la manufactura con la completa ausencia de componentes volátiles. Estos incluyen nitroglicerina, plastificantes de ftalato, dinitrotolueno y N,N-dietildifenilurea.

Recubrimientos superficiales: modifican el grado de incendio, (**vinsol, 2,4-DNT**), afectan el flujo y propiedades eléctricas (carbón negro, grafito) o como supresores del destello (zinc, sulfato de potasio).⁴⁸

8.8.4.2. APARIENCIA FISICA DE LA PÓLVORA SIN HUMO

La apariencia de estos tipos de pólvora en particular, juega un papel importante ya que la morfología, nos puede indicar si es de una sola base o de base doble. Muchos polvos cilíndricos y en forma de tubo, son de una sola base por otro lado la mayoría de los polvos con forma de disco son de doble base (**Figura 29**). Para hacer el análisis, primero se describe la forma (disco, tubo, cilindro, circular etc.) posteriormente se hacen mediciones importantes como, grosor, diámetro y altura. Algunas pólvoras también se pueden identificar por granos coloridos que se encuentran dispersos en el material y que son representativos de la marca que fabrica el producto. Cuando toda esta información se obtiene, es posible comparar con una colección de referencia de muestras auténticas.^{14, 47, 48, 49}

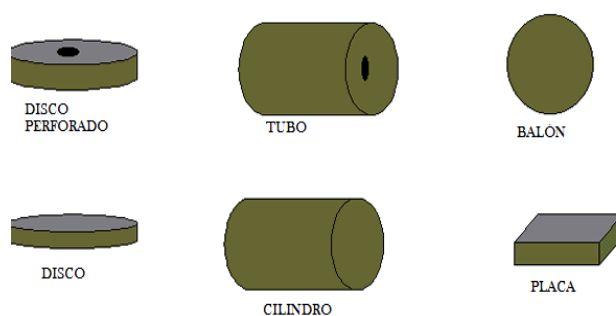


Figura 29. Morfologías comunes de pólvora sin humo.

8.8.4.3. ANÁLISIS POST- EXPLOSIÓN

El análisis de la pólvora sin humo persigue uno o más de los siguientes objetivos:

- Definir el material como una sustancia explosiva.
- Determinar la forma de manufactura.
- Comparación de un polvo con otro.

La identificación de la pólvora sin humo como una sustancia explosiva involucra la identificación de nitrocelulosa y nitroglicerina⁵⁰ (si es de **base doble**). Los otros objetivos requieren la identificación de los aditivos. A continuación se describen algunos métodos efectivos para este propósito.

8.8.4.3.1. ANÁLISIS DE LA NITROCELULOSA

Todas las pólvoras sin humo poseen nitrocelulosa. El mejor método para identificar este compuesto es producir un espectro de IR de una película (aunque actualmente se han desarrollado técnicas como la electroforesis capilar^{51,52}) comprimida en una celda de diamante o emitido a partir de acetona, tetrahidrofurano, metanol o acetato de etilo en disco de NaCl o KBr. Para obtener un espectro puro la película debe ser extraída con cloruro de metileno o cloroformo para eliminar los aditivos antes del análisis (**Figura 30**). La técnica es no destructiva y la muestra puede ser recuperada para un análisis posterior. La cromatografía en capa fina se puede usar como una técnica complementaria. En muchos sistemas los disolventes usados comúnmente son la nitrocelulosa que tiene un Rf de cero, pero *Douse* reportó que cuando se utiliza un sistema eluyente acetona/metanol en proporciones 3:2 en una placa de sílica gel, la nitrocelulosa tiene un Rf de 0.64. La interpretación de la identificación de nitrocelulosa por extracción con disolventes a partir de desechos, ropas y piel, debe hacerse con cautela, ya que este compuesto se puede encontrar en pintura, esmalte de uñas y barníz. El mismo cuidado aplica a la difenilamina, que es un aditivo común que se encuentra ampliamente en el ambiente.^{14, 48, 53}

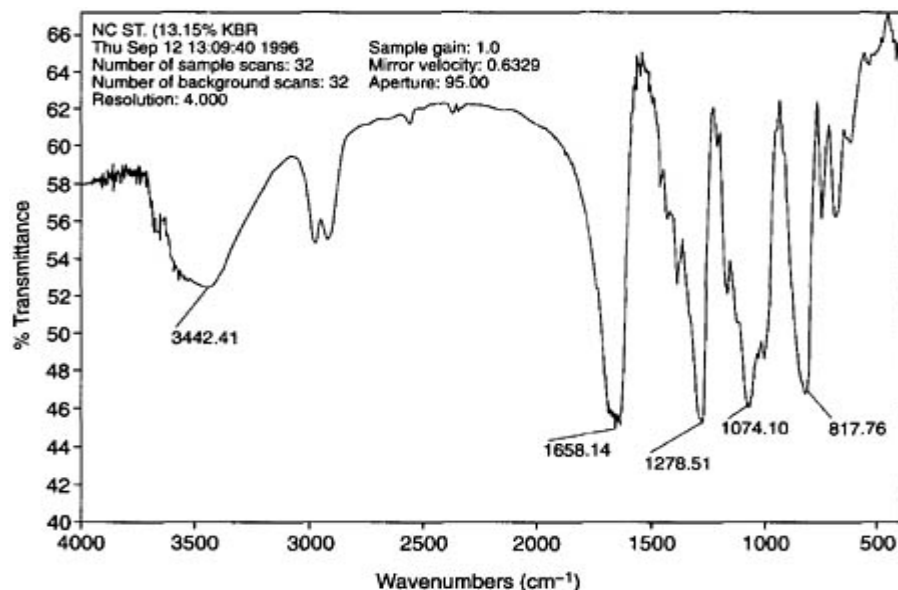


Figura 30. Espectro IR de la nitrocelulosa, condiciones experimentales; Kbr, 32 escaneos, resolución 4cm⁻¹.

8.8.4.3.2. EL ANÁLISIS DE LA NITROGLICERINA

Si se remueve pólvora sin humo sin reaccionar de un artefacto sin explotar y es sólo necesario determinar si es un material explosivo, el análisis se puede realizar analizando la muestra por IR para identificar el éster de nitrato contenido, para después analizar por cromatografía de capa fina, mediante la obtención de un extracto con acetona, para determinar si es una pólvora de doble base o de una sola.

Como sistema de elución se emplea tolueno: hexano (1:1), sobre placas de sílica activadas por calentamiento. En estas condiciones la nitrocelulosa tiene un Rf de cero y la nitroglicerina un Rf de 0,3 aproximadamente. La nitroglicerina también puede ser detectada por muchas técnicas instrumentales incluyendo CG/MS (Cromatografía de gases acoplada a espectroscopia de masas), y la Cromatografía Líquida de Alta Resolución (CLAR), entre otras, pero la combinación de IR y CCF es muy adecuada.

La CLAR tiene un gran potencial para su análisis debido a la capacidad que tiene para separar los diferentes componentes.^{54,55,56,57,58}

En la **Figura 31** es posible observar los patrones de separación obtenidos mediante CLAR/UV, donde se observan los diferentes compuestos contenidos en la pólvora sin humo, incluida la nitroglicerina.^{14,57,59,60,61} Las condiciones empleadas durante el análisis fueron se describen en la **Tabla 4**.

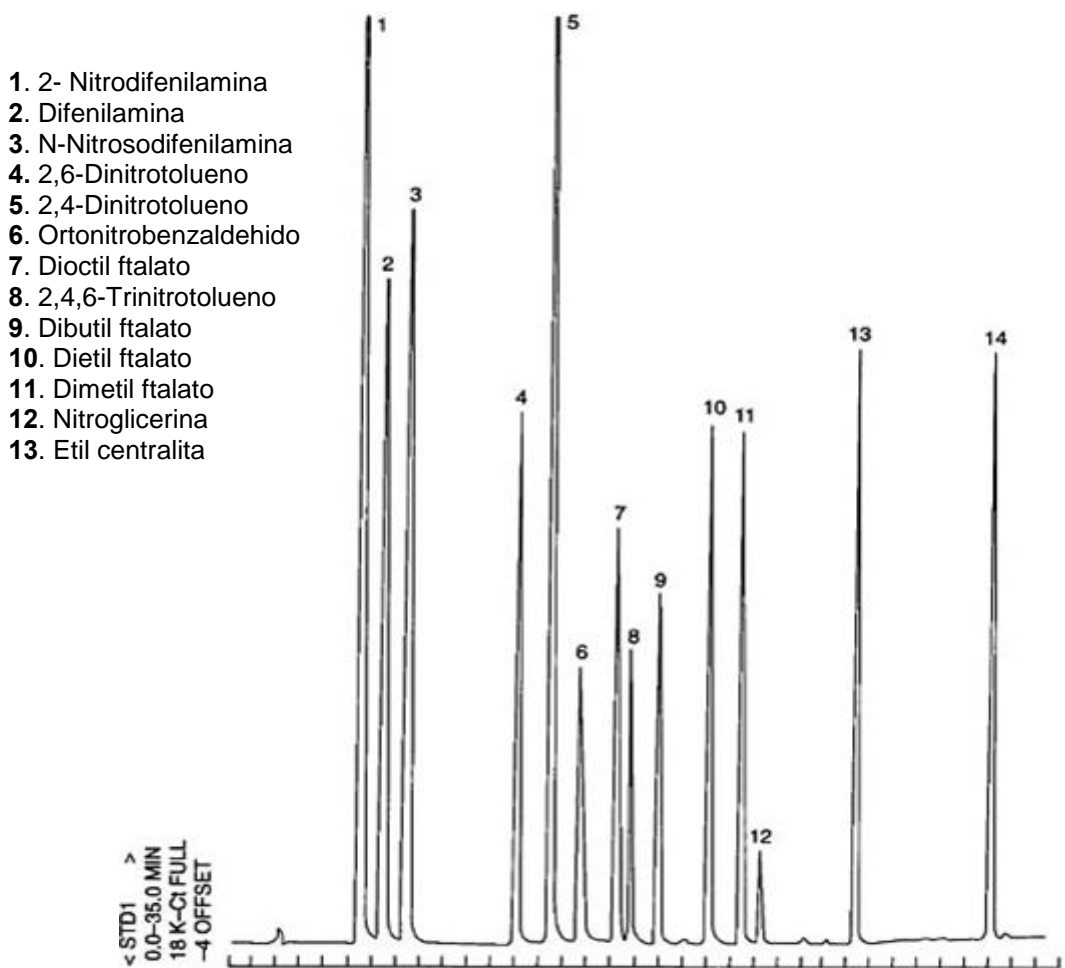


Figura 31. Cromatograma de HPLC/UV para identificar aditivos de pólvora sin humo.

Tabla 4. Condiciones cromatográficas empleadas para el análisis de pólvora sin humo (CLAR/UV).

| Columna: | Supercosil®, 15 cm x 4.6 mm, 3 µm, sílica. | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|--|--------|----|----|---|-----|---|---|-----|---|----|----|----|----|---|-----|
| Fase móvil | <p>A) 3 mL de 1,4-dioxano e 1L de isoctano.</p> <p>B) 0.51 L de cloruro de metileno, 0.5 L de isoctano, 50 mL de dioxano.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Tiempo</th> <th>%A</th> <th>%B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>100</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>100</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>85</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>0</td> <td>100</td> </tr> </tbody> </table> | Tiempo | %A | %B | 0 | 100 | 0 | 4 | 100 | 0 | 15 | 85 | 15 | 40 | 0 | 100 |
| Tiempo | %A | %B | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 100 | 0 | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 100 | 0 | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 85 | 15 | | | | | | | | | | | | | | |
| 40 | 0 | 100 | | | | | | | | | | | | | | |
| Detector | UV a 254 nm | | | | | | | | | | | | | | | |
| Velocidad de flujo: | 1 mL / min | | | | | | | | | | | | | | | |
| Inyector: | Rheodyne 7125, 5 µL loop | | | | | | | | | | | | | | | |

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La información que se presenta en este trabajo consiguió aportar las bases teóricas esenciales para el análisis forense de explosivos de baja potencia, tanto en el lugar de los hechos como en el laboratorio químico.

Pese a la gran diversidad de criterios para clasificar a los explosivos, fue posible realizar una clasificación actual que describe las características más importantes para su estudio. Se clasificaron de acuerdo a su potencia, composición química, sensibilidad y comportamiento explosivo, dando así una visión más clara de los grupos de explosivos y su utilidad.

En esta guía se pudo presentar la metodología analítica más adecuada aplicable para el análisis forense de los explosivos de baja potencia, que se compone de dos fases generales:

- 1) El análisis visual de los desechos para identificar el tipo de daño explosivo, seguido de un examen microscópico, la extracción de los residuos con disolventes, para así obtener toda la gama de compuestos de diferente polaridad, orgánicos e inorgánicos.
- 2) El empleo de técnicas analíticas presuntivas (ensayos de identidad, colorimétricas y elementales) seguido de técnicas confirmativas (CI, CLAR, IR).

Basándose en la metodología de análisis general propuesta, las técnicas analíticas más adecuadas para el análisis de explosivos de baja potencia son 2: 1) la CI, por su capacidad de detectar gran cantidad de productos iónicos presentes en los residuos post explosión de la pólvora negra y sus principales derivados, y 2) la CLAR acoplada a diferentes detectores por la capacidad de separar y analizar aditivos presentes en la pólvora sin humo, que es el segundo grupo más importante dentro de los explosivos de baja potencia.

Por otra parte, se resaltó la importancia de los artefactos explosivos improvisados y su poder evidenciario en los atentados con explosivos, analizando su construcción, mecanismo y recuperación. Ya que cuando hablamos de explosivos de baja potencia

invariablemente debemos referirnos al contenedor y al sistema utilizado para ocasionar daño. Es importante resaltar que estas bombas caseras son de uso muy frecuente y están estrechamente relacionadas al uso criminal, por lo que el análisis en situaciones reales implica su estudio minucioso.

Haciendo referencia a la criminalística de campo se pudieron mencionar esquemas particulares importantes para el manejo del lugar de los hechos y para evitar la contaminación de indicios.

Cabe mencionar que esta guía solo representa una introducción al mundo de los materiales explosivos, sujeta a discutirse y complementarse, evidentemente con conocimientos prácticos que permitan complementar la información teórica. También se debe considerar que el análisis e identificación forense de los explosivos requiere una investigación multidisciplinaria, que involucra campos no incluidos en este trabajo, como lo es la medicina, genética y patología forense, la ingeniería forense⁶², la detección de explosivos por métodos cada vez más sensibles^{63,64}, entre otros, cuyo función se vuelve muy importante en el caso de explosiones masivas, sabotajes aéreos y atentados con explosivos de alta potencia.

10. CONCLUSIONES

En esta guía se abordaron los fundamentos generales para poder incursionar en el área de los materiales explosivos, analizando el fundamento del proceso explosivo y los tipos de explosiones, pudiendo marcar así una diferencia entre los diferentes explosivos de baja potencia y los explosivos de alta potencia.

Se clasificó a los explosivos desde diferentes perspectivas de estudio y se presentaron las características más importantes y composición de los explosivos de baja potencia más relacionados con el ámbito forense.

Con base en los resultados obtenidos y presentados en esta guía se planteó una metodología, sistemática para el análisis químico post explosión de los principales explosivos de baja potencia, mediante la recopilación de técnicas básicas e instrumentales complementarias, que bien pueden ser implementadas para analizar este tipo de explosivos sin gran dificultad en los laboratorios forenses de México. Encontrando que las técnicas analíticas más adecuadas son la CLAR y la CI.

Se pudo describir la organización esencial que se lleva a cabo en la investigación criminalística interna y externa, mediante la presentación de estrategias adecuadas de respuesta, dirección, búsqueda, recolección, identificación, embalaje y protección de indicios.

El análisis forense de explosivos representa un campo relativamente nuevo en México, y es necesario contar con personal capacitado que tenga la habilidad de establecer un dictamen rápido y con la calidad de información necesaria, que implica el presentarse ante una corte. Para tal hecho es indispensable contar con fuentes de información de fácil y rápido acceso que ayuden a esclarecer posibles dudas y cuestionamientos y que permitan fundamentar las hipótesis en términos adecuados de tiempo. Tal situación forma la visión esencial de esta guía.

El perito puede encontrar gran cantidad de obstáculos a su paso en una escena post-explosión, requiere de gran destreza y organización, además debe seguir estrictas normas de seguridad.

El número de indicios aumenta en una explosión y es muy fácil contaminar residuos importantes, situación que se puede evitar utilizando procedimientos estandarizados y protocolos adecuados para el manejo de la escena.

Si bien la realidad indica que el uso de explosivos en nuestro país es todavía reducido y el terrorismo no es una práctica frecuente en comparación con países como E.U y España, debe considerarse que el número de incidentes explosivos y la probabilidad de atentados han aumentado en la última década. Es relevante tomar en consideración las experiencias que han vivido otros países.

La prevención de incidentes explosivos mediante la detección temprana es un tema que también se debe discutir ampliamente en trabajos posteriores. Es necesario crear un sistema que permita la profesionalización del análisis de las explosiones. Se debe conjuntar entre las instituciones de seguridad pública gubernamentales, las universidades y los sistemas de justicia; además de una cultura de prevención. De otro modo el avance en materia forense de los explosivos en México y el acceso a la información será muy lento.

11. REFERENCIAS

1. Mozayani A, Norezgly C. The forensic laboratory handbook procedures and practice. New Jersey: Humana Press; **2006**.
2. DeTata D, Collins P, McKinley A. A fast liquid chromatography quadrupole time-of flight mass spectrometry (LC-QToF-MS) method for the identification of organic explosives and propellants. Forensic Science International. **2013**;223:63-74.
3. Agrawl JP, Hudson RD. The organic chemistry of explosives London: Wiley; **2007**.
4. Avakhan J. The chemistry of explosives. 2nd edn. Cambridge: RSC paperbacks; **2004**.
5. Urbanski T. Chemistry and technology of explosives: Oxford: Pergamon Press; **1964**.
6. Urbanski T. Chemistry and technology of explosives. Oxford: Pergamon Press; **1965**. (vol 2).
7. Matyas R, Selesovsky J, Musil T. Sensitivity to friction for primary explosives. Journal of Hazardous Materials **2012**; 213-213:236-241.
8. Woodfin RL. Trace Chemical Sensing of Explosives. New Jersey: John Wiley and Sons Inc; **2007**
9. Urbanski T. Chemistry and technology of explosives. Oxford: Pergamon Press; **1967**. (vol 3).
10. Urbanski T. Chemistry and technology of explosives. Oxford: Pergamon Press; **1984**. (vol 4).
11. Conkling, JA. Chemistry of pyrotechnics: basic principles and theory, 2nd Ed. New York: CRC Press, Taylor and Francis Group; **2011**.
12. Meyer. Explosives sixth completely revised edition. 6th ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH and -Co.KGaA; **2007**.
13. National Academies Press. Black and smokeless powders. Technologies for finding bombs and the bomb makers. Washington.D.C; **1998**.
14. Beverige A. Forensic investigation of explosions New Jersey: Taylor and Francis; **2003**.
15. Meghoo C, Dennis JW, Tuman C, Fang R. PVSS13. Characterization and Management of Cervical Vascular Injuries Resulting from Improvised Explosive Devices (IEDs) and Rocket Propelled Grenades (RPGs). Journal of Vascular Surgery. **2011**;56:9-10.

16. Oxley JC, Smith J, Resende E, Rogers E, Strobel R, Bender E. Improvised explosive devices: Pipe Bombs. *J Forensic Sci.* **2006**; 46 (3): 1-25.
17. King S, Benson S, Kelly T, Lennard C. Determining the effects of routine fingerprint detection techniques on the subsequent recovery and analysis of explosive residues on various substrates. *Forensic Science International* **2013**..
18. Adebisi SS. Fingerprint Studies. The recent challenges and advancements: a literary view. *The internet journal of biological anthropology.* **2009**; 2(2):13-8.
19. La Jornada. Aumentan los accidentes por fuegos pirotécnicos. **2003**.
[Http://www.jornada.unam.mx](http://www.jornada.unam.mx)[Consulta 20 Febrero 2009].
20. Bosnar A, et al. War and suicidal deaths by explosives in south western Croatia. *Archives of medical research.* **2006**; 37(3):392-94.
21. Dhar D. Terrorist Blast Injuries. *The internet Journal of Rescue and Disaster Medicine.* **2007**; 7:1-10.
22. Merrifield R. Moreton PA. An examination of the major accident record of explosives manufacturing and stored in the UK. *Journal of Hazardous Materials.***1998**; 63(2-3):107-118.
23. Douglas J. Klapac. Review of: Practical Bomb Scene Investigation. *J Forensic Sci* **2007**; 52: 242-3.
24. Sorensen A. Mc. Gill. WL. What to look for in the aftermath of an explosion? A review of blast scene damage observables. *Engineering Failure Analysis.* **2008**; 18:836-845.
25. Brust H, Van Hasten A, Koeberg M, et al. Pentaerythritol tetranitrate (PETN) profiling in post-explosion residues to constitute evidence of crime-scene presence. *Forensic Science International.* **2013**; 230:37-45.
26. Kalemoglu M. Emergency department management in bombing and blast incidents. *The internet Journal of Rescue and Disaster Medicine.***2005**;50(4):1-6.
27. Argyros JG. Management of primary blast injury. *Toxicology.* **1997**;121:105-15.
28. Oxley JC, Smith JL, Kirschenbaum LJ, Shinde KP, Maringanti S. Accumulation of explosives in hair. *J Forensic Sci.* **2005** ; 50 (4): 1-6.
29. Oxley JC, Smith JL, Kirschenbaum LJ, Marimnganti S, Vadlamannati S. Detection of explosives in hair using ion mobility spectrometry. *J Forensic Sci.* **2008**; 53 (3): 690-3.
30. Oxley JC, Smith JL, Kirschenbaum LJ, Marimnganti S. Accumulation of explosives in hair—part II: factors affecting sorption. *J Forensic Sci* **2007**; 52 (6): 1291-6.

31. Beardah SM, Doyle PS, Hendey EC. Effectiveness of contamination prevention procedures in a trace explosives laboratory. *Science and Justice*. **2007**;47 (3):120-4.
33. Szomborng K, Jongekrijg F, Gilchrist E, et al. Residues from low-order energetic materials: The comparative performance of a range of sampling approaches prior to analysis by ion chromatography. *Forensic Science International*. **2013**;223: 55-62
34. Crowson A, Sean P, Clifford C, Stuart W, Nicola Z. Quality assurance testing of an explosives trace analysis laboratory– further improvements. *J Forensic Sci*. **2007**; 52 (4): 830-7.
35. Johns C, Shellie RA, Potter OG, O'Reilly JW, Hutchinson JP, Guijt RM, et al. Identification of homemade inorganic explosives by ion chromatographic analysis of post-blast residues. *J Chromatogr A* **2008**; 1182: 205–14.
36. Fritz SJ, Gjerde TD. *Ion chromatography*. Wiley- VCH. Weinheim; **2009**.
37. Banas A, Banas K. Post-blast detection of traces of explosives by means of Fourier transform infrared spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy*. **2009**. (Article in press).
38. Yinon J. *Counterterrorism Detection Techniques of Explosives*. Elsevier. Netherlands **2007**.
39. Lopez M, Ferrando JL, García-Ruiz C. Comparative analysis of smokeless gunpowders by Fourier transform infrared and Raman spectroscopy. *Analytica Chimica Acta*. **2012**;717:92-99
40. Jenkins R, Snyder RL. *Introduction to X-Ray Powder Diffractometry*. Wiley. New Jersey; **2006**.
41. Song-im N, Benson S, Lennard C. Establishing a universal swabbing and clean-up protocol for the combined recovery of organic and inorganic explosive residues. *Forensic Science International* **2012**; 223:136-147.
42. Song-im N, Benson S, Lennard C. Stability of explosive residues in methanol/water extracts, on alcohol wipes and on a glass surface. *Forensic Science International*. **2013**;226:244-253
43. Weiss J. *Handbook of ion chromatography*. Wiley- VCH. Weinheim; **2004**.
44. McCord BR, Hargadon KA, Hall KE, Burmeister SG. Forensic analysis of explosives using ion chromatographic methods. *Analytica Chimica Acta*. **1994**; 228 (1-2): 43-56.
45. Kolla P. Trace analysis of salt based explosives by ion chromatography. *Forensic Science International*. **1991**; 50 (2): 217-26.

46. Meng H, Wang T, Gou Y, Hashi Y, Guo X, Lin J. Simultaneous determination of inorganic anions and cations in explosive residues by ion chromatography. *Talanta*. **2008**;147(3):241-5.
47. MacCrehan WA, Bedner M. Development of a smokeless powder reference material for propellant and explosives analysis. *Forensic science international*. **2006**; 163 (1-2): 119-24.
48. Dahl DB, Loft PF. Determination of black and smokeless powder residues in firearms and improvised explosives devices. *Microchemical Journal*. **1987**; 35:40-50.
49. Bailey A, Murray GS. Explosives, propellants and pyrotechnics. London: Brassey's; **1989**.
50. Crippin BJ. Explosives and chemical weapons identification. New York: CRC Press; **2006**.
51. Fernández de la Ossa MA, Torre M, García-Ruiz C. Determination of nitrocellulose by capillary electrophoresis with laser-induced fluorescence detection. *Analytica Chimica Acta*. **2012**;745:149-155.
52. López M, Fernández de la Ossa MA, Galindo JS, et al. New protocol for the isolation of nitrocellulose from gunpowders: Utility in their identification. *Talanta*. **2010**;81:1742-1749.
53. Sikler AR. Explosive Principles. An essential guide to understanding explosives and detonations. Colorado: Paladin Press; **1992**.
54. Beveridge AD, Payton SF, Audette RJ, Lambertus AJ, Shaddick RC. Systematic analysis of explosive residues. *J Forensic Sci*. **1975**;20 (3):1-24.
55. Holmgren E, Ek S, Colmsjö A. Extraction of explosives from soil followed by gas chromatography–mass spectrometry analysis with negative chemical ionization. *Journal of Chromatography A*. **2012**; 1222: 109-115.
56. Ionita P. An enhanced colorimetric chemosensor for the detection of various nitro-explosives. *Tetrahedron Letters*. **2012**;53 :7143-7146.
57. Meyers RE, A systematic approach to the forensic examination of flash powders. *J Forensic Sci*. **1978**; 23(1): 1-8.
58. Almong J, Espino D, Tamiri Tsippy, Sonenfeld D. Trace analysis of urea nitrate in post-blast debris by GC/MS. *Forensic Science International*. **2013**;224:80-83.

59. Jehuda Y. Field detection and monitoring of explosives. *Trends Anal Chem.* **2002**; 21 (4) : 292-301.
60. Hanai T. HPLC a practical guide. Cambridge: RSC; **1999**.
61. Kazakevich Y. Lobrutto R. HPLC for pharmaceutical scientists. New Jersey: Wiley; **2007**.
62. Bjelovuk ID, Jaramaz S, Mickovic D. Estimation of explosive charge mass used for explosions on concrete surface for the forensic purpose. *Science & justice.***2012**;52:20-24.
63. Rowell F, Seviour J, Lim AY, et al. Detection of nitro-organic and peroxide explosives in latent fingerprints by DART- and SALDI-TOF-mass spectrometry. *Forensic Science International.* **2012**;221:84-91.
64. Brudzewski K, Osowski S, Pawloski W. Metal oxide sensor arrays for detection of explosives at sub-parts-per million concentration levels by the differential electronic nose. *Sensors and actuators B: Chemical.* **2012**;161:528-533.

12. GLOSARIO

ANFO: del inglés Ammonium Nitrate - Fuel Oil, es un explosivo de alto orden. Consiste en una mezcla de nitrato de amonio y un combustible derivado del petróleo, desde gasolinas a aceites de motor. Estas mezclas son muy utilizadas principalmente por las empresas mineras y de demolición, debido a que son muy seguras, baratas y sus componentes se pueden adquirir con mucha facilidad. Las cantidades de nitrato de amonio y combustible varían según la longitud de la cadena hidrocarbonada del combustible utilizado. Los porcentajes van del 90% al 97% de nitrato de amonio y del 3% al 10% de combustible, por ejemplo: 95% de nitrato de amonio y 5% de queroseno

Átomo (s): unidad básica de la materia ordinaria, consistente en un núcleo con protones y neutrones rodeado por electrones que orbitan a su alrededor.

Artefactos Explosivos Improvisados (IEDs): es un dispositivo explosivo usado frecuentemente en la guerra no convencional o guerra asimétrica, por fuerzas comando, guerrillas y terroristas. Se le conoce también con el nombre **IED** (del inglés Improvised Explosive Device) o **bomba casera**, nombre usado por los medios periodísticos para referirse a ellos. Dos componentes esenciales para este tipo de IED, son un contenedor para confinar el explosivo y una mecha para encender el mismo.

Combustión: Es una reacción química de oxidación, en la cual generalmente se desprende una gran cantidad de energía, en forma de calor y luz, manifestándose visualmente como fuego.

CCF: La cromatografía en capa fina (en inglés thin layer chromatography o TLC) es una técnica analítica rápida y sencilla, que permite determinar el grado de pureza de un compuesto, comparar muestras y realizar el seguimiento de una reacción. La muestra a analizar se deposita cerca de un extremo de una lámina de plástico o aluminio que previamente ha sido recubierta de una fina capa de adsorbente (fase estacionaria). Entonces, la lámina se coloca en una cubeta cerrada que contiene uno o varios disolventes mezclados (eluyente o fase móvil). A medida que la mezcla de disolventes

asciende por capilaridad a través del adsorbente, se produce un reparto diferencial de los productos presentes en la muestra entre el disolvente y el adsorbente.

CG/MS (cromatografía de gases acoplada a espectroscopia de masas): es una técnica para separar las sustancias químicas que se basa en las diferencias en conductas partitivas de una fase móvil y de una fase estacionaria para separar los componentes en la mezcla. La muestra es transportada por una corriente de gas a través de una columna empacada con un sólido o tal vez recubierta con una película de algún líquido. La espectrometría de masas (MS) utiliza el movimiento de iones en campos eléctricos y magnéticos para clasificarlos de acuerdo a su relación masa carga. De esta manera la espectrometría de masas es una técnica analítica por medio de la cual las sustancias químicas se identifican separando los iones gaseosos en campos eléctricos y magnéticos. La MS brinda información cualitativa y cuantitativa acerca de la composición atómica y molecular de materiales inorgánicos y orgánicos

Cromatografía iónica: es un proceso que permite la separación de iones y moléculas polares, basado en las propiedades de carga de las moléculas. Puede ser usada en casi cualquier tipo de molécula cargada, incluyendo grandes proteínas, pequeños nucleótidos y aminoácidos. La solución que debe inyectarse es usualmente llamada "muestra" y los componentes separados individualmente son llamados analitos. Es usada a menudo en purificación de proteínas, análisis de agua o control de calidad.

DCDA (Diciandiamida): es un nitrilo derivado de la guanidina. Polvo cristalino blanco, levemente soluble en agua y etanol, soluble en éter y benceno. Es una materia prima empleada como pesticida y combustible en explosivos.

Difracción de rayos X: se usa para confirmar la identidad de un material cristalino y la composición en el caso de ser una mezcla. Generalmente los rayos X se generan en un tubo evacuado con un filamento de tungsteno en un lado y del otro una placa metálica. Al hacer pasar una corriente por el filamento se desprenden electrones que son acelerados mediante una diferencia de potencial, para así chocar con la placa metálica, el choque genera una transición electrónica. La longitud de onda asociada a

la energía característica de los rayos X es del orden de las distancias de enlace de los compuestos químicos.

DNT: 2,4-dinitrotolueno, es un compuesto orgánico cristalino, amarillo pálido, precursor del TNT (trinitrotolueno) el cuál es un explosivo de alta potencia.

Explosóforo: en química orgánica, son los grupos funcionales que le dan a los compuestos, sus propiedades explosivas. El término fue acuñado por vez primera por el químico ruso V. Pletz en 1935.

Estibnita: También llamada antimonio brillante. Sulfuro de antimonio Sb_2S_3 . Mineral gris plomizo de brillo metálico, a veces, con trazos esmaltados de coloración muy variada. Se presenta en forma de agujas cristalinas y en masas compactas. A partir de ella se obtiene antimonio.

CLAR: cromatografía de líquidos de alta resolución, es un proceso analítico que utiliza un instrumento especialmente diseñado para separar, cuantificar y analizar los componentes de una mezcla química. La muestra de interés se hace pasar mediante un flujo de disolvente hasta una columna rellena del material especial para llevar a cabo la separación de los componentes, posteriormente dichos componentes pasan a un sistema de detección acoplado con un sistema de grabación de datos. Los componentes básicos del sistema incluyen: contenedor de disolventes, inyector automático, bomba cuaternaria, columna analítica, detector/es y el registrador de datos

Detonación: es un fenómeno explosivo donde se libera gran cantidad de energía en un tiempo mínimo, acompañado de ruido y efectos de destrucción sobre los medios que lo rodean, su velocidad se calcula en (miles de m/seg).

Deflagración: combustión súbita con llama a baja velocidad de propagación. Bajo ciertas condiciones las reacciones deflagrantes pueden llegar a un grado de reacción supersónico y constante, llamado detonación. A los explosivos que se manejan por este mecanismo, se les llama **explosivos deflagrantes**, el ejemplo más común es la pólvora. Los explosivos deflagrantes se incendian más rápido y más violentamente que los materiales combustibles ordinarios.

Explosivos: Son sustancias químicas o mezclas mecánicas, generalmente en estado sólido, capaces de reaccionar a cualquier estímulo externo, bien sea calor, fricción, electricidad, choque, humedad, que por medio de una reacción físico-química, se transforma violentamente generando liberación de energía, en forma de luz, calor, sonido, gases tóxicos y ondas mecánicas.

Explosivos detonantes: la reacción en este grupo se autoabastece por una onda de choque, supersónica (en el medio que recorre), que inicia al explosivo a medida que esta transcurre. Dada la alta velocidad de la reacción son explosivos muy potentes.

Explosivos de alta potencia: los explosivos de alta potencia o alto orden, son aquellos que tienen una velocidad de combustión elevada, de varios kilómetros por segundo, alcanzando velocidades de detonación y por eso son aptos para la demolición. Entre los principales explosivos de alta potencia encontramos: **TNT** (trinitrotolueno), **RDX** ó ciclonita (trinitrofenilmetilnitramina), **PENT** (tetratranitrato de pentaeritrita), **ANFO** (nitrato de Amonio / aceite combustible), **HMX** (ciclotetrametilentetranitramina).

Explosivos de baja potencia: los explosivos de baja potencia o bajo orden, son aquellos que se queman a una velocidad de varios metros por segundo, llegando incluso a velocidades de un par de km/s, lo que se llama deflagración (los explosivos de bajo orden generalmente no detonan). Son utilizados principalmente para la propulsión y para los fuegos artificiales. Entre los principales explosivos de baja potencia encontramos: **pólvora, pyrodex, pólvora sin humo, polvo dorado y pólvora sin humo**, mismos que son ampliamente utilizados para fabricar artefactos explosivos improvisados.

FTIR (espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier): es una técnica analítica que se utiliza para obtener el espectro infrarrojo de absorción, emisión, fotoconductividad de un sólido un líquido o un gas. Un espectrómetro FTIR recoge simultáneamente datos en un amplio rango espectral. El término se origina en el hecho de que una transformada de Fourier (proceso matemático) se requiere para convertir los datos obtenidos en datos reales.

FBB: nomenclatura utilizada para clasificar el tamaño de partícula de la *pólvora utilizada con fines destructivos*, a mayor número de F, menor es el tamaño de partícula, el rango utilizado está entre **1FBB** y **4FBB**. Es decir, un barril de pólvora con tamaño 4FBB tiene el menor tamaño de partícula, por lo tanto se incendia más rápido.

FA: nomenclatura utilizada para clasificar el tamaño de partícula de la *pólvora utilizada en fuegos artificiales*, a mayor número de F, menor es el tamaño de partícula, el rango utilizado está entre **1FA** y **7FA**. Es decir, un cohete con pólvora 7A tiene el menor tamaño de partícula, por lo tanto se incendia más rápido. Adicionalmente existen otras clasificaciones específicas como el granular D, granular fino y granular extrafino.

FG: nomenclatura utilizada para clasificar el tamaño de partícula de la *pólvora utilizada con fines “deportivos”*, a mayor número de F, menor es el tamaño de partícula, el rango utilizado está entre Fg y 4Fg. Es decir, la pólvora 4Fg en una bala tiene el menor tamaño de partícula, por lo tanto se incendia más rápido.

IR (espectroscopia infrarroja): se fundamenta en la absorción de la radiación infrarroja por las moléculas en vibración. Una molécula absorberá la energía de un haz de luz infrarroja cuando dicha energía incidente sea igual a la necesaria para que se dé una transición vibracional de la molécula. Es decir, la molécula comienza a vibrar de una determinada manera gracias a la energía que se le suministra mediante luz infrarroja. Pueden distinguirse dos categorías básicas de vibraciones: de tensión y de flexión. Las vibraciones de tensión son cambios en la distancia interatómica a lo largo del eje del enlace entre dos átomos. Las vibraciones de flexión están originadas por cambios en el ángulo que forman dos enlaces. La espectroscopia infrarroja tiene su aplicación más inmediata en el análisis cualitativo: detección de las moléculas presentes en el material. En la zona del espectro electromagnético IR con longitudes de onda del infrarrojo medio (entre 4000 y 1300 cm^{-1}) se suelen observar una serie de bandas de absorción provocadas por las vibraciones entre únicamente dos átomos de la molécula. Estas vibraciones derivan de grupos que contienen hidrógeno o de grupos con dobles o triples enlaces aislados.

Nitrocelulosa: es un producto obtenido por nitración de la celulosa pura, que se utiliza, de acuerdo a sus características, como base para pólvoras, dinamitas, gelatinas explosivas o pinturas.

Nitroglicerina: cuyo nombre IUPAC es **1,2,3-trinitroxipropano**, es un compuesto orgánico, que se obtiene mezclando ácido nítrico concentrado, ácido sulfúrico y glicerina. Su fórmula molecular es $C_3H_5N_3O_9$. El resultado es altamente explosivo. Es un líquido a temperatura ambiente, lo cual lo hace altamente sensible a cualquier movimiento, haciendo muy difícil su manipulación, aunque se puede conseguir una estabilidad relativa añadiéndole algunas sustancias, como el aluminio. Usualmente se transporta en cajas acolchadas a baja temperatura para disminuir el riesgo de explosión, ya que si sobrepasa los 41 °C (temperatura límite estimada) se produce una reacción muy violenta debido a la agitación intermolecular. La nitroglicerina es el componente principal de algunas mezclas explosivas.

Propulsores: es un producto químico que es usado en la producción de energía o de gas a presión, que se utiliza posteriormente para crear el movimiento de un fluido o para generar la propulsión de un vehículo, proyectil u objeto.

PVC: cloruro de polivinilo. Es el producto de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo a policloruro de vinilo. Es el derivado del plástico más versátil. Este se pueden producir mediante cuatro procesos diferentes: Suspensión, emulsión, masa y solución

Pólvora sin humo: llamada también pólvora blanca, es el nombre que se le da a cierto número de propulsores usados en armas de fuego y artillería que producen una cantidad insignificante de humo cuando se queman, a diferencia de la pólvora tradicional (la pólvora negra). Dicha pólvora puede ser de **base doble**, (cuándo contiene nitrocelulosa y nitroglicerina) o de **triple base** (cuándo contiene nitrocelulosa, nitroglicerina y nitroguanidina).

Pyrodex: es un sustituto de la pólvora negra, utilizado en cartuchos de armas de fuego. Tiene la ventaja de reducir su sensibilidad y aumenta la eficiencia explosiva como polvo

propulsor. A diferencia de la pólvora negra, en su fórmula incluye grafito y perclorato de potasio.

Terrorismo: es un concepto que hace referencia al uso de violencia o amenaza de violencia por parte de individuos o grupos contra otros individuos o sectores de una sociedad a los efectos de coaccionar a gobiernos o entidades políticas a responder a demandas de orden político, social o religioso.

THF (tetrahidrofurano): es un compuesto orgánico heterocíclico. Es un líquido transparente, de baja viscosidad y con un olor parecido al del dietil éter (a "éter"). Es uno de los éteres más polares y se usa como solvente de polaridad intermedia en reacciones químicas.

Vinsol: resina natural termoplástica obtenida del pino, tiene un color marrón oscuro y un alto punto de fusión, se utiliza como recubrimiento en algunos explosivos.

Voladura: es la acción de fracturar o fragmentar la roca, el suelo duro, el hormigón o de desprender algún elemento metálico, mediante el empleo de explosivos. Las mismas se realizan para lograr un objetivo predeterminado, pueden ser controladas, o no, puede ser a cielo abierto, en galerías, tules o debajo del agua.

